

**ATIKSU ARITMA TESİSİNDEN ATIKSU RAFİNERİSİNE**

---

***FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT TO  
WASTEWATER REFINERY***

Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin  
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Güven  
Prof. Dr. İzzet Öztürk

**Atıf için:** Erşahin, M.E., Güven, H. & Öztürk, İ. (2022). Atıksu Arıtma Tesisinden Atıksu Rafinerisine. M. Bulut ve C. Korkut (Eds). *Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilir Hayat* (s. 385-410). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. DOI: 10.53478/TUBA.978-605-2249-97-0.ch15

## ATIKSU ARITMA TESİSİNDEN ATIKSU RAFİNERİSİNE

**Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin**  
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Güven**  
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Prof. Dr. İzzet Öztürk**  
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

### Özet

Geçmişte, atıksu arıtma tesisleri (AAT) esas olarak alıcı ortam su kalitesini korumak için inşa edilirken günümüzdeki enerji ve hammadde kısıtları sebebiyle AAT'lerin enerji tüketiminin azaltılması ve madde geri kazanımının sağlanması da önem kazanmıştır. Ancak konvansiyonel aktif çamur (AÇ) proseslerinin uygulandığı AAT'lerde enerji ve madde geri kazanımının istenen seviyede gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu hedefe ulaşmak için yenilikçi proseslerin uygulanması gerekmektedir. Uygulanacak yenilikçi prosesler ile AAT'lerin enerji nötr hatta enerji pozitif hale getirilmesi ve atıksu içerisinde bulunan birçok faydalı maddenin geri kazanımı sağlanabilir. AAT'lerin enerji dengesinin iyileştirilmesi için proses optimizasyonu sağlanarak enerji tüketiminin azaltılması ve atıksuyun enerji muhtevasının elde edilmesi gerekmektedir. Arıtma sonrası oluşan fazla çamur çeşitli işlemlerin ardından toprak şartlandırıcısı (kompost) veya yardımcı yakıt olarak kullanılabilir. Çürütücü yan akımlarından ise çeşitli formlarda azot ve fosfor geri kazanımı sağlamak mümkündür. İleri arıtma teknolojilerinin uygulanmasıyla farklı alanlarda (sulama suyu, sanayide kullanım suyu, tuvalet sifon suyu vs.) kullanılmak üzere su geri kazanımı da sağlanabilir. AAT'lerden enerji ve madde geri kazanımının azami seviyeye çıkarılmasıyla AAT'ler atıksu rafinerilerine dönüştürülebilirler.

### *Anahtar kelimeler*

*Anaerobik çürütme, besi maddesi giderimi, enerji geri kazanımı, madde geri kazanımı, membran prosesler, yan akım, yenilikçi atıksu arıtma prosesleri*

## FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT TO WASTEWATER REFINERY

### **Abstract**

In the past, wastewater treatment plants (WWTPs) were built mainly to protect the receiving water body quality, but due to energy and raw material constraints, reducing the energy consumption of WWTPs and ensuring material recovery have also gained importance. However, it is not possible to achieve the desired level of energy and material recovery in WWTPs where conventional activated sludge (AS) processes are applied. In order to achieve this goal, innovative processes need to be implemented. With the innovative processes, it is possible to make WWTPs energy neutral or even energy positive, and to recover valuable materials from wastewater. In order to improve the energy balance of WWTPs, it is necessary to reduce energy consumption by providing process optimization and extract the energy content of wastewater. Generated excess sludge after treatment can be used as soil conditioner (compost) or auxiliary fuel after various processes. Nitrogen and phosphorus can be recovered in various forms from the digester side streams. With the application of advanced treatment technologies, water recovery can be achieved to be used for different purposes (irrigation water, industrial utility water, toilet flush water, etc.). WWTPs can be transformed into wastewater refineries through the maximization of energy and material recovery.

### **Keywords**

*Anaerobic digestion, energy recovery, innovative wastewater treatment processes, material recovery, membrane processes, nutrient removal, side stream*

## Giriş

Hızlı nüfus artışı ve sanayileşme ile kırsal alanlardan büyük şehirlere göçün en önemli sonuçlarından biri ekosistem üzerindeki baskının artmasıdır. Buna bağlı olarak en yaygın karşılaşılan çevresel sorunlardan biri göl, nehir ve deniz gibi alıcı su ortamlarında görülen kirliliktir. Evsel ve sanayi kaynaklı atıksuların alıcı ortamdaki su kalitesini olumsuz etkilememesi için başlıca alınacak önlem, oluşan atıksuların uygun şekilde toplanması ve atıksu arıtma tesislerinde (AAT) arıtılmasıdır. AAT'lerde gerçekleştirilen yeterli seviyede arıtma ile atıksu içerisindeki kirletici bileşenler giderilir ve arıtılan atıksuyun alıcı ortama deşarjı sonrasında, alıcı ortamın su kalitesinde herhangi bir bozulma gerçekleşmez.

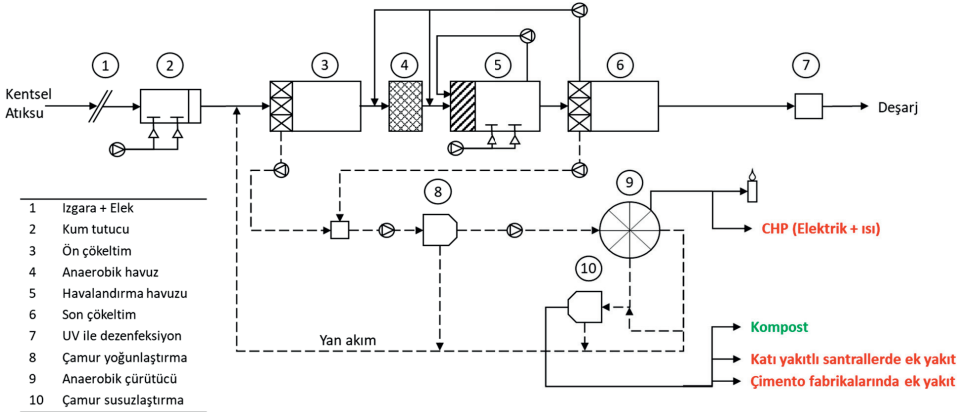
20. yüzyıl, atıksu arıtma teknolojilerinin gelişimi ve yeni proseslerin ortaya konması bakımından çığır açıcı gelişmelere sahne olmuştur. Özellikle 20. yüzyılın sonundan itibaren kaydedilen gelişmeler ile sadece karbon, azot ve fosfor gibi makrokirleticiler değil, atıksulardaki konsantrasyonları ng/L mertebesinde bulunabilen ilaç bakiyeleri, pestisitler ve hormonlar gibi mikrokirleticiler de giderilebilmektedir. Geliştirilen ileri arıtma teknolojileri ile alıcı su ortamlarının korunması yönünde önemli mesafeler kat edilmiştir. Bununla birlikte hem ileri arıtma proseslerinin yaygınlaşması hem de küresel ölçekte daha fazla AAT'nin hizmete alınmasıyla atıksuların arıtılması için harcanan enerji miktarı dünya genelinde tüketilen toplam enerjinin %3-5'ine yükselmiştir (Dai vd., 2019). Bazı belediyelerin toplam enerji giderlerinin yaklaşık %30-40'ı AAT'lerden kaynaklanabilmektedir.

Dünya genelindeki fosil kaynakların hızla tükenmesi ve yoğun fosil yakıt kullanımı sebebiyle oluşan çevresel etkiler (küresel ısınma, hava kirliliği vs.) AAT'lerin işletilmesi dahil birçok faaliyette enerji verimli uygulamaların kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. AAT'lerin işletilmesindeki en önemli gider kalemi enerji maliyetleri olduğu için AAT'lerdeki enerji tüketiminin optimizasyonu ve bu amaçla yapılacak iyileştirmeler büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda AAT'lerin girişinden deşarj noktasına kadar tüm arıtma birimlerinin performansının ve enerji tüketiminin değerlendirilip gerekli iyileştirme önlemlerinin alınması gerekmektedir. Belirli performans indikatörleri üzerinden yapılan ayrıntılı tesis içi izleme ve takip faaliyetleri ile en yoğun enerji tüketen noktaların tespit edilip her bir arıtma birimi özelinde yapılması gereken müdahalelerin belirlenmesi mümkün olmaktadır (Silva ve Rosa, 2015).

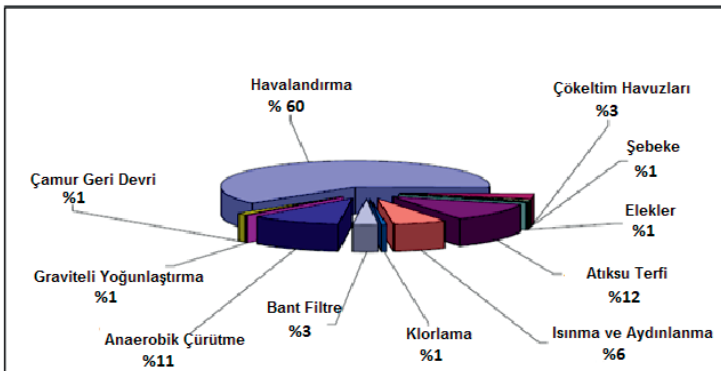
## Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Tüketimi

Şekil 1'de A<sup>2</sup>O (anaerobik-anoksik-oksik) prosesi ile işletilen ve oluşan fazla çamurdan enerji geri kazanımı sağlayan konvansiyonel bir aktif çamur (AÇ) tesisi görülmektedir. Şekil 1'deki arıtma konfigürasyonuna göre biyolojik azot giderimi için nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleri uygulanmaktadır. Nitrifikasyon prosesi yoğun havalandırma altında gerçekleştiği için yüksek bir enerji girdisine ihtiyaç duymaktadır. Şekil 2'de görüldüğü üzere, klasik AÇ

prosesi ile biyolojik besi maddesi giderimi yapılan bir AAT'de havalandırma için harcanan enerji, toplam enerji tüketiminin %50'sinden fazlasını teşkil etmektedir. Havalandırmadan sonra en fazla enerji tüketimi ise pompalardan kaynaklanmaktadır. Havalandırma ve pompalar için harcanan enerji, toplam enerji tüketiminin %70-80'ine tekabül edebilmektedir (Sarpong vd., 2020). Pompaj işlemleri arasında en önemli enerji tüketimi ise giriş terfi pompalarından kaynaklanmaktadır (Smith vd., 2018b). Öte yandan geleneksel olarak AAT'lerde enerji geri kazanımının en sık uygulandığı yerler çamur çürütme ve akabindeki çamur yakma işlemidir (Oladejo vd., 2018). Çamur çürütme ile oluşan biyogaz, kojenerasyon ünitelerinde (CHP) değerlendirilerek ısı ve elektrik enerjisi geri kazanımı sağlanabilmektedir (Tyagi ve Lo, 2013). Çürütme sonrası kalan çamur susuzlaştırıldıktan sonra katı yakıtlı santrallerde ve çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılabilir (Đurđević, Blečić, ve Jurić, 2019). Ancak konvansiyonel AÇ proseslerinin uygulandığı AAT'lerde geri kazanılan enerjinin, tüketilen enerjiyi karşılama oranı genellikle istenen seviyede olmamaktadır (Gu vd., 2017).



Şekil 1. Biyolojik besi maddesi giderimi yapan geleneksel bir AAT şeması



Şekil 2. Konvansiyonel bir AÇ tesisindeki enerji tüketiminin dağılımı (Öztürk, Dereli, ve Erşahin, 2015)

## Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Üretim/Geri Kazanım Potansiyeli

AAT'lerde enerji tasarrufunun sağlanması için proses optimizasyonu yapılmasının yanı sıra atıksuyun enerji içeriğinden de faydalanılabilir. Atıksuların enerji içeriği, bünyesindeki kimyasal enerji ve termal enerji ile deşarjda elde edilebilecek hidrolik enerjinin toplamına eşittir (Capodaglio ve Olsson, 2019). Atıksulardaki kimyasal enerji, içerisindeki bileşiklerin sahip olduğu kimyasal bağların enerjisi ile ilişkilidir ve anaerobik (havasız) çürütme ve çamur yakma gibi işlemlerle bu enerji muhtevası değerlendirilebilir. Termal (ısı) enerji kazanımı ise atıksuların debi ve sıcaklığı yıl boyunca genellikle stabil (kararlı) olduğu için yüksek bir potansiyel barındırmaktadır (Yang vd., 2020). Atıksuların deşarji esnasındaki düşüden (yükseklik farkı) faydalanılarak hidroelektrik enerji üretmek de mümkündür (Zhou ve Deng, 2017). Tablo 1'de tipik bir evsel atıksu numunesinin farklı enerji çeşitleri için sahip olduğu enerji içeriği verilmektedir.

**Tablo 1.** Evsel Atıksuyun Enerji İçeriği (Capodaglio ve Olsson, 2019)

Enerji çeşitleri	Enerji (kWh/m <sup>3</sup> )
Kimyasal enerji <sup>1</sup>	1,67-2,33
Termal enerji <sup>2</sup>	5,8
Hidrolik enerji <sup>3</sup>	0,008

<sup>1</sup> Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) konsantrasyonu 600 mg/L olan atıksu için

<sup>2</sup> Atıksu sıcaklığında 5°C'lik düşüş için

<sup>3</sup> Deşarjda 10 m'lik düşü bulunması halinde

Konvansiyonel AÇ sistemlerinin enerji ihtiyacının 0,4 kWh/m<sup>3</sup> civarında olduğu; anaerobik çürütme ve CHP'nin teşkil edilmesi halinde bu değer 0,1-0,2 kWh/m<sup>3</sup> mertebesine düştüğü belirtilmektedir (Smith vd., 2018a). Tablo 1'de verilen değerler dikkate alındığında, kentsel atıksuyun enerji muhtevasının arıtma sürecinde gereken enerji miktarından oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ancak konvansiyonel prosesler ile atıksulardaki enerji içeriğinin yüksek verimde kazanılması mümkün değildir ve bu sebeple birçok AAT'nin enerji bilançosu açık vermektedir. Bu durumu tersine çevirmek için yenilikçi atıksu arıtma proseslerinin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Yenilikçi biyolojik prosesler ile;

- *Havalandırma havuzlarındaki havalandırma ihtiyacı azaltılabilir.*
- *Oluşan çamurların organik madde içeriği artırılabilir ve böylece anaerobik çürütücülerden geri kazanılan enerji miktarı artırılabilir.*
- *AAT'lerin yer ihtiyacı azaltılabilir.*
- *Madde geri kazanımı yapılabilir.*
- *Oluşan çamurdan biyoplastik elde edilebilir.*

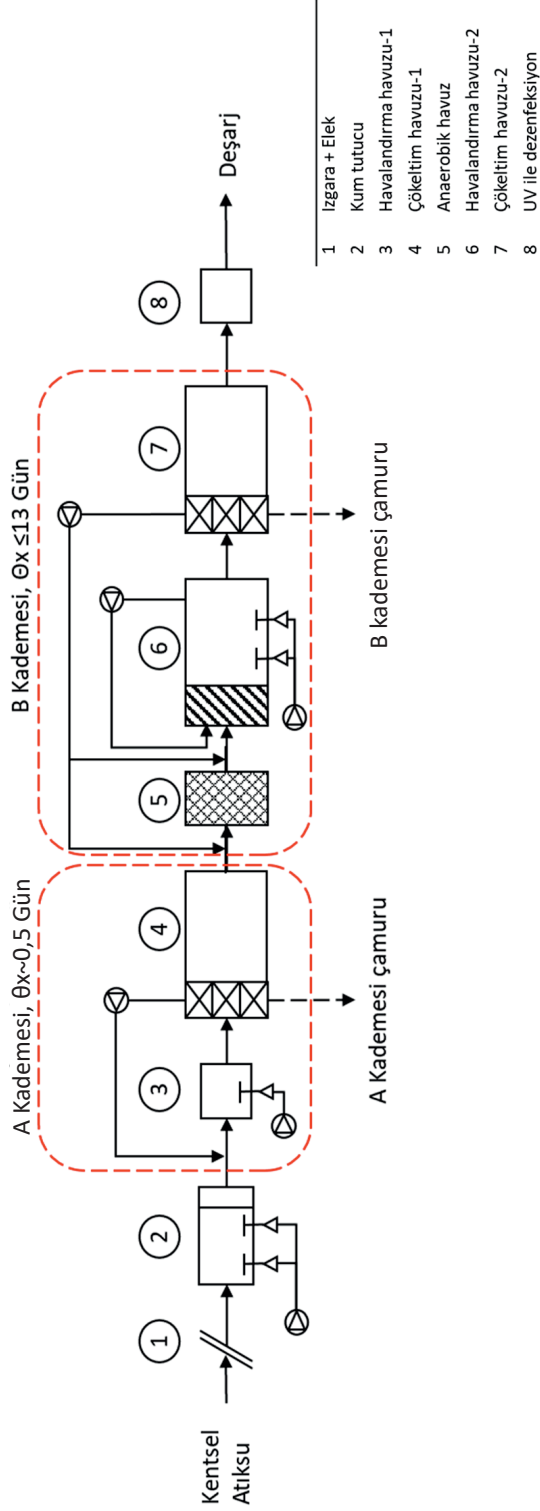
Çamur çürütücüde geri kazanılan biyogazın zenginleştirilmesi ile;

- *Araç yakıtı olarak kullanım sağlanabilir.*
- *Doğalgaz şebekesine besleme yapılabilir.*

### **Atıksu Arıtımında Yenilikçi Prosesler ve Atıksu Rafinerisi Yaklaşımı**

Konvansiyonel AAT'lerde en yüksek enerji tüketimi havalandırma enerjisi kaynaklıdır. Tesis içi kontrol önlemleri ve yüksek verimli ekipmanların kullanılmasıyla tüketilen havalandırma enerjisi azaltılabilir. İnce kabarcıklı difüzörlerin kullanılmasıyla havalandırma enerjisinden %45 oranında tasarruf sağlanması mümkündür. Havalandırma enerji ihtiyacını azaltmak için uygulanabilecek diğer bir yöntem ise çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonunu anlık olarak takip edilerek havalandırma havuzuna verilen hava miktarının ayarlanmasıdır. Bu sayede havalandırma enerjisinden %30'a varan tasarruf sağlanabilir (Sarpong vd., 2020). Azot giderimi yapılan atıksu arıtma sistemlerinde hava ihtiyacının amonyum konsantrasyonu üzerinden kontrol edilmesi de enerji tasarrufu sağlayan bir uygulamadır (Rieger vd., 2014). Konvansiyonel atıksu arıtma prosesleri yerine yenilikçi proseslere geçilmesi havalandırma enerjisi tüketimini azaltmanın diğer bir yoludur. Örnek olarak yüksek yüklü aktif çamur (YYAÇ) sistemlerinde tüketilen havalandırma enerjisi oldukça düşüktür. YYAÇ sistemleri aynı zamanda iki kademededen oluşan A/B prosesinin birinci kademesidir (Şekil 3). İlk kademe olan A prosesinde karbon giderimi gerçekleştirilirken, ÇO konsantrasyonu 0,5-1,0 mg/L aralığında tutulur (Güven vd., 2019a). A prosesinde ÇO'nun yanı sıra çamur yaşı ( $\Theta_x$ ) (~0,5 gün) ve hidrolik bekletme süresi (30-60 dakika) klasik AÇ sistemlerine göre çok daha düşüktür (Güven vd., 2019c; Wett vd., 2020). B prosesinde ise çamur yaşı 10 günün üzerinde tutularak amonyum oksidasyonu hedeflenmektedir (Wett, Buchauer, ve Fimml, 2007). Tablo 2'de klasik iki kademeli AÇ sistemleri ile A/B prosesinin tasarım parametreleri özetlenmiştir.





Şekil 3. A/B (adsorpsiyon/biyooksidasyon) prosesi

**Tablo 2.** Klasik İki Kademeli AÇ Sistemlerinin ve A/B Prosesinin Tasarım Parametreleri (Öztürk vd., 2015)

Parametre	Klasik Aktif Çamur		A/B Prosesi	
	1. Kademe	2. Kademe	1. Kademe	2. Kademe
Organik yük (kg BOİ <sub>5</sub> /kg AKM-gün)	0,4 – 1,5	0,10	>2	0,15
HBS (saat)	0,5 – 3	2 – 3	0,5 – 1	5 – 8
Hacimsel yükleme (kg/m <sup>3</sup> -gün)		0,25		0,5
BOİ <sub>5</sub> giderme verimi (%)	60-80		50-60	

BOİ<sub>5</sub>: 5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı

AKM: Askıda katı madde

HBS: Hidrolik bekleme süresi

Konvansiyonel AÇ sistemlerindeki mikroorganizmalar asılı olarak ve floküler yapıda bulunmaktadır. Bu yapıdaki mikroorganizmaların çökelebilmeye özelliği oldukça zayıf olduğundan dolayı biyolojik arıtma sonrasında arıtılmış su ile mikroorganizmaların birbirinden ayrılması için geniş çökeltim havuzlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple konvansiyonel AÇ tesislerinin arazi gereksinimi çok fazladır. Buna karşın, yenilikçi bir arıtma teknolojisi olan aerobik granülasyon prosesi ile daha kompakt ve çökeltme özelliği gelişmiş çamur granülleri elde edilebildiğinden, arazi ihtiyacında %70'e varan azalma sağlanabilmektedir (de Bruin vd., 2004). Granülasyon sayesinde biyolojik reaktörde 10 g/L'yi aşan biyokütle konsantrasyonları elde etmek mümkündür (Nancharaiyah ve Kiran Kumar Reddy, 2018). Granüller AÇ sistemleri, ardışık kesikli reaktör sistemi kullanılarak işletildiği için, arıtma işlemi tek bir reaktör içinde gerçekleşebilmektedir. Bundan dolayı bu sistemlerin işletilmesi oldukça kolaydır. Granüler AÇ tesislerinde çökeltim havuzu teşkil edilmediği gibi çamur geri devri ve karıştırma gibi işlemler de bulunmamaktadır. Pompaj ve karıştırma ihtiyacının düşük olması ile kimyasal ilavesinin olmaması, granüler AÇ sistemlerinin konvansiyonel AÇ sistemlerine kıyasla daha enerji verimli olmasını sağlamaktadır. Hollanda'da yapılan bir incelemede, granüler AÇ sistemlerinin enerji tüketiminin konvansiyonel AÇ sistemlerine göre %58-63 oranında düşük olduğu tespit edilmiştir (Pronk vd., 2015). Granüler AÇ sistemlerindeki arıtma mekanizması incelendiğinde, mikroorganizmaların oluşturduğu granüllerin, dışarıdan içeriye doğru sırasıyla aerobik, anoksik ve anaerobik bölgelere sahip olduğu ve bu sayede eş zamanlı olarak organik madde, azot ve fosfor giderimi gerçekleştiği görülmektedir. Bu giderim mekanizması ile yüksek oranda biyolojik besi maddesi giderimi elde etmek mümkün olmaktadır (Li, Zhang, ve Li, 2010).

AAT'lerde yan akımın ayrı arıtılması enerji verimliliğinin artırılması konusunda önemli bir potansiyel sunmaktadır. Yan akım, AAT'lerin çamur arıtma proseslerinde oluşarak arıtma tesisi başına geri beslenen akım olarak tanımlanmaktadır. Çamur fermentasyonu ve çürütücü ünitelerinden kaynaklanan yan akımın kirletici yükü organik azot, amonyum ve fosfat içeriği nedeniyle oldukça yüksektir. Tablo 3'te yan akımın kaynağına göre karakterizasyonu görülmektedir.

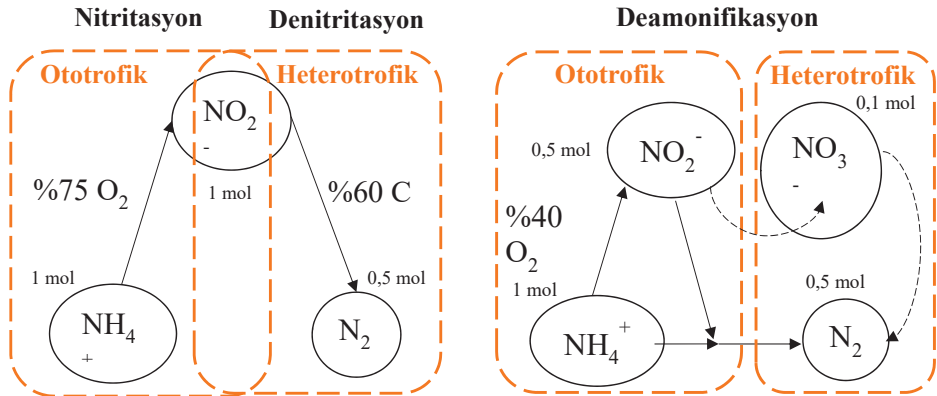
**Tablo 3.** Yan Akımın Kaynağına Göre Karakterizasyonu (Tchobanoglous vd., 2014)

Yan akım kaynağı	Yan akım debisi/ ana akım debisi (%)	(mg/L)						
		AKM	BOİ <sub>5</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub>	TP	Orto-P
<i>Graviteli yoğunlaştırıcı</i>								
Birincil çamur + Biyolojik çamur	3-5	100-350	60-400	20-70	8-45	0-8	4-15	3-8
Birincil çamur fermantasyonu	3-4	700-900	2.000-2.500	80-120	60-100	0	10-20	5-15
<i>Anaerobik çürütücü (mezofilik)</i>								
	0,1-0,5	100-10.000	100-1.700	100-1.200	20-400	0-400	200-350	200

TKN: Toplam kjeldahl azotu

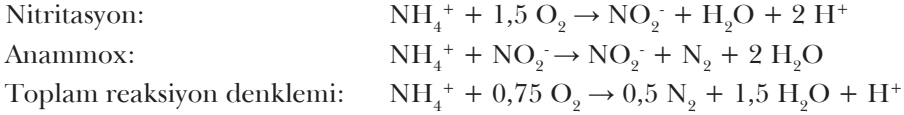
TP: Toplam fosfor

Çamur çürütmenin yapıldığı AAT'deki toplam azot yükünün %15-20'sinin yan akım kaynaklı olduğu söylenebilir. (Fux vd., 2003). Yan akımdan kaynaklanan ilave azot yükü ana atıksu akımındaki KOİ/N oranını azalttığından dolayı biyolojik azot giderimi olumsuz etkilenmektedir (Jenicek vd., 2004). Bu sorunun üstesinden gelmek için yan akımın arıtma tesisi başına devredilmeden ayrı arıtılması tercih edilmektedir. Sahip olduğu yüksek amonyum konsantrasyonu ve düşük KOİ/N oranı sebebiyle yan akımın arıtılması için yenilikçi teknolojiler kullanılmaktadır. Bu teknolojiler arasında nitritasyon-denitritasyon ile nitritasyon-anaerobik amonyum oksidasyonu (deamonifikasyon) öne çıkmaktadır (Şekil 4).

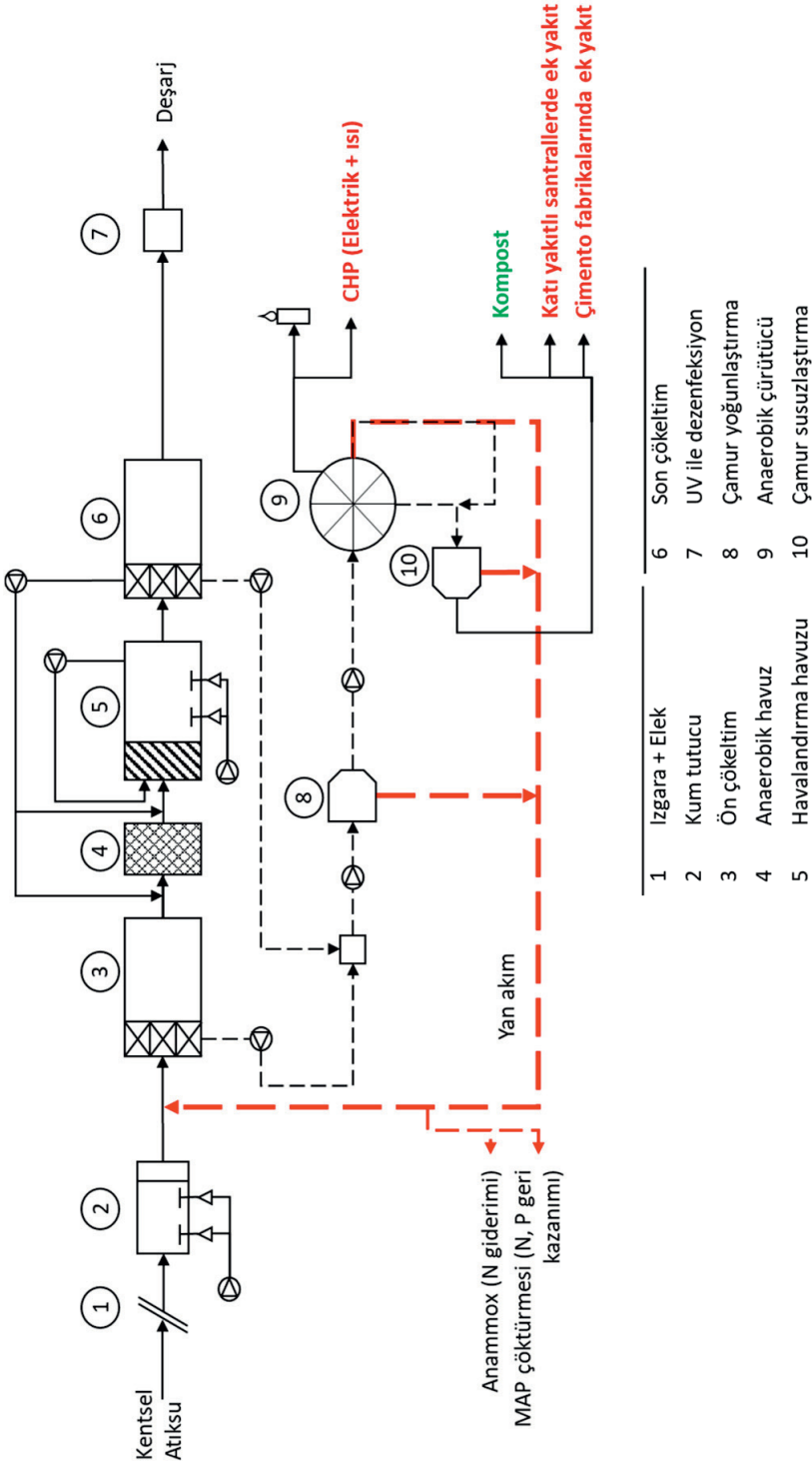
**Şekil 4.** Nitritasyon-denitritasyon ve deamonifikasyon süreçleri (Tchobanoglous vd., 2014)

Nitritasyon-denitritasyon prosesinde nitrit üzerinden azot giderimi sağlandığı için nitrifikasyondan farklı olarak nitritin nitrata oksitlenmesi söz konusu değildir. Dolayısıyla nitritasyon prosesinin (örneğin Sharon prosesi) oksijen ihtiyacı klasik nitrifikasyona göre %25 daha azdır. Bunun yanı sıra denitritasyon aşamasındaki organik karbon ihtiyacı klasik denitrifikasyona göre %40 daha düşüktür (Jenicek vd., 2004). Nitritasyon-denitritasyon prosesinde, nitrit oksitleyici mikroorganizmaların çoğalmasını engellemek için ÇO ve çamur yaşının düşük tutulması gerekmektedir (Fux vd., 2003).

Diğer bir yenilikçi azot giderimi prosesi ise, nitritasyon prosesinde amonyumun kısmi oksidasyonu ve sonrasında anaerobik ortamda amonyumun oksitlenmesi (Anammox) ile azot giderimidir. Nitritasyon-Anammox prosesi ile gerçekleştirilen azot gideriminde toplam oksijen ihtiyacı klasik nitrifikasyona göre %60 oranında daha düşük iken, klasik denitrifikasyonda olduğu gibi organik karbon ihtiyacı bulunmamaktadır (Lackner vd., 2014).

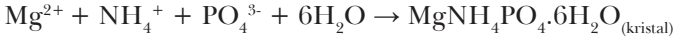


Yan akımda Nitritasyon-Anammox prosesi uygulanan bir AAT için örnek akım şeması Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Yan akımda Nitrasyon-Anammox prosesinin uygulanması

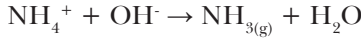
Yüksek besi maddesi konsantrasyonu sebebiyle yan akımdan azot ve fosfor geri kazanımı sağlanması mümkündür. Bu sayede tesis başına geri devrettirilen azot ve fosfor yükü azaltılarak fosfor giderimi için harcanan kimyasal madde sarfiyatı ile azot gideriminde tüketilen enerji miktarından tasarruf edilebilir (Egle vd., 2016). Anaerobik çürütücü çıkış akımında bulunan düşük çözünürlüğe sahip magnezyum amonyum fosfat (MAP), susuzlaştırma ünitelerinde ve borularda birikerek işletme ve bakım sorunlarına neden olur. Bununla beraber, yan akımdan MAP çöktürmesi ile ekonomik değeri yüksek, kristalleşmiş ve tekrar kullanılabilen bir ürün elde etmek amaçlanır. pH 8 ile 8,8 arasında gerçekleştirilen MAP çöktürmesi ile en az %80 fosfor geri kazanımı sağlanabilmektedir (Tchobanoglous vd., 2014):



MAP'ın başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Gübre sanayii
- Fosfat sanayii için hammadde
- Yangın direnç panelleri yapımında bağlayıcı malzeme
- Çimentolarda bağlayıcı malzeme

Yan akımda besi maddesi geri kazanımının diğer bir yolu amonyak sıyırmasıdır. Bu yöntemde yan akımın pH'ı 11'e kadar yükseltilerek, gaz faza geçen  $\text{NH}_3$  asidik bir çözeltide absorbe edilebilir:



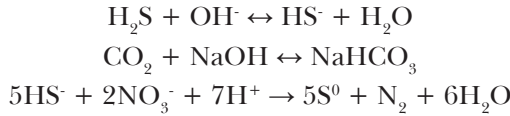
Sıcaklık düştüğünde amonyak sıyırma işleminin verimi düşmektedir. Bu sebeple özellikle termofilik anaerobik çürütücü üst sularından daha yüksek verim ile azot geri kazanımı sağlanabilir. Geri kazanılan ürünün gübre olarak kullanımı mümkündür (Qasim, 1999). Bunun yanı sıra gaz fazındaki  $\text{NH}_3$ , gaz motorlarında yakılarak enerji üretilebileceği gibi araç yakıtı olarak da değerlendirilebilmektedir (Kehrein vd., 2020).

Anaerobik çürütmede oluşan biyogazın enerji içeriğinin artırılması ve içerisindeki istenmeyen gazların ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  vs.) giderilmesi için zenginleştirilmesi gerekmektedir. Zenginleştirilen biyogaza "biyometan" ismi verilmekte ve zenginleştirme sonrasında biyogazın hacimce metan içeriği genellikle >%95 olmaktadır. Biyometanın kullanılabileceği başlıca alanlar şunlardır (Sun vd., 2015):

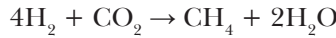
- Binalardaki ocaklarda (mutfakta) kullanım
- Doğalgaz boru hattına enjeksiyon
- Araç yakıtı olarak kullanım

Biyogazın zenginleştirilmesi amacıyla birçok farklı teknoloji kullanılmaktadır. Uygun çözeltili ile yıkama, dondurma yoluyla ayırma, fiziksel ve kimyasal absorpsiyon, moleküler elek ile ayırma, membran ile ayırma, hidrat oluşturma ve biyolojik yöntemler biyogaz zenginleştirme teknolojilerinden bazılarıdır (Sun vd., 2015).

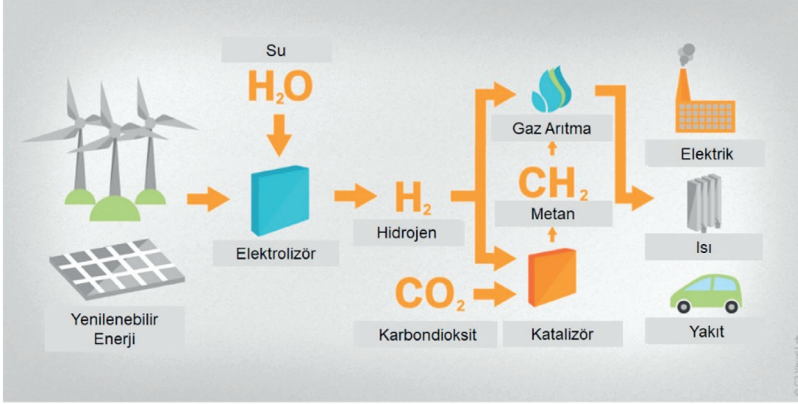
Zenginleştirilmemiş biyogazdaki en önemli safsızlık kaynaklarından biri hidrojen sülfürdür ( $H_2S$ ). Gaz motoru üreticileri, borularda korozyonun önlenmesi için biyogazdaki  $H_2S$  konsantrasyonunun 100-300 ppm arasında olmasını tavsiye etmektedir.  $H_2S$  oksijen ile okside olsa dahi, biyogazı oksijene maruz bırakmak güvenlik sorunlarına yol açar. Ototrofik denitrifikasyon prosesi ile biyogazdan  $H_2S$ 'in giderilmesi mümkün iken aynı anda sülfid ve nitrat giderimi de sağlanmaktadır. Bu süreçte elektron kaynağı olarak elementel kükürt (S) veya sülfid ( $S^{2-}$ ) kullanılabilir. Biyogazdaki  $H_2S$  ilk olarak kimyasal absorpsiyon (hidroksit çözeltileri) ile ayrıldıktan sonra ototrofik denitrifikasyon yapan yukarı akışlı sabit yataklı reaktöre beslenebilir. İlk aşamada uygulanan kimyasal absorpsiyon ile ototrofik denitrifikasyon mikroorganizmaları için gerekli olan inorganik karbon da biyogazdan ayrılmış olur (Bayraktar, Tilahun, ve Calli, 2016):



Atıksu rafinerisi yaklaşımı kapsamında suni (yapay) metan üretimi diğer bir yeni ve dikkat çekici konudur. Bu yaklaşımda anaerobik çürütmede oluşan biyogazın yakılması sonucu açığa çıkan  $CO_2$ , hidrojen ile reaksiyona sokularak metan üretimi amaçlanmaktadır. Bu prosese metanlaşma ismi de verilmektedir (Bensmann vd., 2014):



Bu şekilde suni metan üretimi özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun olarak kullanıldığı bölgelerde yüksek bir potansiyel sunmaktadır. Şekil 6'da yenilenebilir enerji üretimi ile suni metan üretiminin entegre edildiği bir sistemin akış diyagramı görülmektedir. Rüzgar ve güneş gibi kaynakların kullanıldığı yenilenebilir enerji üretiminde meteorolojik şartlara bağlı olarak büyük salınımlar gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak açığa çıkan fazla enerjinin depolanması ile ilgili sorunlarla karşılaşmaktadır. Enerji fazlasının suyun hidrolizi için kullanılıp suni metan üretiminde ihtiyaç duyulan hidrojenin elde edilmesi mümkündür. Biyogazın yakılması sonucu oluşan  $CO_2$  ile suyun elektrolizi sonucu açığa çıkan  $H_2$ 'nin yukarıda verilen metanlaşma reaksiyonuna girmesi sonucu metan üretimi gerçekleşmektedir (Lecker vd., 2017).

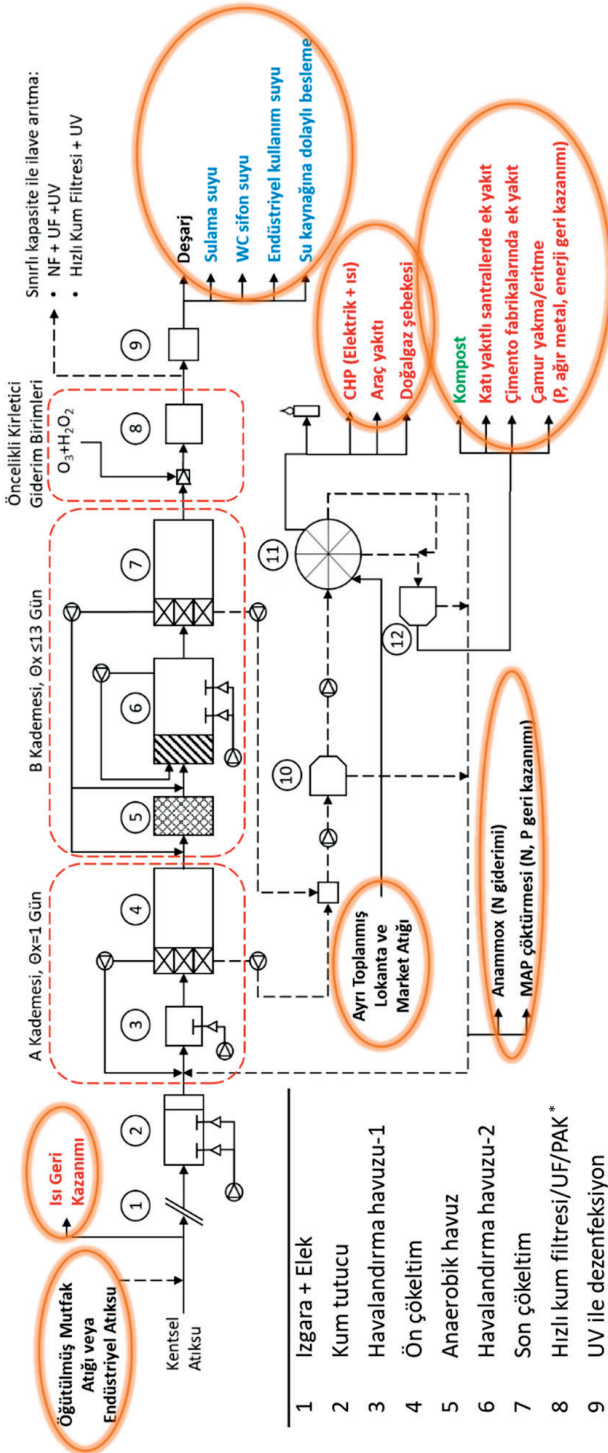


Şekil 6. Suni metan üretimi (Vattenfall, 2021)

Anaerobik çürütmeden elde edilebilecek biyometan miktarını artırmanın diğer bir yolu da atıksu akımına öğütülmüş organik katı atık ilavesi yapmaktır. Organik katı atıkların atıksu akımına dahil edilmesinin başlıca yolu, binaların mutfaklarında tezgah altı tipi atık öğütücülerinin teşkil edilmesi ve bu sayede öğütülmüş mutfak atığının kanalizasyon sistemine iletilmesidir. (Iacovidou, Ohandja, ve Voulvoulis, 2012). Mutfak atığı ilavesinin miktarına bağlı olarak atıksudaki organik miktarı artmaktadır. Bu şekilde anaerobik çürütmede daha yüksek biyogaz oluşumu sağlanmaktadır (Güven vd., 2019b). Mutfak atığı ilavesi, atıksudaki karbon miktarını artırdığı için AAT'lerde biyolojik azot giderimindeki denitrifikasyon potansiyelini artırmaktadır (Battistoni vd., 2007). Mutfak öğütücüsü kullanımının yaygınlaşmasıyla atık taşıma maliyetlerinde düşüş sağlanabileceği gibi atık toplamada daha az konteynere ihtiyaç duyulur. Bu kapsamda, atık yönetiminin basitleşmesine bağlı olarak, atık toplama ve taşımadan kaynaklanan koku problemleri de azalabilir (Bernstad Saraiva, Davidsson, ve Bissmont, 2016).

Şekil 7'de yukarıda açıklanan farklı arıtma teknolojileri ve uygulamaları dikkate alınarak hazırlanan örnek bir AAT şeması verilmektedir. Sahip olduğu yüksek enerji ve madde geri kazanımı potansiyeli sayesinde söz konusu AAT'nin atıksu rafinerisi (AR) olarak tanımlanması mümkündür. Şekil 7'de görüldüğü üzere, tesisin tüm çıktıları birer faydalı ürün olarak değerlendirilmektedir. Anaerobik çürütme ile sağlanan enerji geri kazanımının yanı sıra çürütme sonrasında kalan çamurdan enerji (ek yakıt olarak) ve madde geri kazanımı (kompost, fosfor vb.) sağlamak mümkündür. Ayrıca sahip olduğu organik madde içeriği sayesinde ayrı toplanmış lokanta ve market atıklarının anaerobik çürütücülere beslenmesi, çürütücülerden elde edilecek biyogaz miktarını artırabilir. Çıkış suyundan sağlanabileceği en önemli fayda ise su geri kazanımıdır. Geri kazanılan suyun kullanım amacına bağlı olarak çeşitli membran prosesleri (ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon) ile ultraviyole (UV) gibi dezenfeksiyon proseslerinin uygulanması gerekebilir. İnsan ve çevre sağlığına olumsuz etkileri giderek daha iyi anlaşılabilen öncelikli kirleticilerin (ilaç kalıntıları, zirai ilaçlar, endüstriyel kimyasallar, hormonlar vs.) giderimi için ise ileri arıtma prosesleri (aktif karbon, ileri oksidasyon gibi) uygulanmalıdır. Tablo 1'de verildiği üzere kentsel atıksuların önemli bir termal enerji içeriği bulunduğundan, bu enerjinin ısı pompaları ile geri kazanılması AAT'lerin arıtma rafinerisi haline getirilmesine önemli katkı sağlayacaktır.





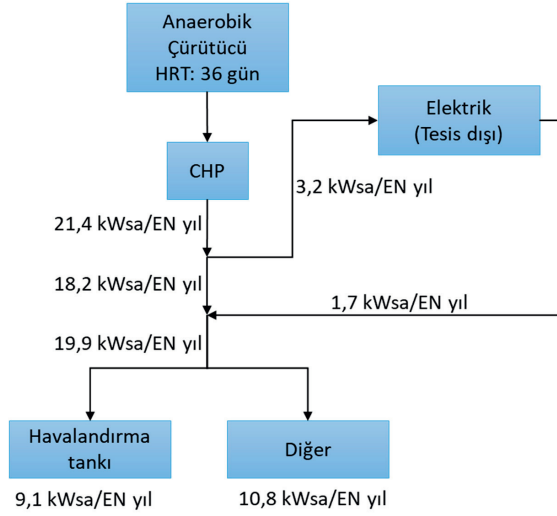
\*PAK: Toz aktif karbon

Şekil 7. Enerji verimli bir ATK veya atıksu rafinerisi

Diğer bir yenilikçi arıtma teknolojisi ise anaerobik arıtma ile membran teknolojisinin birleştirilmesiyle geliştirilen anaerobik membran biyoreaktör (AnMBR) teknolojisidir. AnMBR prosesi ile hem membran ile ayırmanın hem de anaerobik arıtmanın avantajlarından faydalanmak mümkündür (Smith vd., 2012). Membranların kullanılmasıyla biyolojik arıtmada karşılaşılan en büyük sorunlardan biri olan biyokütle ile arıtılmış atıksuyun ayrılması sorunu çözümlenerek, partiküllerden tamamen arındırılmış bir çıkış suyu kalitesi elde edilebilmektedir. Membran proses kullanılmasıyla partiküllerin yanı sıra patojenler de büyük oranda giderilir. AnMBR'lerde sistemdeki katı maddenin tamamına yakını reaktörde alıkonabildiği için çamur yaşı ile HBS birbirinden ayrılabilir. Bu ise biyolojik reaktör hacmini önemli ölçüde azaltmaktadır (Abdelrahman vd., 2020; Ozgun vd., 2013).

Yüksek organik yüklemelere karşı direnç, havalandırma ihtiyacının olmaması, düşük çamur üretimi ve biyogaz eldesi sayesinde enerji geri kazanımı AnMBR teknolojisinin en önemli özelliklerindedir. Uygun koşullar altında ve ilave arıtma proseslerinin entegrasyonu ile AnMBR prosesi uygulanarak besi maddesi geri kazanımı da sağlanabilir. (Ozgun vd., 2013). Zhen vd. (2019) farklı atık akımlarının AnMBR sistemi ve sonrasında yenilikçi prosesler ile arıtılması yoluyla atıksu rafinerisi anlayışına uygun bir arıtma konfigürasyonunun geliştirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Buna göre, AnMBR'den enerji geri kazanımı ve MAP çöktürmesi ile fosfor geri kazanımı sağlanabilir. Geri kazanılan fosforun arazide kullanılması ile sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkıda bulunulabilir. Bunun yanı sıra, AAT'lerde güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, atıksu rafinerisi yaklaşımını güçlendiren unsurlardır.

Dünya genelinde yenilikçi atıksu arıtma teknolojilerini başarıyla uygulayan enerji pozitif AAT'ler bulunmaktadır. Bu tesislerin ortak özelliği; enerji verimli işletme stratejileri ile havalandırma enerjisi ve pompalama ihtiyacını azaltarak, birlikte çürütme (co-digestion) gibi enerji geri kazanım seçeneklerini optimum seviyede uygulamaktır (Shen vd., 2015). Enerji fazlası veren AAT'ler arasında en çok bilinen tesislerden biri Avusturya'da bulunan ve kapasitesi 146.000 eşdeğer nüfus (EN) olan Strass AAT'dir. Bu tesiste arıtma konfigürasyonu olarak kimyasal destekli ön çökeltim ve A/B prosesi uygulanmaktadır. Yan akımda ise deamonifikasyon ile azot giderimi sağlanmaktadır. Tesiste, havalandırma enerjisinin optimize edilmesi için prostedeki ÇO ve amonyum anlık olarak takip edilmektedir. Mezofilik şartlarda işletilen anaerobik çürütücülerde fazla çamur ile birlikte ön işlemden geçirilmiş mutfak atıkları çürütülmektedir. Tesisin enerji bilançosuna göre enerji tüketiminin 19,9 kWh/EN/yıl, enerji üretiminin ise 21,4 kWh/EN/yıl olduğu görülmektedir (Şekil 8). Çıkış suyu kalitesi incelendiğinde %80 azot giderimi sağlanırken, çıkış TP konsantrasyonu <1 mg/L'dir (Nowak, Keil, ve Fimml, 2011).



Şekil 8. Strass AAT enerji dengesi (Nowak vd., 2011)

## Genel Değerlendirme

Özellikle ileri biyolojik arıtmanın yapıldığı AAT'lerdeki havalandırma enerjisi ihtiyacı, tesis enerji ihtiyacının önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Dolayısıyla AAT'lerin harcadığı havalandırma enerjisinin optimize edilmesi, tesis genelindeki enerji dengesinin iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra pompaj ve anaerobik çürütücülerin ısıtılması gibi işlemlerde gereken enerjinin azaltılması için önemli imkanlar bulunmaktadır. AAT'lerin tasarım aşamasında uygun ekipmanların seçilmesi, işletme aşamasında ise uygun işletme stratejilerinin izlenmesi AAT'lerin enerji verimli hale getirilmesinde büyük rol oynamaktadır. Ancak enerji tüketiminin azaltılması için çeşitli önlemler alınırken çıkış suyu kalitesinden de ödün verilmemesi gerekmektedir. Bu sebeple yeni ekipman alımı ile enerji verimli işletme stratejilerinin hayata geçirilmesinde çıkış suyu kalitesindeki değişimler yakından takip edilmelidir.

İşletilen AAT'lerin yenilikçi prosesler ile enerji verimli hale getirilmesi mümkündür. Enerji bakımından yeterliliğin hatta enerji fazlası verebilmenin yanı sıra yenilikçi prosesler ile atıksudaki azot ve fosfor gibi değerli maddelerin geri kazanımı da yapılabilmektedir. Madde geri kazanımı ile ilgili olarak geliştirilmiş ve hali hazırda uygulamada olan prosesler bulunmakla birlikte, bu prosesler üzerine araştırmaların artırılması ve uygulamaların yaygınlaştırılması elzemdir. İleri seviyede madde geri kazanımı sağlayan proseslerinin kullanılmasıyla atıksu bünyesindeki tüm değerli maddelerin yüksek oranda geri kazanımı mümkündür. Bunun yanı sıra başta atıksuyun sahip olduğu ısı enerjisinin geri kazanımı olmak üzere diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının da devreye alınmasıyla AAT'lerin sadece atıksuların arıtıldığı tesisler değil, enerji ve madde üretiminin yapıldığı atıksu rafinerileri haline getirilmesi sağlanabilir.

## Kaynakça

- Abdelrahman, A. M., Ozgun, H., Dereli, R. K., Isik, O., Ozcan, O. Y., van Lier, J. B., . . . Ersahin, M. E. (2020). Anaerobic membrane bioreactors for sludge digestion: Current status and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1-39. DOI: 10.1080/10643389.2020.1780879
- Battistoni, P., Fatone, F., Passacantando, D., & Bolzonella, D. (2007). Application of food waste disposers and alternate cycles process in small-decentralized towns: a case study. *Water Res*, 41(4), 893-903. DOI: 10.1016/j.watres.2006.11.023
- Bayrakdar, A., Tilahun, E., & Calli, B. (2016). Biogas desulfurization using autotrophic denitrification process. *Appl Microbiol Biotechnol*, 100(2), 939-948. DOI: 10.1007/s00253-015-7017-z
- Bensmann, A., Hankc-Rauschenbach, R., Heyer, R., Kohrs, F., Benndorf, D., Reichl, U., & Sundmacher, K. (2014). Biological methanation of hydrogen within biogas plants: A model-based feasibility study. *Applied Energy*, 134, 413-425. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.047
- Bernstad Saraiva, A., Davidsson, A., & Bissmont, M. (2016). Lifecycle assessment of a system for food waste disposers to tank - A full-scale system evaluation. *Waste Manag*, 54, 169-177. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.04.036
- Capodaglio, A., & Olsson, G. (2019). Energy Issues in Sustainable Urban Wastewater Management: Use, Demand Reduction and Recovery in the Urban Water Cycle. *Sustainability*, 12(1). DOI: 10.3390/su12010266
- Dai, Z., Heidrich, E. S., Dolfig, J., & Jarvis, A. P. (2019). Determination of the Relationship between the Energy Content of Municipal Wastewater and Its Chemical Oxygen Demand. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(7), 396-400. DOI: 10.1021/acs.estlett.9b00253
- de Bruin, B., de Kreuk, M. K., van der Roest, H. F. R., Uijterlinde, C., & van Loosdrecht, M. C. (2004). Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? *Water Sci Technol*, 49(11-12), 1-7.
- urdević, D., Blecich, P., & Jurić, Ž. (2019). Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. *Energies*, 12(10). DOI: 10.3390/en12101927
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Sci Total Environ*, 571, 522-542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.019
- Fux, C., Lange, K., Faessler, A., Huber, P., Grueniger, B., & Siegrist, H. (2003). Nitrogen removal from digester supernatant via nitrite – SBR or SHARON? *Water Sci Technol*, 48(8), 9-18.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Robinson, Z. P., . . . Li, F. (2017). The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. *Applied Energy*, 204, 1463-1475. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.02.069
- Güven, H., Dereli, R. K., Ozgun, H., Ersahin, M. E., & Ozturk, I. (2019a). Towards sustainable and energy efficient municipal wastewater treatment by up-concentration of organics. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 145-168. DOI: 10.1016/j.peccs.2018.10.002
- Güven, H., Ersahin, M. E., Dereli, R. K., Ozgun, H., Isik, I., & Ozturk, I. (2019b). Energy recovery potential of anaerobic digestion of excess sludge from high-rate activated sludge systems co-treating municipal wastewater and food waste. *Energy*, 172, 1027-1036. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.150
- Güven, H., Ozgun, H., Ersahin, M. E., Dereli, R. K., Sinop, I., & Ozturk, I. (2019c). High-rate activated sludge processes for municipal wastewater treatment: the effect of food waste addition and hydraulic limits of the system. *Environ Sci Pollut Res Int*, 26(2), 1770-1780. DOI: 10.1007/s11356-018-3665-8
- Iacovidou, E., Ohandja, D. G., & Voulvoulis, N. (2012). Food waste disposal units in UK households: the need for policy intervention. *Sci Total Environ*, 423, 1-7. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.01.048

- Jenicek, P., Svehla, P., Zabranska, J., & Dohanyos, M. (2004). Factors affecting nitrogen removal by nitrification/denitrification. *Water Sci Technol*, 49(5-6), 73-79.
- Kehrein, P., van Loosdrecht, M., Osseweijer, P., Garfí, M., Dewulf, J., & Posada, J. (2020). A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(4), 877-910. DOI: 10.1039/c9ew00905a
- Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., Joss, A., Horn, H., & van Loosdrecht, M. C. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences—an application survey. *Water Res*, 55, 292-303. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.032
- Lecker, B., Illi, L., Lemmer, A., & Oechsner, H. (2017). Biological hydrogen methanation - A review. *Bioresour Technol*, 245(Pt A), 1220-1228. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.08.176
- Li, A., Zhang, T., Li, X. Y. (2010). Modeling and verification of selective sludge discharge as the controlling factor for aerobic granulation. *Water Science & Technology* 62(10):2442-9. DOI: 10.2166/wst.2010.488
- Nancharaiah, Y. V., & Kiran Kumar Reddy, G. (2018). Aerobic granular sludge technology: Mechanisms of granulation and biotechnological applications. *Bioresour Technol*, 247, 1128-1143. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.131
- Nowak, O., Keil, S., & Fimml, C. (2011). Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants. *Water Science & Technology*, 64(1). DOI: 10.2166/wst.2011.625
- Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2018). A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods. *Energies*, 12(1). DOI: 10.3390/en12010060
- Ozgun, H., Dereli, R. K., Ersahin, M. E., Kinaci, C., Spanjers, H., & van Lier, J. B. (2013). A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations. *Separation and Purification Technology*, 118, 89-104. DOI: 10.1016/j.seppur.2013.06.036
- Öztürk, İ., Dereli, R., Erşahin, E. (2015). Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği ve İyi İşletim Pratikleri, İSTAÇ Yayınları.
- Pronk, M., de Kreuk, M. K., de Bruin, B., Kamminga, P., Kleerebezem, R., & van Loosdrecht, M. C. (2015). Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. *Water Res*, 84, 207-217. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.011
- Rieger, L., Jones, R. M., Dold, P. L., & Bott, C. B. (2014). Ammonia-based feedforward and feedback aeration control in activated sludge processes. *Water Environ Res*, 86(1), 63-73. DOI: 10.2175/106143013x13596524516987
- Qasim, S. (1999). *Wastewater Treatment Plants Planning, Design, and Operation*. Technomic Publishing Co. Inc.
- Sarpong, G., Gude, V. G., Magbanua, B. S., & Truax, D. D. (2020). Evaluation of energy recovery potential in wastewater treatment based on codigestion and combined heat and power schemes. *Energy Conversion and Management*, 222. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113147
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346-362. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.129
- Silva, C., & Rosa, M. J. (2015). Energy performance indicators of wastewater treatment: a field study with 17 Portuguese plants. *Water Sci Technol*, 72(4), 510-519. DOI: 10.2166/wst.2015.189
- Smith, A. L., Stadler, L. B., Love, N. G., Skerlos, S. J., & Raskin, L. (2012). Perspectives on anaerobic membrane bioreactor treatment of domestic wastewater: a critical review. *Bioresour Technol*, 122, 149-159. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.04.055

- Smith, K., Liu, S., Hu, H. Y., Dong, X., & Wen, X. (2018a). Water and energy recovery: The future of wastewater in China. *Sci Total Environ*, 637-638, 1466-1470. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.124
- Smith, K., Liu, S., Liu, Y., & Guo, S. (2018b). Can China reduce energy for water? A review of energy for urban water supply and wastewater treatment and suggestions for change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 41-58. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.051
- Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 521-532. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.029
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., Tsuchihashi, R., and Burton, F. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th Edition, Metcalf & Eddy Inc., McGraw-Hill, New York, USA.
- Tyagi, V. K., & Lo, S.-L. (2013). Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 708-728. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.029
- Vattenfall (2021) *Erneuerbare energien*. Vattenfall, Retrieved February 20, 2021 from <https://elife.vattenfall.de/zukunft/power-to-gas-erdgasnetz-als-speicher-erneuerbare-energie/>
- Wett, B., Aichinger, P., Hell, M., Andersen, M., Wellym, L., Fukuzaki, Y., . . . Murthy, S. (2020). Operational and structural A-stage improvements for high-rate carbon removal. *Water Environ Res*, 92(11), 1983-1989. DOI: 10.1002/wer.1354
- Wett, B., Buchauer, K., & Fimml, C. (2007). *Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems*. Paper presented at the IWA Leading Edge Technology Conference on Water and Wastewater Technologies.
- Yang, X., Wei, J., Ye, G., Zhao, Y., Li, Z., Qiu, G., . . . Wei, C. (2020). The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: An assessment of the energy balance. *Sci Total Environ*, 714, 136655. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136655
- Zhen, G., Pan, Y., Lu, X., Li, Y.-Y., Zhang, Z., Niu, C., . . . Xu, K. (2019). Anaerobic membrane bioreactor towards biowaste biorefinery and chemical energy harvest: Recent progress, membrane fouling and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109392
- Zhou, D., & Deng, Z. (2017). Ultra-low-head hydroelectric technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 23-30. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.086

**Doç. Dr. MUSTAFA EVREN ERŞAHİN | İstanbul Teknik Üniversitesi |  
ersahin[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0003-1607-0524**

Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin, Trakya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden bölüm ve fakülte birincisi olarak 2003 yılında mezun olmuştur. İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansını 2005 yılında tamamlamıştır. Doktora çalışmasını İstanbul Teknik Üniversitesi ve Delft University of Technology (Hollanda) arasında imzalanan ortak doktora programı kapsamında gerçekleştirmiş ve 2015 yılında her iki üniversiteden doktora diploması ve doktor ünvanı almıştır. Mustafa Evren Erşahin'in çalışmalarının bilime sağladığı en önemli katkılar; atıksu arıtımında enerji verimliliği, atıksulardan enerji ve madde geri kazanımı, dinamik membran teknolojisi, yenilikçi atıksu arıtma prosesleri, anaerobik biyoteknoloji, membran biyoreaktör teknolojisi, yenilenebilir enerji geri kazanımı ve biyolojik sistemlerin modellenmesi konuları üzerinedir. Doç. Dr. Mustafa Evren Erşahin'in 120'nin üzerinde bilimsel yayını mevcuttur. Doç. Dr. Erşahin bilime yaptığı katkılar dolayısıyla bugüne kadar dördü uluslararası olmak üzere dokuz farklı ödüle layık görülmüştür. Bu kapsamda, Hollanda Hükümeti tarafından verilen en prestijli burs olan ve her yıl oldukça sınırlı sayıda kişiye verilen Huygens Doktora Araştırma Bursunu 2011 yılında kazanmıştır. Ayrıca German Water Partnership-GWP (Alman Su Ortaklığı) tarafından verilen "GWP Award" ödülüne 2016 yılında, Waternet Watercycle Innovation Award ödülüne 2017 yılında layık görülmüştür. 2020 yılında TÜBİTAK Teşvik Ödülü'ne layık görülmüştür. Bilim Kahramanları Derneği tarafından Genç Bilim İnsanı Ödülleri kapsamında, Yılım Bilim İnsanı Ödülü'nü 2020 yılında almıştır.

**Assoc. Prof. MUSTAFA EVREN ERSAHİN | Istanbul Technical University |  
ersahin[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0003-1607-0524**

Assoc. Prof. Mustafa Evren Ersahin graduated as an environmental engineer from the Environmental Engineering Department of Trakya University in Turkey holding the first rank both in the department and faculty in 2003. He received his MSc degree from Environmental Engineering Department at Istanbul Technical University. In 2010, he has joined the Sanitary Engineering Section of the Water management Department at TU Delft as a PhD researcher. He obtained two PhD degree from both Istanbul Technical University and Delft University of Technology in 2015. He was involved in many research and development projects in the field of energy efficiency in wastewater treatment, resource recovery, dynamic membrane technology, innovative wastewater treatment processes, anaerobic biotechnology, membrane bioreactors, renewable energy recovery and biosystem modelling. Assoc. Prof. Mustafa Evren Ersahin has over 120 scientific publications. Assoc. Prof. Ersahin has been awarded nine different awards, four of which are international, for his contributions to science. He got the Huygens PhD fellowship award in 2011, which is one of the most prestigious awards given by the Dutch Government to a limited number of individuals each year. Besides, he got German Water Partnership GWP Award in 2016 and Waternet Watercycle Innovation Award in 2017. He got TÜBİTAK Incentive Award, and Scientist of the Year Award in 2020.

**Dr. Öğr. Üyesi HÜSEYİN GÜVEN | İstanbul Teknik Üniversitesi | [guvenhu\[at\]itu.edu.tr](mailto:guvenhu[at]itu.edu.tr) | ORCID: 0000-0001-6754-0106**

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Güven Doktorasını 2018 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Doktora çalışmasında, kentsel atıksular ile yemek atıklarının yüksek yüklü aktif çamur (YYAÇ) sistemlerinde birlikte arıtılabilirliğini incelemiştir. Bu kapsamda çıkış suyu kalitesi ve proseste oluşan fazla çamurdan enerji geri kazanımı potansiyeli ele alınmıştır. Deneysel çalışmaların yanı sıra, incelenen prosesin çevresel etkilerini araştırmak amacıyla yaşam döngüsü analizi (YDA) çalışması da gerçekleştirmiştir. Doktora çalışmaları esnasında, ziyaretçi doktora öğrencisi olarak sekiz ay süreyle (2017-2018) İsveç'in Gävle Üniversitesi'nde bulunmuştur. Doktora tezinde tamamı Q1 ve Q2 dergilerde olmak üzere beş adet bilimsel makale yayımlamıştır. 2019 yılında, Doktora tezinde gerçekleştirdiği çalışmalar ile Çevre Vakfı'nın "Çevre Alanında En Başarılı Doktora Tezi Ödül Yarışması" ödülünü ve Alman Su Ortaklığı'nın (German Water Partnership) GWP ödülünü kazanmıştır. Doktorasını tamamladıktan sonra ise Hollanda'nın Radboud Üniversitesi'nde altı ay süreyle doktora sonrası çalışmalar yürütmüştür. Genel çalışma konuları arasında katı atık yönetimi, atıksu arıtma teknolojileri, biyolojik prosesler, atıksu arıtma tesislerinde enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kaynakları, katı atıkların kompostlaştırılması ve YDA bulunmaktadır. 2019 yılından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır.

**Assis. Prof. HÜSEYİN GÜVEN | Istanbul Technical University | [guvenhu\[at\]itu.edu.tr](mailto:guvenhu[at]itu.edu.tr) | ORCID: 0000-0001-6754-0106**

Assis. Prof. Hüseyin Güven received a PhD degree in Environmental Engineering from Istanbul Technical University in 2018. In his PhD thesis, he investigated the performance of co-treatment of municipal wastewater and food waste by applying the high-rate activated sludge (HRAS) process from various aspects such as effluent quality and energy recovery potential from excess sludge. In addition to the experimental studies, he also carried out a life cycle assessment (LCA) study to determine the environmental impacts of the investigated system. During his PhD studies, he studied at Gävle University (Sweden) as a guest student in 2017-2018 for eight months. He published five publications from his PhD thesis and these publications are in Q1 and Q2 journals. In 2019, he got the Environmental Foundation the Most Successful Thesis Award (Turkey) from his PhD study and the German Water Partnership GWP Award (Germany). He spent six months in the Netherlands at Radboud University after his PhD graduation. His main interests are solid waste management, wastewater treatment technologies, biological processes, energy efficiency in wastewater treatment plants, renewable energy resources, composting of solid wastes and LCA. He has been working in Istanbul Technical University as an assistant professor at Environmental Engineering Department since 2019.



**Prof. Dr. İZZET ÖZTÜRK | İstanbul Teknik Üniversitesi | ozturkiz[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-8274-5326**

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) İnşaat Fakültesi'nden 1976 yılında mezun oldu. 1978 yılında İTÜ Çevre Bilimleri ve Teknolojisi Anabilim Dalı'nda asistan olarak göreve başladı. İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nden, 1979 yılında Yüksek İnşaat ve Çevre Mühendisliği ve 1982 yılında Doktora derecelerini aldı. 1982-1984 yılları arasında İngiltere Newcastle Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde doktora sonrası araştırmalarda bulundu. 1994 yılında TÜBİTAK Bilimsel Araştırma ve Teşvik ödülüne layık görüldü, ardından aynı yıl İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Profesörlük kadrosuna atandı. Su ve atıksu arıtımı, bütünleşik su havzaları yönetimi, entegre katı atık yönetimi ve iklim değişiminin su kaynaklarına etkileri alanlarında uluslararası düzeyde uzmanlığı olan Öztürk'ün, ağırlıklı olarak uluslararası olmak üzere 350'den fazla bilimsel yayını, 17 kitabı ve çok sayıda araştırma/uygulama projesi raporu bulunmaktadır, Öztürk, Türkiye Bilimler Akademisi şeref üyesi ve İTÜ Yönetim Kurulu üyesidir. Bir dönem TÜBİTAK KAMAG GYK ve TÜBİTAK Bilim Kurulu üyelikleri de yapan Öztürk, 2015-2020 döneminde İSKİ Yönetim Kurulu üyeliği görevi yapmıştır.

**Prof. Dr. İZZET ÖZTÜRK | Istanbul Technical University | ozturkiz[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-8274-5326**

He is graduated Istanbul Technical University (ITU) Civil Engineering Faculty in 1976. Afterwards, he attended ITU Environmental Sciences and Technology Division in 1978 as an Assistant. He received Environmental and Civil Engineering M.Sc. degrees in 1979, and Ph.D. degree in 1982 at ITU Environmental Engineering Department. During 1982-1984, he completed post-doctoral studies at the Newcastle University Environmental Engineering Department in UK. He achieved TR TUBİTAK's Scientific Research and Encouragement award in 1994, then he was enrolled as a Professor in ITU Environmental Engineering Department. He has international expertise in the fields of water and wastewater treatment, integrated watershed management, integrated solid waste management, effects of climate change on water resources, anaerobic digestion, and industrial pollution control. He withholds more than 350 scientific publications, 17 books, and many research/implementation project reports mainly with international reputation. Öztürk is an honorary member of the Turkish Academy of Sciences (TÜBA), a member of International Water Association (IWA), and a member of ITU Administrative Committee. Prof. Öztürk, who was a member of TÜBİTAK KAMAG (Public Research Group), and a member of Science Board of TUBİTAK for a while, was a member of İSKİ Board of Management between 2015-2020.