

# SU KİRLİLİĞİ KONTROLÜNDE BİYOLOJİK PROSESLER

(CİLT 2)

**Yazar**  
Bilal TUNÇSİPER



© Copyright 2026

*Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Kitabevi A.Ş.'ne aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kağıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçla kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.*

<b>ISBN</b> 978-625-375-832-5 (Tk) 978-625-375-969-8 (2.c)	<b>Sayfa ve Kapak Tasarımı</b> Akademisyen Dizgi Ünitesi
<b>Kitap Adı</b> Su Kirliliği Kontrolünde Biyolojik Prosesler (Cilt 2)	<b>Yayıncı Sertifika No</b> 47518
<b>Yazar</b> Bilal TUNÇSİPER ORCID iD: 0000-0002-6268-7237	<b>Baskı ve Cilt</b> Vadi Matbaacılık
<b>Yayın Koordinatörü</b> Yasin DİLMEN	<b>Bisac Code</b> SCI088000
	<b>DOI</b> 10.37609/akya.4099

**Kütüphane Kimlik Kartı**

**Tunçsiper, Bilal.**

Su Kirliliği Kontrolünde Biyolojik Prosesler (Cilt 2) / Bilal Tunçsiper.

Ankara : Akademisyen Yayınevi Kitabevi, 2026.

c. <2> (328 s.) : tablo, şekil ; 160x235 mm.

Kaynakça var.

ISBN 9786253759698

9786253758325 (Tk).

**GENEL DAĞITIM**  
**Akademisyen Kitabevi A.Ş.**

Halk Sokak 5 / A Yenışehir / Ankara

Tel: 0312 431 16 33

siparis@akademisyen.com

[www.akademisyen.com](http://www.akademisyen.com)

# ÖNSÖZ

Su kirliliği kontrolünde biyolojik prosesler isimli eserin ikinci ciltinde atıksuların anaerobik arıtımında kullanılan biyolojik prosesler ile birlikte toksik bileşiklerin ve ağır metallerin biyolojik giderimi, biyolojik azot ve fosfor giderimi prosesleri, biyoelektrokimyasal prosesler ve doğal atıksu arıtma prosesleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Eserde, temel olarak biyolojik atıksu arıtma sistemlerinde atık su arıtımının teorisi ve pratiği verilmiştir. Eserin pratik ve öğretici yönünü güçlendirmek için ayrıca bazı bölümlere ve sonlarına tasarım örnekleri eklenmiştir.

Bu eserin akademik kurumlarda ders kitabı olarak kullanılmasının yanı sıra, çevre mühendisleri, çevre bilimcileri, biyologlar, kimyagerler ve çevre ajanslarında çalışan profesyoneller için önemli bir referans olabileceği düşünölmektedir.

*Prof. Dr. Bilal TUNÇSİPER*  
*Şubat 2026*

# İÇİNDEKİLER

## BÖLÜM 1

<b>1.1. ANAEROBİK (OKSİJENSİZ) BİYOLOJİK ATIKSU ARITIMI .....</b>	<b>1</b>
1.1.1. Anaerobik Arıtımın Biyokimyası ve Mikrobiyolojisi.....	5
1.1.2. Anaerobik Arıtım Üzerine Etkili Hidrolik ve Çevresel Koşullar.....	13
1.1.3. Metan Ve Diğer Gazların Üretimini Tahmini.....	16
<b>1.2. ANAEROBİK ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİ .....</b>	<b>19</b>
1.2.1. Klasik Anaerobik Çamur Çürütücü .....	22
1.2.2. Anaerobik Temas Reaktörü (ATR).....	23
1.2.3. Anaerobik Filtre Reaktörü (AFR).....	24
1.2.4. Anaerobik Akışkan (Genleşmiş) Yataklı Reaktör (AAYR, AGYR).....	25
1.2.5. Anaerobik Çamur Yataklı Reaktör (AÇYR) .....	26
1.2.6. Anaerobik Ardışık Kesikli Reaktör (AAKR) .....	32
1.2.7. Anaerobik Hareketli Yataklı Reaktör (AHYR) .....	37
1.2.8. Anaerobik bölmeli reaktör (ABR) .....	34
1.2.9. Hibrid Yukarı AÇYR-AFR .....	36
1.2.10. Anaerobik Membran Biyoreaktörler .....	36
<b>1.3. ANAEROBİK ATIKSU ARITMA PROSESLERİNİN TASARIMI .....</b>	<b>38</b>
1.3.1. Geri Devirli Anaerobik Reaktörler .....	39
1.3.2. Geri Devirsiz Anaerobik Reaktörler .....	45
Örnek Problemler .....	48
Kaynaklar .....	63

## BÖLÜM 2

<b>2.1. TOKSİK VE KOLAY AYRIŞAMAYAN ORGANİK BİLEŞİKLERİN VE AĞIR METALLERİN BİYOLOJİK GİDERİMİ .....</b>	<b>65</b>
Kaynaklar .....	72

## BÖLÜM 3

<b>3.1. BİYOLOJİK AZOT GİDERİMİ .....</b>	<b>73</b>
<b>3.2. NİTRİFİKASYON PROSESİ .....</b>	<b>74</b>
<b>3.3. DENİTRİFİKASYON PROSESİ .....</b>	<b>91</b>
<b>3.4. BİYOLOJİK AZOT GİDERİM SİSTEMLERİ.....</b>	<b>98</b>
3.4.1. Kesikli Biyolojik Takviye (Bio-augmentation Batch Enhanced:BABE) reaktörü.....	100

3.4.2. Kademeli Beslemeli Proses .....	101
3.4.3. Oksidasyon Hendeği .....	102
3.4.4. Ardışık Kesikli Reaktör (AKR).....	103
3.4.5. Modifiye Ludzack-Ettinger Prosesi.....	103
3.4.6. Orbal Prosesi .....	104
3.4.7. Bardenpho Prosesi (Dört Kademeli) .....	105
3.4.8. Harici Karbon Kaynaklı Çift Çamur Prosesi.....	106
3.4.9. Biyodenitro Prosesi .....	107
3.4.10. Azot Gideriminde Yeni Teknolojiler.....	109
3.4.10.1. ANAMMOX (anaerobik amonyak oksidasyonu) prosesi.....	109
3.4.10.2. SHARON prosesi.....	114
3.4.10.3. CANON prosesi.....	116
3.4.10.4. DEAMOX prosesi.....	118
Örnek Problemler .....	120
Kaynaklar.....	137

## **BÖLÜM 4**

<b>4.1. BİYOLOJİK FOSFOR GİDERİMİ .....</b>	<b>141</b>
<b>4.2. BİYOLOJİK FOSFOR GİDERİM SİSTEMLERİ.....</b>	<b>144</b>
4.2.1. PhoStrip Prosesi .....	146
4.2.2. Phoredoks (A/O: Anaerobik/Oksik) Prosesi .....	146
4.2.3. A2/O (Anaerobik/Anoksik/Oksik) Prosesi.....	147
4.2.4. Standart UCT Prosesi.....	148
4.2.5. Modifiye UCT Prosesi .....	149
4.2.6. Modifiye Bardenpho Prosesi (Beş Karbonlu) .....	150
4.2.7. Modifiye Biyolojik Ardışık Kesikli Reaktör (Modifiye Biyolojik AKR) ....	150
4.2.8. VIP Prosesi .....	151
Kaynaklar.....	153

## **BÖLÜM 5**

<b>5.1. BİYOELEKTROKİMYASAL SİSTEMLER</b>	
<b>(BİOELECTROCHEMICAL SYSTEMS: BES).....</b>	<b>155</b>
5.1.1. Mikrobiyal Elektroliz Hücresi (MEC).....	155
5.1.2. Mikrobiyal Yakıt Hücreleri (Microbial Fuel Cells: MFC).....	157
5.1.3. Enzimatik Biyoyakıt Hücreleri (Enzymatic Biofuel Cells: EFC) .....	161
Kaynaklar.....	162

**BÖLÜM 6**

<b>6.1. DOĞAL ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİ.....</b>	<b>163</b>
6.1.1. Yağ ve Kum Tutucu .....	164
6.1.2. Septik Tank.....	165
6.1.3. Imhoff Tankı.....	169
6.1.4. Kesikli Beslemeli Kum Filtresi .....	173
6.1.5. Toprak Yığınından (Mound) Sızdırma Sistemi .....	175
6.1.6. Yüzealtı-Toprak Absorpsiyonu.....	176
6.1.7. Yapay Sulakalan Sistemleri .....	178
6.1.8. Stabilizasyon Havuzları .....	207
6.1.9. Atıksuların Arazide Arıtılması Yöntemi .....	218
6.1.9.1. Düşük hızlı infiltrasyon .....	220
6.1.9.2. Hızlı infiltrasyon /toprak akifer arıtma sistemi.....	224
6.1.9.3. Arazi üzerinden akıtma sistemi.....	233
6.1.9.4. Arazide arıtma sistemlerinde kirleticiler ve giderim mekanizmaları.....	241
6.1.10. Yeşil Islah (Fitoremediasyon) .....	261
6.1.11. Klasik ve Doğal Atıksu Arıtma Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	265
<b>6.2. ATIKLARIN KOMPOSTLAŞTIRMA YÖNTEMİYLE AEROBİK STABİLİZASYONU .....</b>	<b>268</b>
6.2.1. Kompost Yığınındaki Canlı Organizmalar ve Fonksiyonları .....	268
6.2.2. Kompostlaştırma Prosesi .....	272
6.2.3. Kompostlaştırma Sürecini Etkileyen Faktörler .....	275
6.2.4. Oksijen Ve Havalandırma.....	276
6.2.5. Kompostlaştırma Yöntemleri.....	282
6.2.5.1. Açık ya da pasif yığınlarda doğal havalandırmalı kompostlaştırma .....	282
6.2.5.2. Karıştırmalı yığınlarda kompostlaştırma .....	284
6.2.5.3. Açık (ya da pasif) yığınlarda borularla pasif havalandırmalı kompostlaştırma .....	286
6.2.5.4. Açık (ya da pasif) yığınlarda basınçlı havalandırmalı kompostlaştırma.....	287
6.2.5.5. Reaktör tipi sistemlerde kompostlaştırma .....	290
6.2.5.6. Vermikültür (ya da yer solucanı) teknolojisi.....	293
Örnek Problemler .....	299
Kaynaklar .....	316

# BÖLÜM 1

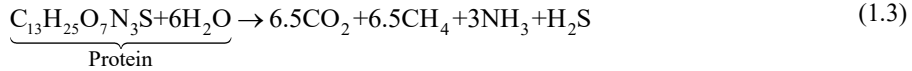
## ANAEROBİK (OKSİJENSİZ) ATIKSU ARITIMI

---

---

### 1.1. ANAEROBİK (OKSİJENSİZ) BİYOLOJİK ATIKSU ARITIMI

Anaerobik biyolojik arıtım, atıksu ve çamurun içerisindeki organik maddelerin çözünmüş oksijen yokluğunda biyolojik olarak arıtılması sürecidir. Anaerobik çürütme süreçleri, organik maddenin mevcut olduğu ve redoks potansiyelinin düşük olduğu (sıfır oksijen) ortamlarda gerçekleşir. Birçok anaerobik bakteri grubu etkileşimli olarak hem çözünür hem de partikül halindeki ayrıştırılabilir organik maddeleri oksijen yokluğunda yeni bakteri hücreleri (biyokütle)'nin yanısıra metan (CH<sub>4</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen (H<sub>2</sub>), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), su ve amonyak (NH<sub>3</sub>) gibi nihai uç ürünlere dönüştürürler (Denklem 1.1-1.3);



Anaerobik prosesler evsel atıksu arıtmanın en eski yöntemlerinden biridir. Anaerobik lagün, septik tank, imhoff tankı ve çamur çürütme prosesleri anaerobik arıtma proseslerinin ilk örnekleridir. Son yıllarda, anaerobik arıtma teknolojilerindeki gelişmeler, anaerobik proseslerin çekiciliğini ve avantajlarını büyük ölçüde artırmıştır.

Genellikle daha düşük konsantrasyonlu biyolojik ayrışabilir KOİ'li şehirsal atıksular, daha düşük sıcaklıklar, daha yüksek çıkış kalitesi ve nütrient giderim talepleri için aerobik prosesler günümüzde daha favori olmasına karşın çok yüksek konsantrasyonlu biyolojik ayrışabilir KOİ'li endüstriyel atıksular ve yüksek sıcaklıklar için ise anaerobik prosesler daha ekonomiktir.

## Kaynaklar

- Andrews, J.F. (1969). Dynamic model of the anaerobic digestion model. *J. Sanit. Engng. Div. Proc. Am. Soc. Civ.*
- Angenent, L.T., Sung, S., Raskin, L. (2002). Development of Anaerobic Migrating Blanket Reactor (AMBR). A Novel Anaerobic Treatment System. *Water Research* 35 (7), pp 1739-1747
- Arceivala, S.J. 1998. Wastewater treatment for pollution control, McGraw Hill Book Company.
- Annachatre, A.P. (1996). Anaerobic Treatment of Industrial Wastewaters, Resources, Conveversation, and Recycling 16 (1-4), pp 161-166.
- Banik, G.C., Dague, R.R. (1996). ASBR Treatment of Dilute for Pollution Control, 2 nd ed., Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S.G., Rossi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H., Vavilin, V.A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1); Scientific and Technical Report 13, IWA Publishing, London.
- Bekker M. (2007). Charakterisierung der Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Hahn, H.H. (Ed), Karlsruhe.
- Choo, K.H., Lee, C.H. (1998). Hydrodynamic behavior of anaerobic biosolids during crossflow filtration in the membrane anaerobic bioreactor. *Water Research* 32 (11), pp 3387-3397.
- Collins, A.G., Theis, T.L., Kilambi, S., He, L., Pavlosiathis, S. G. (1998). Anaerobic Treatment of Low-Strength Domestic Wastewater Using an Anaerobic Expanded Bed Reactor, *J. Environ. Eng.* 124 (7), pp 652-655.
- Echiegu, E.A. (2015). Kinetic Models for Anaerobic Fermentation Processes, *American Journal of Biochemistry and Biotechnology* 11(3), 132-148.
- Han, Y., Dague, R.R. (1997). Laboratory Studies on the Temperature-Phased Anaerobic Digestion of Domestic Primary Sludge, *Water Environ. Res.* 69 (6), pp 139-1143.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M.C., Marais, G.v.R. (2008) Activated Sludge Model No. 2., IAWQ Scientific and Technical Report No. 3, IAWQ, London.
- Hill, D.T., C.L. Barth, (1977). A dynamic model for simulation of animal waste digestion, *Water* 49(10), 2129-2143.
- <https://www.biogas-projects.com/aboutus.html>. Qingdao JCWY Environmental Protection Technology Co., Ltd.
- Lettinga, G., Hulshoff Pol, L.W. (1991). UASB-Process Designs for Various Types of Wastewaters, *Water Sci. Technol.* 24 (8), pp 87-107.
- Lettinga, G., Hulshoff, Pol, L.W., Zeeman, G. (1996). Biological Wastewater Treatment. Part I: Anaerobic Wastewater Treatment. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, Netherland.
- Malina, J.F., Pohland, F.G. (1992). Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes, *Water Quality Management Library*, Vol. 7, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mata-Alvarez, J. (2003). Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes.

- Metcalf ve Eddy, 1991. Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse, 3rd Edition, McGraw-Hill, Companies, Inc., New York.
- Metcalf ve Eddy, 2003. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, Forth Edition, McGraw Hill Companies, Inc., New York.
- Mosey, F.E. (1983). Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process: Regulatory Mechanisms for the Formation of Short-Chain Volatile Acids from Glucose, Water Sci. Technol. 15, 209-232.
- Murphy J., Polaficio M. (2007). Anaerobic Digestion: Decision Support Software. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering. Ireland.
- Öztürk, İ. (1999). Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları, İ.T.Ü.Yayınevi, , İstanbul.
- Ozturk, İ. (2007). Anaerobik Arıtma ve Uygulamaları, Su Vakfı Yayınları, Genişletilmiş 2.Baskı, ISBN: 978- 975-6455-30-2, İstanbul, Türkiye.
- Parkin, G. F. and Owen, W.F. (1986). "Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges." Journal of Environmental Engineering, 24 (8): 867-920.
- Qasim, S.R., Zhu, G. (2018). Wastewater Treatment and Reuse, Theory and Design Examples, Taylor & Francis Group, FL, USA.
- Rittmann, B.E., McCarty, P. L. (2001). Environmental Biotechnology: Principles and Applications. McGraw-Hill International Editions, Biological Sciences Series, ISBN: 0072345535, NY, USA.
- Sasse, L. (1998). DEWATS, Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries, Bremen Overseas Research and Development Association.
- Speece, R.E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters, Archae Press, Nashville, TN.
- Sung, S., Dague, R.R. (1995). Laboratory studies on the anaerobic sequencing batch reactor. Water Environment Research 67(3), pp 294–301.
- Srinivas, T. (2008). Environmental Biotechnology, New Age International Limited Publishers, New Delhi, India.
- Wang, L.H., Tay, J.H., Tay, S.T.L, Hung, Y.T. (2010). Handbook of Environmental Engineering, Volume 11: Environmental Bioengineering, Humana Press, DOI: 10.1007/978-1-60327-031-1, USA.

## BÖLÜM 2

### TOKSİK, ZOR AYRIŞABİLİR BİLEŞİKLER VE AĞIR METALLERİN BİYOLOJİK GİDERİMİ

---

---

#### 2.1. TOKSİK VE KOLAY AYRIŞAMAYAN ORGANİK BİLEŞİKLERİN VE AĞIR METALLERİN BİYOLOJİK GİDERİMİ

Evsel ve bazı endüstriyel atıksulardaki organik bileşiklerin çoğu doğal kaynaklıdır ve aerobik ya da anaerobik proseslerde yaygın bulunan bakterilerle ayrıştırılabilir. Bununla birlikte endüstriyel kaynaklı bazı atıksularda sentetik organik kimyasallar ya da biyolojik yaşama yabancı bileşikler bileşikler (xenobiotic compounds) de mevcuttur (Schwarzenbach vd., 1993). Ne yazıkki bu organik bileşiklerin bir kısmı atıksu arıtımında emsalsiz problemler yaratırlar ve çevre ve insan sağlığına zehirleyici etkileri vardır. Klasik biyolojik arıtma prosesleriyle arıtımı güç olan organik bileşikler kolay çözünemez (refractory) olarak isimlendirilirler. Ayrıca petrol ürünlerinde bulunanlara benzer doğal yollarla mevcut olan ve benzer problemler yaratabilen maddeler vardır. Farklı atıksu tiplerinde bulunan petrol bileşikleri ve sentetik organik bileşiklerine örnekler Tablo 2.1’de sunulmuştur (Metcalf ve Eddy, 2003).

1970’li yılların başından beri toksik ve inatçı (güç ayrışabilen) bileşiklerle ilgili bilgi spesifik endüstriyel atıksulardaki (örneğin petrokimyasal, tekstil, kağıt hamuru ve kağıt ve eczacılığa bağlı endüstriler) çalışmalara bağlı olarak giderek artmıştır. Ayrıca 1980’lerden beri tehlikeli atık depo sahalarında bulunan organik bileşiklerin biyolojik ayrışması üzerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

Birkaç istisna hariç, çoğu organik bileşikler sonunda biyolojik olarak ayrıştırılabilir fakat bazı durumlarda hızlar yavaş olabilir, eşsiz çevre şartları (örneğin, redoks potansiyeli, pH, sıcaklık) gerekli olabilir, prokaryotların yerine mantarlar gerekli olabilir ya da zor ayrışabilir bileşikleri ayrıştırabilen spesifik bakterilere gerek duyulabilir. Örneğin, PCB (Poliklorlu bifenil)’lerin uzun yıllar boyunca biriktirildiği Hudson Nehrindeki sedimentten elde edilen spesifik anaerobik bakteri kültürüyle poliklorlu bifeniller ayrıştırılmıştır, fakat şehrsel atıksu arıtma tesisi çamurunu arıtmak için kullanılan bir laboratuvar anaerobik çürütücüde 15 yıllık bir süreden sonra elde edilen bakteri kültürü ile PCB’ler tam olarak giderilememiştir (Ballapragada vd., 1998).

## Kaynaklar

---

---

- Ballapragada, B., Stensel, H.D., Ferguson, J.F., Magar, V.S., Puhakka, J.A. (1998). Toxic chlorinated compounds: fate and biodegradation in anaerobic digestion. Prepared for WERF, Project No. 91-TFT-3.
- Dobbs, R.A., Wang, L., Govind, R. (1989). Sorption of Toxic Organic Compounds on Wastewater Solids: Correlation with Fundamental Properties. *Environ. Sci. Technol.* 23 (9), pp 1092-1097.
- Kunz, B., Gianneli, J., Stensel, H.D. (1976). Vanadium Removal From Industrial Wastewater, *WPCF.* 48 (4), p 76.
- Melcer, H., Steel, P., Beli, J.P., Thompson, D.I., Yendt, C.M., Kemp, J. (1994). Monitoring and Modeling VOCs in Wastewater Facilities. *Environ. Sci. Technol.* 28 (7), pp 328A-335A.
- Metcalf ve Eddy, 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, Forth Edition, McGraw Hill Companies, Inc., New York.
- Mullen, M.O., Wolf, D.C., Ferris, F.G., Beveridge, T.J., Flemming, C.A., Bailey, G.W. (1989). Bacterial Sorption of Heavy Metals, *Appl. Environ. Microbiol.*, 55 (12), pp 3143-3149.
- Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M., Imboden, D.M. (1993). *Environmental Organic Chemistry*, Second Ed., John Wiley & Sons, New York.
- Stensel, H.D., Bielefeldt, A.R. (1997). Anaerobic and aerobic degradation of chlorinated aliphatic compounds. In: *Bioremediation of Hazardous Wastes: Principles and Practices* (Vol. 2). Kluwer Publishers, San Diego.
- Strand S.E., Harem G.N., Stensel H.D. (1999). Activated-sludge yield reduction using chemical uncouplers. *Water Environ. Res.* 71(4), pp 454-458.

## BÖLÜM 3

### BİYOLOJİK AZOT GİDERİMİ, NİTRİFİKASYON/ DENİTRİFİKASYON PROSESLERİ

---

---

#### 3.1. BİYOLOJİK AZOT GİDERİMİ

Azotlu bileşikler alıcı sularda organik ya da amonyum ( $\text{NH}_4^+$ ), amonyak ( $\text{NH}_3$ ), nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) ve nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) gibi inorganik formda bulunurlar. Bu kirleticiler alıcı sularda, çözülmüş oksijen konsantrasyonunu düşürerek ötrifikasyona sebep olurlar. Bu kirleticiler çevre ve insan sağlığına da zararlı etkiler yaratabilirler. Örneğin, yüksek konsantrasyonlardaki amonyak ve nitrit iyonları bakterilerde ve bitkilerde toksik etki yaratırlar ve ayrıca yüksek miktarda nitrat içerikli sular ise bebeklerde mavi bebek hastalığı (methemoglobinemia) probleminde sebep olabilirler.

Alıcı suların kalitesini korumak ve atıksuyun faydalı bir şekilde yeniden kullanımını sağlamak için bu bileşiklerin atıksudan mutlaka giderilmesi gerekir. Atıksulardaki azotlu bileşikler fiziksel, kimyasal ya da biyolojik yöntemlerle giderilebilmektedir. Kimyasal yöntemlerle kıyaslandığında biyolojik yöntemlerin daha az çamurla birlikte çevreye zararlı olmayan bileşikleri üretmesi yanında ekonomik olmaları büyük avantaj sağlamaktadır.

Biyolojik azot giderimli aktif çamur sistemlerinde inorganik azot bileşikleri genel olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon gibi iki aşamalı bir süreçle giderilmektedir. Atıksulardaki düşük çözünür partiküler organik azot bileşikleri hidroliz (hydrolysis) ile önce yüksek çözünür formlara çevrilirler. Çözülmüş formlardaki bu organik bileşikler heterotrofik bakterilerle önce amonyaklaşma (ammonification) süreciyle amonyaka çevrilir ve oluşan amonyak ise daha sonraki birbirini takip eden nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçleriyle azot gazı ( $\text{N}_2$ )'na çevrilerek giderilir (Şekil 3.1).

Bununla birlikte bilhassa filtre dolgu maddeleri ya da toprak ile birlikte bitkileri de içeren biyolojik doğal arıtma sistemlerinde atmosferde bulunan atmosferik azot gazı ise, mikroorganizmalar tarafından hücrenin büyümesi, enzim üretimi ve genetik bilgi için protein olarak hücre materyaline sabitlenebilir. Bakterilerin iç solunum fazında ölümü

## Kaynaklar

- Barker, P.S., Dold, P.L. (1997). General Model for Biological Nutrient Removal in Activated Sludge Systems: Model Presentation. *Water Environ. Res.* 69, pp 5969-5984.
- Barnard, J.L. (1973). Biological Denitrification. *Journal of Water Pollution Control* 72(6), pp 705-720.
- Barnard, J.L. (1974). Cut N and P Without Chemicals. *Water and Wastes Engineering Part I and Part II*.
- Bitton, G. (2002). *Encyclopedia of Environmental Microbiology*. Volume 1-6. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Bitton, G. (2011). *Wastewater Microbiology*. Fourth Edition. Wiley-Blackwell, A John Wiley & Sons, Inc., Publication. Department of Environmental Engineering Sciences University of Florida, Gainesville, FL
- Blum, D.J.W., Speece, R. E. (1991). A Database of Chemical Toxicity to Environmental Bacteria and Its Use in Interspecies Comparisons and Correlations. *Res.J.WPCF.* 63 (3), pp 198-207.
- Boehnke, B., Diering, B., Zuckut, S.W. (1997). AB Process Removes Organics and Nutrients, *Water Envi. Technol.*9 (3), pp 23-27.
- Bock, E., Schmidt, I., Stuvén, R., Zart, D. (1995). Nitrogen Loss Caused by Denitrifying Nitrosomonas Cells Using Ammonium or Hydrogen as Electron Donors and Nitrite as Electron Acceptor. *Archive Microbiology* 163 (1), pp 16-20.
- Chen, G., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2020). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. Second Edition. IWAS Publishing, UK.
- Dawson, R.N., Murphy, K.L. (1972). The Temperature Dependency of Biological Denitrification. *Water Res.*6 (1).
- Doğan, E.C., Kırılı, L. (2008). Anammox (Anaerobik Amonyum Oksidasyon) Prosesi, *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 4.2, 153-168.
- Droste, R., Gehr, R. (2019). *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Gut, L. (2006) Assessment of a Partial Nitrification/Anammox System for Nitrogen Removal. Licentiate Thesis, Silesian University of Technology, KTH, Sweden, ISBN: 91 7178-167-6.
- Güven, D. (2003). ANAMMOX Prosesinin Farklı Karbon Kaynaklarına Tepkisinin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Hellinga, C., Schellen, A.A.J.C., Mulder, J.W., Van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen J.J. (1998). The SHARON process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich wastewater. *Wat. Sci. Tech.* 37(9), 135-142.
- Huynh, T.V., Nguyen, P.D., Phana, N., Luonga, D.A., Van Truong, T.T., An Huynh, K., Furukawa, K. (2019). Application of CANON process for nitrogen removal from anaerobically pretreated husbandry wastewater, *International Biodeterioration & Biodegradation* 136 (2019), 15–23).
- Jetten, M.S.M., Strous, M., van de Pas-Schoonen, K.T., Schalk, J., van Dongen, U.G.J.M., van de Graaf, A.A., Logemann, S., Muyzer, G., van Loosdrecht,

- M.C.M., Kueoen, J.G. (1999). The Anaerobic Oxidation of Amonium," FEMS Microbiol. Rev.22 (5), pp 421-437.
- Jin, R.C., Yang, G.F., Ma, C., Yu, J.J., Zhang, Q.Q., Xing, B.S. (2012). Influence of effluent recirculation on the performance of Anammox process. Chem. Eng. J. 200–202, 176–185.
- Kalyuzhnyi, S., Gladchenko, M., Mulder, A., Versprille, B.(2006). DEAMOX-New biological nitrogen removal process based on anaerobic ammonia oxidation coupled to sulphide -driven conversion of nitrate into nitrite. Water Res.40, 3637-3645.
- Khin, T., Annachatre, A.P. (2004). Novel Microbial Nitrogen Removal Processes, Biotechnology Advances 22, 519-532.
- Lackner, S., Gilbert, E.M., Vlaeminck, S.E., Joss, A., Horn, H., van Loosdrecht, M.C.M. (2014). Full-scale partial nitrification/anammox experiences—an application survey. Wat. Res. 55, 292-303.
- Li, Z. (2018). Application and Characterization of Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) Process to Treat Sidestream and Mainstream Wastewaters: Lab-scale and Full-scale Studies. Doctor of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences, Columbia University. ABD.)
- Littleton, H.X., Daigger, G.T., Strom, P.F. Cowan, R.A. (2003). Simultaneous Biological Nutrient Removal: Evaluation of Autotrophic Denitrification, Heterotrophic Nitrification, and Biological Phosphorus Removal, Water Environ. Res. 75 (2), pp 138-150.
- Metcalf ve Eddy. (2003). Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, Forth Edition, McGraw Hill Companies, Inc., New York.
- Metcalf ve Eddy. (2014). Wastewater Engineering, Treatment and Resource Recovery, Fifth Edition, McGraw Hill Companies, Inc., New York.
- Mulder, A., van der Graaf, A.A., Robertson, L.A., Kuenen, J.G. (1995). Anaerobic Ammonium Oxidation Discovered in a Denitrifying Fluidized Bed Reactor. FEMS Microbiology and Ecology 16 (3), 177-184.
- Nelson, L.M., Knowles, R. (1978). Effect of Oxygen and Nitrate on Nitrogen Fixation and Denitrification by *Azospirillum brasilense* Grown in Continuous Culture, Canada J. Microbiol. 24 (11).
- Payne, W.J. (1981). Denitrification. Wilay, New York.
- Randall, C.W., Barnard, J.L., Stensel, H.D. ( 1992). Design and Reetrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal, Volume 5, Water Quality Management Library, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA.
- Riffat, R. (2013). Fundamentals of Wastewater Treatment And Engineering. IWA Publishing, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York.
- Rittmann, B.E., Langeland, W.E. (1985). Simultaneous Denitrification with Nitrification in Single-Channel Oxidation Ditches, J.WPCF.57 (4), pp 300-308.
- Schmidt, I., Slikers,O., Schmid, M., Bock, E., Fuerst, J., Kuenen, J.G., Mike, Jetten, M.S.M., Strous, M. (2003). New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. FEMS Microbiol. Rev. 27, 481- 492.
- Stensel H.D, Coleman, T.E. (2000). Technology Assessments: Nitrogen Removal Using Oxidation Ditches. Project 96-CTS-I. Water Environment Research Foundation. Alexandria, VA: WERF and IWA Publishing.

- Skerman, V.B.D., MacRae, I.C. (1957). The Influence of Oxygen Availability on the Degree of Nitrate Reduction by *Pseudomonas denitrifications*. *Can. J. Microbio.* 3 (3), pp 505-530.
- Skinner, F.A., Walker, N. (1961). Growth of *Nitrosomonas europaea* in Batch and Continuous Culture. *Archives Microbiology* 38 (4).
- Strous, M., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M. (1999). Key Physiology of Anaerobic Ammonium Oxidation, *Appl. Environ. Microbiol.* 65 (7), pp 3248-3250.
- Strous, M., Yan Gerven, E., Zheng, P., Gijs Kuenen, J., Jetten, M.S.M. (1997). Ammonium Removal from Concentrated Waste Streams With the Anaerobic Ammonium Oxidation (Anammox) Process in Different Reactor Configurations, *Water Res.* 31 (8), pp 1955-1962.
- Terai, H., Mori, T. (1975). Studies on Phosphorylation Coupled with Denitrification and Aerobic Respiration in *Pseudomonas denitrifications*. *Btany Magazine* 38 (3), pp 231-244.
- Teske, A., Alm, E., Regan, J.M., Toze, S., Rittmann, B.E., Ssathl, D.A. (1994). Evolutionary Relationships Among Ammonia and Nitrite-Oxidizing Bacteria. *J. Bacteriol.* 176 (21), pp 6632-6630.
- U.S. EPA. (1993). Nitrogen Control Manual. EPA/625/R-93/0.10, Office of Research and Development. Cincinnati, OH.
- van der Star, W.R.L., Abma, W.R., Blommers, D., Mulder, J.W., Tokutomi, T., Strous, M., Picioreanu, C., van Loosdrecht, M.C.M. (2007). Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full scale anammox reactor in Rotterdam. *Water Research* 41, 4149-4163.
- van Haandel, A.C., van der Lubbe, J.G.M. (2012). *Handbook Biological Wastewater Treatment, Design and Optimisation of Activated Sludge Systems*, Second Ed., IWA Publishing, London, UK.
- van Niftrik, L.A., Fuerst, J.A., Sinninghe Damsté, J.S., Kuenen, J.G., Jetten, M.S.M., Strous, M. (2004). The Anammoxosome: an Intracytoplasmic Compartment in Anammox Bacteria, *FEMS Microbiology Letters* 233 (1), 7-13.
- Wagner, M., Rath, G., Amann, R., Koops, H.P., Schleifer, K.H. (1995). In Situ Identification of Ammonia-Oxidizing Bacteria. *Syst. Appl. Microbio.* 18(2), pp 251-264.
- WERF. (2010). Case Study Flyer: Sustainable Treatment: Best Practices from the Strass in Zillertal Wastewater Treatment Plant, Water Environment Research Foundation, Alexandria, VA.

## BÖLÜM 4

### BİYOLOJİK FOSFOR GİDERİMİ

---

---

#### 4.1. BİYOLOJİK FOSFOR GİDERİMİ

Biyolojik yollarla fosforun giderilmesidir. Çoğu temiz sularda fosfor sınırlı bir nütrient olduğundan ötrofikasyonu kontrol etmek için fosfor giderimi yapılır. Arıtma tesisi fosfor deşarj limitleri tesisin yerine ve alıcı sulara olan potansiyel etkisene bağlı olarak 0.10-0.20 mg/L arasında değişir.

Alüm ya da demir kullanılarak yapılan kimyasal arıtma fosfor gideriminde en yaygın kullanılan teknolojiler olmasına karşın, 1980'li yılların başından bu yana tam ölçekli tesislerdeki başarılarla birlikte atıksulardaki fosfor giderim tercihleri daha ziyade ileri kademe biyolojik fosfor giderim teknolojilerinin kullanımına yönelik olmuştur. Biyolojik fosfor gideriminin temel avantajları; kimyasal çökelmeye karşı kimyasal kullanım masrafların azaltılması ve daha az çamur üretimidir.

**Mikrobiyoloji:** Fosfor, adenzin trifosfat (ATP) ve polifosfatlarla hücrel enerji transfer mekanizmalarında önemlidir. Enerji, yükseltgenme-indirgenme reaksiyonlarında üretilirken, adenzin difosfat (ADP) fosfat bağlarında alınan 7.4 kkal/mol'lük enerjiyle ATP'ye çevrilir. Hücreler enerji kullanırken ATP'den bir fosfat salınımıyla ATP sonuçta ADP'ye çevrilir. Aktif çamur arıtma sistemlerindeki en yaygın bulunan heterotrofik bakterilerdeki tipik fosfor miktarı % 1-2'dir.

Bununla birlikte birçok bakteri fosforu enerji zengin polifosfat formunda hücrelerinde depolayabildiklerinden hücrenin kuru ağırlık olarak içerdiği fosfor miktarları % 20-30 gibi yüksek olabilir. Polifosfatlar  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  ve  $K^+$  kanyonlarıyla birlikte hücre içerisindeki volutin granülleri (fosfat deposu olarak işlev gören polimetafosfat içerikli bazofilik cisimler) içinde bulunur.

## Kaynaklar

---

- Barker, P.S., Dold, P.L. (1997). General Model for Biological Nutrient Removal in Activated Sludge Systems: Model Presentation. *Water Environ. Res.* 69, pp 5969-5984.
- Barnard, J.L. (1984). Activated Primary for Phosphate Removal, *Water S.A.*10 (3), pp 121-126.
- Barnard, J.L. (1974). Cut N and P Without Chemicals. *Water and Wastes Engineering Part I and Part II.*
- Levin, G.V., Topol, G.J., Tarnay, A.G. (1975). Operation of Full Scale Biological Phosphorus Removal Plant, *J. WPCF.* 47 (3), pp 577-590.
- Mamais, D., Jenkins, D., Pitt, P. (1993). A Rapid Physical-Chemical Method for the Determination of Readily Biodegradable Soluble COD in Municipal Wastewater, *Water Res.* 27 (1). Pp 195-197.
- Metcalf ve Eddy, 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, Forth Edition, McGraw Hill Companies, Inc., New York.
- Sedlak, R.I. 1991. *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater: principles and practice.* Second Edt., The Soap and Detergent Association, New York.
- von Sperling, C., de Lemus Chernicharo, C.A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*, IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK.
- WEF (Water Environment Federation). (1998). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, vol. 2, WEF Manual of Practice No. 8, ASCE Manual and Report on Engineering Practice No 76, Water Environment Federation, Alexandria, VA.
- Wentzel, M.C., Dold, P.L., Ekama, G.A., Marais, G.v.R. (1990). Enhanced Polyphosphate Organism Cultures in Activated Sludge Systems, Part III, Kinetic Model, *Water Sci.* 15 (2), pp 89-102.

## BÖLÜM 5

### BİYOELEKTROKİMYASAL SİSTEMLER

---

---

#### 5.1. BİYOELEKTROKİMYASAL SİSTEMLER (BİOELECTROCHEMICAL SYSTEMS: BES)

Biyoelektrokimyasal sistemleri (BES) atık su arıtımı, geri kazanım, hidrojen, metan ve enerji üretimine dayalı ekonomik, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir teknolojilerdir. Biyoelektrokimyasal sistemler temel olarak; (1) Mikrobiyal Elektroliz Hücresi (Microbial Electrolysis Cell: MEC) ve (2) Mikrobiyal Yakıt Hücresi (Microbial Fuel cell: MFC) olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

1. **MEC:** Mikrobiyal Elektroliz Hücresi (Microbial Electrolysis Cell).
2. **MFC:** Mikrobiyal Yakıt Hücresi (Microbial Fuel Cell).
3. **EFC:** Enzimatik Biyoyakıt Hücresi (Enzymatic Biofuel Cell).

##### 5.1.1. Mikrobiyal Elektroliz Hücresi (MEC)

MEC reaktörleri bilhassa hidrojen ya da metan üretimi ve aynı zamanda atık organik maddeleri enerji kaynağına dönüştürmek için de kullanılabilen teknolojilerdir. Ekzoelektrojenik mikroorganizmalar organik maddeyi oksitlemek ve hidrojen, karbondioksit ve elektron üretmek için kullanılır.

Reaktör membransız tek oda ya da membranlı iki oda şeklinde tasarlanmaktadır. Membransız tek odalı reaktör daha ekonomik ve basit olması yanında büyük hidrojen ve enerji verimliliği de sağlar. İki odalı reaktörde kullanılan membran biyogazdaki kontaminasyon miktarının azaltılmasında rol oynamaktadır. Hidrojen üretiminde elektrohijenez yoluyla sürekli olarak hidrojen üretmek için 2-14 V arasında bir enerjiye ihtiyaç duyulur.

## Kaynaklar

---

- Abdellaoui, S., Hickey, D.P., Stephens, A.R., Minteer, S.D. (2015). Recombinant oxalate decarboxylase: enhancement of a hybrid catalytic cascade for the complete electro-oxidation of glycerol, *Chem. Commun. (Camb)* 51(76), pp 14330-14333.
- Cao, L. (2005). Immobilised enzymes: science or art?, *Curr. Opin. Chem. Biol.*9(2), 21pp 7-26.
- Cheng S, Logan B.E. (2007). Sustainable and efficient biohydrogen production *via* electrohydrogenesis. *Proc Natl Acad Sci USA* 104(47), pp 18871-18873.
- Fan Y, Xu, S., Schaller, R., Jiao, J., Chaplen F., Liu, H. (2011). Nanoparticle decorated anodes for enhanced current generation in microbial electrochemical cells. *Biosens Bioelectron* 26 (5), pp 1908-1912.
- Freguia S, Rabaey K, Yuan Z, Keller J. Electron and carbon balances in microbial fuel cells reveal temporary bacterial storage behavior during electricity generation. *Environ Sci Technol* 2007; 41(8): 2915-21.
- González-Guerrero, M.J., Esquivel, J.P., Sánchez-Molas, D., et al. (2013). Membraneless glucose/O<sub>2</sub> microfluidic enzymatic biofuel cell using pyrolyzed photoresist film electrodes, *Lab. Chip.*13(15), pp 2972-2979.
- Menicucci J, Beyenal, H., Marsili, E., Veluchamy, R.A., Demir, G., Lewandowski, Z. (2006). Procedure for determining maximum sustainable power generated by microbial fuel cells, *Environ. Sci. Technol.*40(3), pp 1062-1068.
- Moore C.M., Minteer, S.D., Martin, R.S. (2005). Microchip-based ethanol/oxygen biofuel cell. *Lab Chip.* 5(2), pp 218-25.
- Olivares-Ramirez, J., Campos-Cornelio, M., Godínez, J.U., Borja-Arco, E., Castellanos, R. (2007). Studies on the hydrogen evolution reaction on different stainless steels, *Int. J. Hydrogen Energy* 32 (15), pp 3170-3173.
- Rasmussen, M., Abdellaoui, S., Minteer, S.D. (2016). Enzymatic biofuel cells: 30 years of critical advancements, *Biosens. Bioelectron* 76, pp 91-102.
- Reguera G., Nevin, K.P., Nicoll, J.S., Covalla, S.F., Woodard, T.L., Lovley, D.R. (2006) Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells, *Appl. Environ. Microbiol.* 72(11), pp 7345-7348.
- Reid, R.C., Minteer, S.D., Gale, B.K. (2015). Contact lens biofuel cell tested in a synthetic tear solution, *Biosens Bioelectron.*68, pp 142-148.
- Roth, J.P., Klinman, J.P. (2003). Catalysis of electron transfer during activation of O<sub>2</sub> by the flavoprotein glucose oxidase, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100(1), pp 62-67.
- Yu, Z., Leng, X., Zhao, S., et al. (2018). A review on the applications of microbial electrolysis cells in anaerobic digestion, *Bioresour. Technol.* 255, pp 340-348

## BÖLÜM 6

### DOĞAL ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİ

---

---

#### 6.1. DOĞAL ATIKSU ARITMA SİSTEMLERİ

Doğal atıksu arıtımında fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler eşzamanlı işler ve su, toprak (ya da dolgu malzemesi), bitkiler, mikroorganizmalar ve atmosfer sürekli bir etkileşim içerisindedir. Bu prosesler sedimentasyon, filtrasyon, gaz transferi, sorpsiyon, iyon değişimi, kimyasal çökeltme, kimyasal oksidasyon/redüksiyon ve fotooksidasyon yanında, fotosentez, bitkiler ve mikroorganizmalarla sorpsiyon, ayrıştırma ve kullanım gibi biyolojik dönüşümleri içerir.

Mekanik sistemlerde arıtım enerji girdisiyle hızlandırılmıştır ve ardışık olarak ayrı ayrı reaktörlerde gerçekleşir. Doğal sistemlerde ise genel olarak bunun tersine arıtım aynı reaktör içerisinde doğal hızlarda ve eş zamanlı olarak yürür. Bir doğal sistemde enerji ihtiyaçları genellikle atıksuyun taşınımı için gerekli olan pompa ve borudur. Bunun dışında arıtımın sürdürülmesi için harici bir enerjiye ihtiyaç duymazlar.

Atıksuların doğal yollarla arıtımı toprağa bağlı (arazi üzerinden akıtma, infiltrasyon, lagünler, stabilizasyon havuzları vd.) sistemler ya da bitkilerin (köklü, yüzücü ve batıksulakalan bitkileri) hakim olduğu sucul ekosistemler (yapay sulakalanlar) olarak iki ayrı grupta incelenir. Su bitkileriyle arıtım sistemleri içerisinde dahil edilen havuz sistemleri (lagünler, stabilizasyon havuzlar gibi) genellikle atıksuları depolamak ve kısmı arıtım yapmak için kullanılırlar.

Arıtım, oksijene bağlı olarak aerobik, anaerobik ve fakültatif olmak üzere üç farklı türe ayrılır. Tümünde de temel arıtım mikroorganizmalarla mikroskobik bitkiler (algler) arasındaki temel ilişkilere yani mikrobiyolojik arıtıma dayanmaktadır. Havuz sistemlerinin çoğunda hem performans hem de çıkış suyu kalitesi sistemdeki mevcut alglere bağlıdır. Algler biyolojik arıtımda rol oynayan diğer canlılara oksijen temin ettikleri gibi alg-karbonat reaksiyonlarıyla etkili bir azot giderimini sağlarlar.

## Kaynaklar

---

- Aken, B.V. (2008). Transgenic plants for phytoremediation: help-ing nature to clean up environmental pollution, *Trend Biotech.* 26, pp 225–237.
- Amaya-Chavez, A., Martinez-Tabche, L., Lopez-Lopez, E., Galar-Martinez, M. (2006). Methyl parathion toxicity to and removal efficiency by *Typha latifolia* in water and artificial sediments, *Chemosphere* 63, pp 1124–1129.
- Arceivala, S.J. (1998). *Wastewater treatment for pollution control*, McGraw Hill Book Company.
- BC Agricultural Composting Hanbook. (1998). Second Edition, Ministry of Agricultures and Food. Order No.382500-0, September.CA.
- Begonia, G.B., Miller, G.S., Begonia, M.F.T., Burks, C. (2002). Chelate-enhanced phytoextraction of Lead-contaminated soils using coffee weed (*Sesbania exaltata* Raf.). *Bull Environ Contam Toxi-col.* 69, pp 624–631.
- Brix, H., Arias, C., Johansen, N.H. (2003). Experiments in a two-stage constructed wetland system: nitrification capacity and effects of recycling on nitrogen removal. In: Vymazal, J. (Ed.), *Wetlands-Nutrients, Metals and Mass Cycling*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Chen, Y., Yang, W., Chao, Y., Wang, S., Tang, Y.T., Qiu, R.L. (2017). Metal-tolerant *Enterobacter* sp. strain EG16 enhanced phytoreme-diation using *Hibiscus cannabinus* via siderophore-mediated plant growth promotion under metal contamination, *Plant Soil* 413, pp 203–216.
- Cooper P.F., Job G.D., Green B., Shutes R.B.E. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. WRc Publications. 184 pp. plus data diskette: Swindon, United Kingdom.
- Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants, *Biochimie* 88, pp 1707–1719.
- Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., Bastian, R.K., Reed, S.C. 2014. *Natural Wastewater Treatment Systems*, Second Edition, IWA publishing, CRC Press, New York.
- Crites, R.W., Middlebrooks, J., Reed, S.C. (2006). *Natural Wastewater Treatment Systems*, Taylor & Francis Group, CRC Press, USA.
- Crites, R.W., Reed, S.C., Bastian, R.K. (2000). *Land Treatment Systems for Municipal and Industrial Wastes*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Crites R., Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill: New York.
- Das, P., Datta, R., Makris, K.C., Sarkar, D. (2010). Vetiver Grass is Capable of Removing TNT from Soil in the Presence of Urea, *Environ. Pollut.* 158, pp 1980–1983.
- Dougherty, M., Engineer, S. (1998). *Composting for Municipalities: Planning and Design Considerations*. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service. (NRAES)-94. Ithaca, New York.
- Dushenkov, V., Nanda Kumar, P.B.A., Motto, H., Raskin, I. (1995). Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams, *Environ. Sci. Technol.* 29, pp 1239–1245.

- FAO. (2023). Food and Agriculture Organization of the United Nations, (<http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e05.htm>).
- Fisher, M.M., Reddy, K.R. (1987). Water hyacinth for improving eutrophic lake water: water quality and mass balance, in: Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery, K.R. Reddy and W.H. Smith, eds., Magnolia Publishing, Orlando, Florida.
- Gerardi, M.H. (2006). Wastewater Bacteria, Wastewater Microbiology Series, Wiley, New Jersey.
- Ghazaryan, K.A., Movsesyan, H.S., Minkina, T.M., Sushkova, S.N., Rajput, V.D. (2019). The identification of phytoextraction potential of *Melilotus officinalis* and *Amaranthus retroflexus* growing on copper-and molybdenum-polluted soils. *Geochem. Health, Environ.*
- Hannink, N., Subramanian, N., Rosser, S.J., Basran, A., Murray, J.A.H., Shanks, J.V. (2007). Enhanced transformation of TNT by tobacco plants expressing a bacterial nitroreductase, *Inter. J. Phytorem.* 9, pp 385–401.
- Herskowitz, J. (1986). Town of Listowel artificial marsh project final report, Project No. 128RR, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Canada.
- Hoffmann, D. H., Platzer, D.-I. C., Winker, D.-I. M., Muench, D. E. (2011). Technology review of constructed wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Sustainable sanitation - ecosan program, Eschborn, Germany.
- <https://www.geeksforgeeks.org/biology/phytoremediation>.
- <http://www.sustainability.uconn.edu/septiccomponents.html>.
- Irving, S., Mitchell, J., Tibor, B. (2003). California Wastewater Training and Research Center, On-site Wastewater Treatment Technology and the Preservation of Agricultural Land in California's Central Valley, California State University, Chico, CA.
- Just, C.L., Schnoor, J.L. (2004). Phytodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (RDX) in leaves of reed canary, *Environ. Sci. Technol.* 38, pp 290–295.
- Kadlec R.H., Knight R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. First Edition, CRC Press: Boca Raton, Florida.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.D. (2009). *Treatment Wetlands*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A.
- Kayombo, S., Mbwette, T.S.A., Katima, J.H.Y., Ladegaard, N., Jørgensen, S.E. (2000). Waste Stabilization Ponds and Constructed Wetlands Design Manual, WSP & CW Research Project, Copenhagen Denmark.
- Kim, B., Gautier, M., Prost-Boucle, S., Molle, P., Michel, P., Gourdon, R. (2014). Performance evaluation of partially saturated vertical-flow constructed wetland with trickling filter and chemical precipitation for domestic and winery wastewaters treatment. *Ecological Engineering*, 71, 41–47.
- Knight, R.L., Ruble, R.W., Kadlec, R.H., Reed, S. (1993). Wetlands for wastewater treatment: performance database, in: *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, G.A. Moshiri, ed., CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Kodituwakku, K.A.R.K., Yatawara, M. (2020). Phytoremediation of industrial sewage sludge with *Eichhornia crassipes*, *Salvinia molesta* and *Pistia stratiotes* in batch

- fed free water flow con-structed wetlands, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 104, pp 627–633.
- Laber, J., Haberl, L., Langergraber, G. (2003). Secondary treatment of hospital wastewater with a 2-stage constructed wetland system, in COST Action 837 Final Workshop and Managemant Committee Meeting (book of abstracts), R. Haberl and G. Langergraber, eds., Vienna, Austria.
- Lai, D.Y.F. (2014). Phosphorus fractions and fluxes in the soils of a free surface flow constructed wetland in Hong Kong. *Ecological Engineering*, 73, 73–79.
- Liu, S., Yang, B., Liang, Y., Xiao, Y., Fang, J. (2020). Prospect of phy-toremediation combined with other approaches for reme-diation of heavy metal-polluted soils, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, pp 16069–16085.
- Maestri, E., Marmiroli, M., Visioli, G., Marmiroli, N. (2010). Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment, *Environ. Exp. Bot.* 68, pp 1–13.
- Mara, D.D. (1976). *Sewage Treatment in Hot Climates*. John Wiley, London.
- McGrath, S.P., Zhao, F.J., Lombi, E. (2002). Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides. *Adv Agron* 75(1).
- Metcalf ve Eddy, 1991. *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*, 3rd Edition, McGraw-Hill, Companies, Inc., New York.
- Metcalf ve Eddy, 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*, Forth Edition, McGraw Hill Companies, Inc., New York.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G. (2015). *Wetlands*, 4th ed. Wiley, Hoboken, New Jersey, USA.
- Moreno, F.N., Anderson, C.W.N., Stewart, R.B., Robinson, B.H. (2008). Phytofiltration of mercury-contaminated water: volatilization and plant-accumulation aspects, *Environ. Exp. Bot.* 62, pp 78–85.
- Nedjimi, B. (2021). Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination, *SN Applied Sciences* 3 (286).
- Nedjimi, B., Daoud, Y. (2009). Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake, *Flora* 204, pp 316–324.
- O’Hogain, S. (2003). The design, operation and performance of a municipal hybrid reed bed treatment system, *Wat. Sci. Tech.* 48(5), pp 119-126.
- Öztürk, İ. Timur, H., Koşkan, U. (2005). Atıksu Arıtımının Esasları. *Evsel, Endüstriyel Atıksu Arıtımı ve Arıtma Çamurlarının Kontrolü*.
- Peer, W.A., Baxter, I.R., Richards, E.L., Freeman, J.L., Murphy, A.S. (2005). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In Tamas MJ, Martinoia E (Eds) *Molecular biology of metal homeostasis and detoxification, from microbes to man. Topics in current genetics*, vol 14, pp 299–339.
- Pivetz, B.E. (2001). Phytoremediation of contaminated soil and ground water at hazardous waste sites. EPA, National Risk Man-agement Research Laboratory, Oklahoma.
- Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M., Freitas, H. (2012). Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation, *Biotechnol. Adv.* 30, pp 1562–1574.
- Reddy K.R., Graetz D.A. (1988). Carbon and nitrogen Dynamics in wetland soils. In: *The Ecology and Management of Wetlands*, Hook D.D. (ed.) Croom Helm, London, United Kingdom, pp 307–318.

- Reed, S.C., Crites, R., Middlebrooks, E.J. (1995) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Second Edition, McGraw-Hill: New York.
- Reed, S.C., Middlebrooks, E.J., and Crites, R.W. (1988). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 1st ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- Roman, P., Martinez, M., Pantoja, A. (2015). *Farmer's Compost Handbook*.
- Royal Commission (Royal Commission on the Future of the Toronto Waterfront). (1992). *Regeneration: Toronto's water-front and the sustainable city: Final report*. The Queen's Printer for Ontario, Toronto, Ontario, source pollution abatement, Trans. ASAE. 19, 171-175.
- Rugh, C.L., Senecoff, J.F., Meagher, R.B., Merkle, S.A. (1998). Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation, *Nat. Biotechnol.* 16, pp 925–928.
- Rynk, R. (1992). *On-Farm Composting Handbook*, Northeast Regional Agricultural Engineering Service, NRAES-54. 152 Riley-Robb Hall, Cooperative Extension, Ithaca, NY 14853-5701
- Rynk, R., Cooperband, L., Oshins, C., Wescott, H., Bonhotal, J., Schwarz, M., Sherman, R., Brown, S. (2022). *The Composting Handbook: A how-to and why manual for farm, municipal, institutional and commercial composters*. Academic Press.
- Salt, D.E., Blaylock, M., Nanda Kumar, P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Raskin, I. (1995). Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants, *Biotechnology* 13, pp 468–474.
- Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I. (1998). Phytoremediation, *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant. Mol. Biol.* 49, pp 643–668.
- Sampaio, C.J.S., de Souza, J.R.B., Damião, A.O., Bahiense, T.C., Roque, M.R.A. (2019). Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a diesel oil-contaminated mangrove by plant growth-promoting rhizobacteria. *3 Biotech* 9:155. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1686-8>.
- Sarma, H. (2011). Metal hyperaccumulation in plants: A review focusing on phytoremediation technology, *J. Environ. Sci. Technol.* 4, pp 118–138.
- Sasse, L. (1998). *DEWATS, Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries*, Bremen Overseas Research and Development Association.
- Schnoor, J., Licht, L., McCutcheon, S., Wolfe, N., Carreira, L. (1995). Phytoremediation of organic and nutrient contaminants, *Environ. Sci Technol.* 29, pp 318–323.
- Shahzad, T., Chenu, C., Genet, P., Barot, S., Perveen, N., Mougín, C., Fontaine, S. (2015). Contribution of exudates, arbuscular mycorrhizal fungi and litter depositions to the rhizosphere priming effect induced by grassland species, *Soil Biol Biochem.* 80, pp 146–155.
- Schueler, T.R. (1992). *Design of Stormwater Wetland Systems*. Washington, D.C., Dept. of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments.
- Susarla, S., Medina, V.F., McCutcheon, S.C. (2002). Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination, *Ecol. Eng.* 18, pp 647–658.
- Srinivas, T. (2008). *Environmental Biotechnology*, New Age International Limited Publishers, New Delhi, India.
- Tang, W., Zhang, W., Zhao, Y., Wang, Y., Shan, B. (2013). Nitrogen removal from polluted river water in a novel ditch-wetland-pond system. *Ecological Engineering*, 60, 135-139.

- Tollsten, L., Muller, P. (1996). Volatile organic compounds emitted from beech leaves, *Phytochem.* 43, pp 759–762.
- Tunçsiper, B. (2018). A sample study on nitrogen removal from polluted streams by using hybrid natural wastewater treatment systems. *Global NEST Journal*, 20, 572-581.
- Tunçsiper, B. (2019). Combined natural wastewater treatment systems for removal of organic matter and phosphorus from polluted streams. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1368-1376.
- U.S.EPA. (2006). *Process Design Manual: Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents*, EPA/625/R-06/016, Cincinnati, Ohio.
- U.S. EPA. (2000a) *Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*, EPA 625/R-99/010, U.S. EPA Office of Research and Development: Washington D.C.
- U.S. EPA. (2000b) *Constructed wetlands: Agricultural wastewater*, EPA 843/F-00/002, U.S. EPA Office of Water: Washington.
- Vieltz, G.J., Burns, M.J., Pasternack, G.B. (2019). How alternative urban stream channel designs influence ecohydraulic conditions. *Journal of Environmental Management*, 247, 242-252.
- Vymazal, J. (1995). Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republicstate of the art, *Wat. Sci. Tech.* 32(2), pp 357-364.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience, *Environ. Sci. Technol.*45(1), pp 61-69.
- Wallace, S.D., Knight, R.L. (2006). *Small Scale Constructed Wetland Treatment Systems. Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements*, Water Environ. Res. Foundation, Alexandria, Virginia.
- Wang, L.K., Shammas, N.K., Hung, Y.T., 2009. *Advanced Biological Treatment Processes*, Handbook of Environmental Engineering Series, Volume 9, Humana Press.
- Wehner, J. F., Wilhelm, R. H. (1958). Boundary conditions of flow reactor. *Chem. Eng. ScL* 6(1), pp 89-93.
- Yang, X., Feng, Y., He, Z., et al. (2005). Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation, *J Trace Elem. Med. Biol.* 18(4), pp 339–353.
- Zhou, S., Hosomi, M. (2008). Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan, *Ecological Engineering*, 32, 147-155.