

Katı Atık Sızıntı Suyu Yönetiminde Karşılaşılan Sorunlar ve Güncel Arıtma Yöntemleri

Remziye Cansu DELİBAŞ¹, Serra Selin ÖVEZ², Filiz DAŞKIRAN³ ve İzzet ÖZTÜRK⁴

Yazışma yazarı:

R. Cansu DELİBAŞ,
delibas@itu.edu.tr

Referans:

Delibaş, R., C., Övez, S., S., Öztürk-Daşkıran, F. ve Öztürk, İ. (2024). Katı Atık Sızıntı Suyu Yönetiminde Karşılaşılan Sorunlar ve Güncel Arıtma Yöntemleri, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 25(1), 47-58.

Makale Gönderimi : 1 ŞUBAT 2024
Online Kabul : 4 TEMMUZ 2024
Online Basım : 5 TEMMUZ 2024

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0002-0381-3088

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0009-0007-1256-323X

³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0009-0002-7736-3136

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID:0000-0002-8274-5326

Özet Kentsel katı atık sızıntı suları, depo yaşına göre büyük değişimler gösteren, yüksek KOİ, TKN, TÇKM, ağır metaller ve mikrokirletici içeriği dolayısıyla atıksu mühendisliğinde arıtılması en problemli atıksulardan biridir. Bu çalışmada öncelikle katı atık sızıntı sularının oluşumu ile miktar ve karakterizasyonu, uygulanan atık yönetim stratejileri de gözetilerek, kapsamlı şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda sızıntı suyu miktarının azaltımı ile ilgili Düzenli Depolama Tesisi İyi İşletim Pratikleri de değerlendirilmiştir. Düzenli Depolama Tesisleri'ne giden biyobozunur atıkların azaltımı ile ilgili yönetim stratejilerinin, sızıntı suyu karakterizasyonunu ne ölçüde etkilediği, uluslararası uygulama örneklerine dayalı olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca, sızıntı suyu arıtımında yaygın olarak kullanılan kanıtlanmış arıtma teknolojileri de geniş bir çerçevede değerlendirilerek uygulama sınırlarına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sızıntı suyu yönetimi, sızıntı suyu karakterizasyonu, sızıntı suyu arıtımı, düzenli depolama tesisi

Problems Encountered in Solid Waste Leachate Management and Current Treatment Methods

Abstract Municipal solid waste leachate is one of the most problematic wastewaters to treat in wastewater engineering due to its high COD, TKN, TDS, heavy metals and micropollutants content, which varies greatly depending on the age of landfill. In this study, first of all, the formation of solid waste leachates, their quantity and characterization were examined comprehensively by taking into account the applied waste management strategies. In this context, Sanitary Landfill Good Operating Practices were also evaluated regarding to reduce the amount of leachate. The extent to which management strategies for reducing biodegradable waste going to Sanitary Landfill Facilities affect leachate characterization has been demonstrated based on international application examples. In addition, proven treatment technologies commonly used in leachate treatment were evaluated in a broad framework and suggestions were made regarding their application limits.

Keywords: Leachate management, leachate characterization, leachate treatment, landfill

1. Giriş

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2020 atık istatistikleri bültenine göre, Türkiye'de belediyeler tarafından 2020 yılında toplanan 32,3 milyon ton atığın ~ %67'si doğrudan düzenli depolama tesislerine sevk edilmiştir (TÜİK, 2020). TÜİK 2022 verilerine göre ise düzenli depolama, yakma ve atık işleme tesislerine gönderilen atıkların 2022 yılında belediye tarafından toplanan toplam atıklara oranı %86 olmuştur. (TÜİK, 2022). İkinci sınıf depolama tesislerinde depolanan atıklardan kaynaklanan sızıntı sularının neredeyse tamamı, yine bu tesislerde kurulan sızıntı suyu (SS) arıtma tesislerinde arıtılmaktadır (TÜİK, 2020). Katı atık sızıntı sularının niceliği ve niteliği, atık kompozisyonu, iklim, sosyo-ekonomik durum, bulunduğu ülke ve depolama sahasının yaşına göre değişiklik göstermektedir. Çıkan sızıntı suyunun karakteristiğine ve miktarına bağlı olarak arıtma proses konfigürasyonu ile tesis ölçeği değişebilmektedir.

Sızıntı suyu muhtevasında çok sayıda inorganik, yavaş ve zor

biyobozunur maddeler bulundurmaktadır. Sızıntı suyunda bulunan moleküler ağırlığı yüksek ve uzun zincirli çözülmüş organik maddeler (hümkik asit, fülvik asit vb.), biyolojik arıtma veriminin düşmesine neden olmaktadır. Bu tür çözülmüş organik maddeler, kararlı ve büyük moleküler yapıları olduklarından, biyolojik olarak giderim verimleri düşüktür. Depo sahaslarının yaşı arttıkça, sızıntı suyu miktarında da düşüş meydana gelmektedir; aynı zamanda kararlı yapıdaki ayrışması zor maddelerin oluşumu da arttığından biyolojik arıtım verimi düşmektedir. Genç depolardaki sızıntı suları kuvvetli organik atıksu karakterine sahip olup, evsel atıksuya kıyasla oldukça (100 kat) yüksek Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) konsantrasyonu içerebilir (Youcai, 2018).

Düzenli depolama tesisine (DDT) gelen atıkların yapısında bulunan ve sızıntı suyu arıtma tesisinde tam olarak arıtılmayan; ağır metal, ilaç ve kişisel bakım ürünlerinden kaynaklanan maddeler ile mikroplastikler gibi mikrokirleticiler;

sızıntı suları iyi yönetilemediğinde doğrudan su kaynaklarına geçebilmekte ve doğal yaşamda sorunlara yol açabilmektedir (Godvin Sharmila vd., 2023). Bu nedenle, atık depolama tesisleri, taşkın alanlarından ve akiferlerden yeterince uzakta konumlandırılmalıdır. Depolama tesislerinin fiziksel yapıları yönetmeliklere uygun şekilde yapılandırılmalı ve tabanları sızdırmaz olmalıdır. Sızıntı suyu ve depo gazı toplama sistemleri, detay mühendislik tasarımına uygun olarak gerekli uzmanlar tarafından yerinde denetlenerek inşa edilmelidir. Bu hususlar, çevre koruma açısından hayati önem taşımaktadır (Öztürk, 2015).

Bu makalede kentsel katı atık sızıntı sularının miktar ve karakterizasyonunun, geniş bir yelpazede ele alınarak, uygulanan atık yönetim ve bertaraf stratejisinden ne ölçüde etkilenebileceği değerlendirilmiştir. Sızıntı suyu miktarını en aza indirilebilmek için uygulanabilecek tasarım ve işletme seçenekleri üzerinde durulmuş, ayrıca döngüsel ekonomi ve biyobozunur atık azaltım stratejilerinin sızıntı suyu miktar ve karakterizasyonuna etkileri incelenmiştir. Daha sonra sızıntı suyu arıtma seçenekleri, kanıtlanmış teknoloji seçenekleri üzerinden incelenmiş ve uygulama sınırları değerlendirilmiştir. Son olarak sızıntı suyu yönetimi sürecinin döngüsel atık yönetimi çerçevesinde yakın gelecekte nereye evrilebileceği ile ilgili değerlendirme ve önerilere yer verilmiştir.

2. Sızıntı Suyu Oluşumunun Nitelik ve Nicelik Yönünden İncelenmesi

Belediye atıkları veya evsel nitelikli katı atık düzenli depolama sahalarında (ikinci sınıf DDT) açığa çıkan sızıntı sularının miktarını ve kirlilik yükünü en aza indirecek iyi yönetim ve arıtma uygulamaları, bu tür tesislerden toprak, akifer ve yüzey sularına gelebilecek olumsuz çevresel etkilerin sürdürülebilir yönetimi bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu durumda, mevcut yönetim sistemlerinden en önemlisi oluşabilecek sızıntı suyunun miktarını azaltmaktır. Depolanacak atığın muhtevasına, depo sahasının bulunduğu çevreye ve iklim şartlarına uygun olarak tahmin edilen sızıntı suyu miktarı, hem dünya genelindeki mevcut tesisler ve yönetim uygulamaları ile karşılaştırma yapmaya hem de sürdürülebilir yönetim uygulamalarının mevcut tesise doğru şekilde uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca sızıntı suyu karakterinin belirlenmesi de arıtma performansının yükseltilmesi ve gereken ek arıtma uygulamalarının tespiti açısından oldukça mühimdir.

2.1 Sızıntı suyu miktarının azaltımı

Katı atık düzenli depolama sahalarında oluşabilecek sızıntı suyu miktarını azaltmak üzere başlıca aşağıdaki seçeneklerin uygulanması önerilebilir (Öztürk, 2011):

- DDT tasarım ve işletimi olabildiğince küçük ($\leq 2\text{--}3$ ha) hücrelerle (bölüm/lot) yürütülmelidir.
- Boş hücrelerden gelen yağış suları ayrıca toplanıp uzaklaştırılmalı, bu sular aktif ve kapalı hücrelerin sızıntı sularıyla hiçbir şekilde karıştırılmamalıdır.
- Dolan hücrelerin üzerinin vakit geçirmeksizin, tekniğine uygun şekilde, eğimli nihai örtü tabakası ile kapatılması sağlanmalıdır.
- Su muhtevası yüksek ($\geq \%85$) atıklar (özellikle lokanta, kantin ve yemekhane atıkları) ayrı toplanarak Atıktan Biyometan Üretim Tesislerine veya Kentsel AAT çamur çürütücülerine yönlendirilmelidir.
- İkinci sınıf DDT'ye kabul edilebilir nitelikteki arıtma çamurları da ön işlemlerle katı madde içeriği $\geq \%40$ 'a getirilmeden, tesise alınmamalıdır.
- Yukarıdaki iyi tasarım, yönetim ve işletim pratiklerinin

hayata geçirilmesi ile DDT'de oluşacak sızıntı suyu miktarının en aza indirilmesi sağlanabilir.

2.2 Sızıntı Suyu Miktarı Hesap ve Tahmin Yaklaşımları

Türkiye'de DDT'lerde oluşacak SS miktarı (Q_{SS}) için, yıllık yağış yüksekliğine (P) bağlı olarak;

- Üstü açık (aktif) hücrelerde $Q_{SS} \approx P_{top}$ (mm/m².yıl)
- Kapalı hücrelerde $Q_{SS} = 0,15 \sim 0,40 \times P_{top}$ (mm/m².yıl)

değerlerinin esas alınması önerilebilir.

İstanbul ve Bursa'daki DDT'leri için, $Q_{SS} \approx 10 \sim 12$ m³/ha.gün değerleri esas alınmıştır. İstanbul'un Asya yakasındaki Kömürcüoda DDT için 30 ~ 40 L/Nüfus.gün kriterinin de kullanılabileceği görülmüştür.

Fadel vd., (2002)'ye göre Akdeniz İklim Kuşağındaki DDT'ler için 0,15 ~ 0,20 m³ SS/ton atık değeri esas alınabilmektedir. İngiltere'deki DDT'de oluşan SS miktarı için $Q_{SS} = 0,24 \sim 0,60 \times P_{top}$ (mm/m².yıl), Çin'deki Yakma tesisleri önündeki ~7 günlük atık kabul havuzunda oluşacak çok genç SS hacmi için ise $Q_{SS} = 0,10 \sim 0,40 \times W_{top}$ (ton atık/gün) kriterinin esas alınabileceği önerilmektedir (Youcai, 2018).

Sızıntı suyu hacminin yukarıdaki pratik ve ampirik kriterler yerine veya onlarla birlikte, EPA HELP Modeli vb. hidrolojik modeller yardımıyla tahmini de mümkündür (Öztürk, 2011).

2.3. Sızıntı Suyu Karakterizasyonu

Belediye atıklarının kabul edildiği düzenli depolama tesislerinde oluşan sızıntı suları, özellikle bu tür tesislerin çevresel etkilerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle, sızıntı suyu karakterizasyonu, atık depolama tesislerinin sürdürülebilir yönetimi ve çevresel etkilerinin kontrolü için gereklidir.

Sızıntı suyu karakterizasyonu, atıksulardaki belirli parametrelerin düzenli ve sistematik ölçümünü içerir. Bu parametreler, atıksuların içerdiği kirleticilerin tespiti ve izlenmesi için temel göstergelerdir. Özellikle belediye atıklarının depolandığı tesislerden kaynaklanan sızıntı sularının karakterizasyonunda, pH, alkalinite, KOİ, Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ), Amonyak Azotu (NH₄-N), TKN, Toplam Çözünmüş Katı Madde (TÇKM), Özgül İletkenlik, Toplam Fosfor (TP), Askıda Katı Madde (AKM) ve ağır metaller gibi konvansiyonel (geleneksel) kirlilik parametrelerinin ölçümü önem taşır. Bu tür kirleticilere ek olarak özellikle son 20 yıllık dönemde mikrokirleticilerin de izlenmesi yönünde bir eğilim giderek güçlenmektedir (Godvin Sharmila vd., 2023).

2.3.1. Konvansiyonel Kirleticiler

DDT'ler, yaşlarına göre üç kategoriye ayrılmaktadır: (1) Genç (5 yıldan az süreli işletilen), (2) Orta yaşlı (5 ile 10 yıllar arasında işletilen), ve (3) Yaşlı (10 yıldan fazla süreli işletilen). DDT sızıntı suyu karakterizasyonu depo yaşına göre önemli ölçüde değişmektedir (Tablo 1).

Genç hücrelerden açığa çıkan sızıntı sularında, asidik pH seviyelerinde ağır metallerin daha fazla oranlarda çözünerek sızıntı sularına geçmesi söz konusu olabilir. Bu husus, özellikle metal içeriği yüksek endüstriyel arıtma çamurlarının da kabul edildiği atık depolama tesislerinde, atık kabulü

öncesi özel tedbirler (ön arıtma, bu tür çamurlara stabilizasyon-katılaştırma uygulanması vb.) alınmasını gerektirebilir.

Türkiye'nin 4 büyük şehrinde faaliyet gösteren DDT sızıntı sularının konvansiyonel parametrelerle karakterizasyonu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Düzenli atık depolama tesisi sızıntı suları karakterizasyonunun depo yaşı ile değişimi (Wang vd., 2018).

Parametre	Düzenli Depolama Tesisinin Yaşı (yıl)		
	Genç(<5)	Orta(5-10)	Yaşlı (>10)
pH	<6,5	6,5-7,5	>7,5
KOİ (mg/L)	>10.000	4000-10.000	<4000
BOİ (mg/L)	10.000-25.000	1000-4000	<1000
TÇM (mg/L)	10.000-25.000	5000-10.000	<1000
BOİ:KOİ oranı	>0,5	0,1-0,5	<0,1
Amonyak Azotu (mg/L)	>400	-	<400
Ağır Metaller	Düşük veya Orta	Düşük	Düşük
Biyolojik Olarak Parçalanabilme	Yüksek	Orta	Düşük
Organik Madde Bileşimi	%80 UYA*	5-30 UYA*, FA ve HA	FA ve HA

*UYA: Uçucu Yağ Asidi, FA: Fülvik Asit, HA: Hümkik Asit

Tablo 2. Türkiye'nin 4 büyük şehrindeki DDT sızıntı sularının karakterizasyonu ((Öztürk, 2015¹),(Gulhan vd., 2022²),(Delibaş, 2022³)).

Parametre	Düzenli Depolama Tesisinin Yaşı					
	Bursa Hamitler ¹ DDT	İzmir Harmandalı ¹ DDT	İstanbul Odayeri DDT ¹		İstanbul Kömürcüoda DDT ²	İzmit İZAYDAŞ DDT ³
Yaşı	-	-	Y*	O*	-	O
pH	8,2	8,3	8,0	7,8	7,8	8,3
KOİ (mg/L)	7.480	14.100	3.150	10.470	12.840	9.960
BOİ (mg/L)	4.690	7.340	126	5.240	8.410	4.980
BOİ/KOİ oranı	0,63	0,52	0,04	0,5	0,65	0,5
Amonyak Azotu (mg/L)	1.015	1.850	2.780	1.960	2.020	2.400
TKN (mg/L)	1.160	1.935	3.150	2.325	2.370	2.640
PO ₄ ⁻³ (mg/L)	11	18	106	31	40	-
TP (mg/L)	-	25	-	-	-	27
Alkalinite (mg/L)	4.460	8.780	14.400	12.200	9.400	13.600
TKM (mg/L)	335	652	126	907	850	~500
UKM (mg/L)	242	479	105	773	625	-
TÇM (mg/L)	6.500	15.160	19.360	17.100	12.160	-
Klorür (mg/L)	3.300	5.450	5.600	5.560	4.250	-
Sülfat (mg/L)	122	68	14	17	13	-
Sülfür (mg/L)	0,2	0,4	0,6	1,5	0,4	-
İletkenlik (mS/cm)	9.840	23.000	28.600	25.600	18.310	-

(*) O: orta yaşlı, Y: yaşlı DDT.

Renou vd., (2008) ile Dhamsaniya vd., (2023) tarafından derlenen veriler yeniden düzenlenerek farklı ülkelerdeki sızıntı sularının depo yaşına göre özellikleri, konvansiyonel parametreler bağlamında Tablo 3'te topluca verilmiştir. Atık hücrelerinde depolanan atıklar yaşlandıkça, sızıntı suyunun pH değeri artarken, KOİ, BOİ, ağır metal konsantrasyonları ve BOİ/KOİ oranı (biyobozunurluk) ise azalmaktadır. Biyobozunur atıkların düzenli depolama tesislerine kabulünün büyük ölçüde sınırlandırıldığı ülkelerde, sızıntı suları orta ve kuvvetli kirlilikte evsel atıksulara yakın karakter göstermektedir. Tablo 3'te, aynı depo yaşı sınıfında yer almalara rağmen, karakterizasyon açısından önemli farklılıklar gösteren sızıntı suyu örnekleri sunulmaktadır. Bu durumun temel nedeni, tabloda verilen ülkelerin atık yönetiminde izledikleri farklı yaklaşımlar, atık karakterizasyonları, sosyo-ekonomik durum ve iklim vb. etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Zhang vd., (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, kış aylarında dokuz tipik Kentsel Katı Atık Depolama ve Atık Yakma Tesisinden (atık kabul havuzu) sızıntı suyu örnekleri toplanmıştır. Belirtilen parametrelerin değişiminin etkisini ele almak amacıyla, çalışmaya Çin genelinde ekonomik seviyeleri ve iklimleri değişen Kuzey, Güneybatı, Güneydoğu ve Kuzeybatı bölgeleri dahil edilmiştir. Alınan, sızıntı suyu örnekleri üç sınıfa ayrılmıştır:

(1) Genç sızıntı suyu (uzun süreli depolama ve işleme süreçlerinin öncesinde toplanmıştır.); (2) Karışık sızıntı suyu (10 yıldan fazla süredir işletilen ve sürekli olarak yeni kentsel atık kabulünün yapıldığı tesislerden toplanmıştır.); (3) Yaşlı sızıntı suyu (10 yıldan fazla süredir kapalı haldeki atık depolama tesislerinden toplanmıştır.). Söz konusu sızıntı suyu örneklerinin özellikleri Tablo 4'te topluca verilmiştir.

Tablo 3. Farklı ülkelerde DDT yaşına göre sızıntı suyu karakterizasyonu ((Renou vd., 2008), (Dhamsaniya vd., 2023)).

Ülke	Yaş	pH	BOİ	KOİ	TKM	TKN	NH ₃ -N
Yunanistan	G*	6,2	26.800	70,900	950	3.400	3.100
	O*	7,9	1.050	5.350	480	1.100	-
İtalya	G	8,0	4000	19.900	-	-	3.917
	O	8,3	1.270	5.050	-	1.670	-
Güney Kore	G	7,3	10.800	24.400	2.400	1.766	1.682
	Y*	8,5	62	1.409	404	141	1.522
Türkiye	G	7,3-7,8	10.800-11.000	16.200-20.000	-	-	1.120-2.500
	O	8,1	-	9.500	-	1.450	1.270
	Y	8,6	-	10.000	1.600	1.680	1.590
Almanya	O	-	1.060	3.180	-	1.135	-
Polonya	O	8,-	331	1.180	-	-	743
Finlandiya	Y	-	62	556	-	192	159
Fransa	Y	7,5	7,1	500	130	540	430

(*) G: genç, O: orta yaşlı, Y: yaşlı DDT.

Tablo 4. 9 Farklı yaşlardaki DDT sızıntı suyu örneklerinin karakterizasyonu (Zhang vd., 2023).

DDT Yaşı	No	pH	ORP (mV)	İletkenlik (S/cm)	TOK (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)
Genç	1	6,60	81,5	26.074	21.764	1.738	2,09
	2	6,89	-38,9	13.095	20.241	878	0,00
	3	7,15	58,3	21.668	15.162	2.066	0,00
	4	6,65	113,5	35.417	4.544	1.250	61,35
Karışık*	5	7,92	24,5	22.590	3.676	2.387	5,08
	6	7,75	-370,7	29.384	4.220	2.601	0,00
Yaşlı	7	7,95	18,4	33.327	4.084	3.579	4,93
	8	8,15	-347,5	33.183	3.114	3.269	0,00
	9	8,20	-0,1	39.853	2.228	5.325	0,55

(*) 10 yıldan fazla süredir işletilen ve sürekli olarak yeni kentsel atık kabulünün yapıldığı tesislerden toplanmıştır.

2.3.2. Mikroirleticiler

Mikroplastikler: Mikroplastikler (MP), atık depolama sahalarına kabul edilen atıklar ile atıksu arıtma tesislerinden gelen yağ - gres içeren kalıntılar ve çamurlardan kaynaklı olarak sızıntı suyuna ulaşabilmektedir. Godvin Sharmila vd., (2023)'ne göre, küresel olarak plastik atıkların ancak %10'u geleneksel yöntemler ile geri dönüştürme işleminden geçirilmektedir. Dünya genelinde atık depolama sahalarına gönderilen plastiklerin oranı %20 olarak kaydedilmiştir (Godvin Sharmila vd., 2023). Atık depolama sahalarına gelen ilaçlar, tekstil atıkları, kozmetik ürünleri ve MP içeren diğer maddelerden kaynaklanan kirleticilere birincil MP, karışık atıkların depolanması sürecinde parçalanarak mikro boyutlara ulaşan plastik atıklara ise ikincil MP'ler denilmektedir (Kumar vd., 2023). İkincil MP'ler zamanla mikro boyutlara kadar küçülerek sızıntı suyuna kadar ulaşabilmektedir. Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi çamurlarında da 1 kg kuru madde başına 100'den fazla MP parçacığına rastlanabilmektedir (Godvin Sharmila vd., 2023). Çin'de bulunan 6 farklı evsel katı atık bertaraf tesisinin sızıntı sularında 0,4 ~ 24,6 adet/L MP olduğu tespit edilmiştir. Atık depolama alanı yakınındaki bir yüzeysel suda ise tahmin edilen fazla seviyede (6 adet/L) MP'ye rastlanmıştır (Godvin Sharmila vd., 2023).

MP'lerin atıksu arıtma süreçlerine birtakım olumsuz etkileri

söz konusudur. Örneğin birincil arıtma adımında, toksik maddeler yüzeye tutunabilir; MP'nin hidrofobik yapılarının yol açtığı bu durum, aynı zamanda reaktiflerin tutunmasına ve gerekli reaktif dozajının artmasına sebep olabilmektedir. İkincil arıtma kademesinde MP'lerin azot giderimine olumsuz etkileri bulunduğu, amonyum birikimine yol açarak, denitrifikasyon prosesini olumsuz etkilediği belirtilmektedir. Ayrıca, MP içeren atıksularda daha yüksek BOİ, Çözünmüş Oksijen (ÇO), Toplam Azot (TN) ve TP seviyeleri gözlemlenmektedir (Zhang ve Chen, 2020). MP'ler, çöktürme prosesi uygulanan atıksularda, negatif yüzey yükü sayesinde daha fazla yumaklaştırıcı sarfiyatına neden olmakta; Membran kullanılan proseslerde ise, düzensiz ve pürüzlü şekillerinden dolayı membranların aşınmalarına yol açarak membran performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. MP'lerin neden olduğu; membran performansını düşüren, ek olarak membran içi basıncı artıran bir diğer etmen de tıkanma olayıdır. Polisülfon membranlarda yapılan bir çalışmaya göre; boyutu 10 µm'den küçük olan MP'ler membranda tıkanmaya yol açarken, büyük olanlar ise filtre keki oluşumuna sebep olmaktadır. MP'ler dezenfeksiyon adımında da olumsuz etkilere sahiptir. Mikroorganizmalar için koruyucu ortam oluşturarak dezenfeksiyonun etkilerinin azalmasına neden olurlar. Ozonlama sırasında MP'ler oksidasyona uğradığından, ozon dozajının yetersiz kalması durumu görülebilmektedir (Zhang ve Chen, 2020).

Mikroplastikleri atıksulardan uzaklaştırmak için kullanılan proseslere örnek olarak; 500 µm boyutundaki tüm MP'lerin

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

uzaklaştırıldığı ve döner filtrelerin kullanıldığı üçüncül arıtma prosesi; %99,9 verime sahip membran biyoreaktör (MBR) sistemi; >%99 verime sahip AnMBR ve dinamik membranlar; >%98 verime sahip A²O, Ardışık Kesikli Reaktör (SBR), Hareketli Yataklı Biyofilm Reaktörü (MBBR) ve geleneksel aktif çamur prosesleri sayılabilir (Zhang ve Chen, 2020), (Lares vd., 2018), (Minteni vd., 2017).

İlaçlar ve kişisel bakım ürünleri: Son yıllarda yaygın kullanımlarıyla hayatımıza giren ve atık olarak karşımıza çıkan kozmetik ürünleri ile ilaç malzemeleri de atık depolama sahalarında sıkça görülmektedir. İnsan ve evcil hayvanlar için kullanılan ilaçlar; örneğin ağrı kesiciler ve antibiyotikler, endokrin bozucu ve gen transformasyonuna neden olan kimyasallar içermektedirler. İnsanların günlük hayatlarında sıkça kullandıkları sabun, deterjan, parfüm, çamaşır suları, boyalar, deodorantlar, şampuan, saç kremi, vücut bakım ürünleri gibi kozmetik ürünleri de çokça endokrin bozucu kimyasal barındırmaktadır. Bu tür maddelerin DDT'lerde diğer atıklarla birlikte topluca biriktirilmesi, vektörlerin de yardımıyla çevreye yayılmalarına ve zarar vermelerine neden olmaktadır. DDT'lerden sızıntı suyuna geçen ilaç ve kozmetik maddeleri, arıtma tesisleri çıkış sularının verildiği alıcı ortamlara ulaşmaktadır. Sucul ortamlarda kalıcı ve biyolojik olarak aktif olan bu maddeler, hasat bitkilerinde biyobirikime sebep olmaktadır (Ohoro vd., 2019), (Wang vd., 2020).

İlaçlarda bulunan kimyasallardan bazıları; uyarıcılarda bulunan kafein, ağrı kesicilerde bulunan ibuprofen, diclofenak, parasetamol, ketoprofen ve naproksen, psikiyatri ilaçlarında bulunan karbamazepin, primidon, antibiyotiklerde bulunan sülfametokzol, kloramfenikol, trimotoprin, ciprofloksasin, yağ regülatörlerinde bulunan gemfibrozil ve antipiretiklerdir. Kozmetik ve günlük bakım ürünlerinde ise; parfümler, antimikrobiyal maddelerden triklosan, Ultraviyole (UV) koruyucular, antioksidanlar, fenol ve paraben gibi koruyucular, DEET gibi böcek ilaçları ve hormonlar bulunmaktadır. Bu kimyasalların hepsi biyolojik olarak aktif olup, canlılarda birikime yol açabilen maddelerdir (Ohoro vd., 2019).

Çin'in Shandong bölgesinde bulunan bir kentsel DDT'de, sızıntı suyundan alınan örneklerde endokrin bozucu kimyasalların konsantrasyonunun 2 ~ 5080 ng/L arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu tür kimyasallar arasında sülfonamidler, florokinolonlar ve mikrolitlerin de bulunduğu 9 çeşit antibiyotik ile yumuşatıcı, yüzey aktif maddeler ve steroid hormonlarının bulunduğu 4 çeşit endokrin bozucu madde yer almaktadır. En yüksek konsantrasyona sahip kimyasal, ortalama 3500 ng/L ile Bifenol A (BPA) olup, onu ortalama 826 ng/L ile sülfadezamin ve 596 ng/L ile sülfadiazin izlemektedir. Ayrıca yapılan sıklık tespiti testine göre, bu iki antibiyotik ve koruyucu kimyasal, iki ayda alınan 12'şer örneğin (24 örnek) hepsinde de bulunmaktadır. Atık depolama tesisi civarında yetiştirilen hasat bitkilerinde gözlemlenen sülfonamid miktarlarının, günlük alım limitinin (50 µg/kg.gün) altında olduğu ancak endokrin bozucu kimyasalların eklenik riskinin, çevreyi ve canlı organizmaları etkileyecek düzeyde olduğu belirtilmektedir (Wang vd., 2021).

Argun vd., (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Kömürcüoda Atık Depolama Tesisinde açığa çıkan sızıntı suyundaki mikrokirleticiler incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu sızıntı suyunda; tarım ilaçları, ftalat esterleri, fenolik yüzey aktif maddeler (alkilfenoller), Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PHA), Uçucu Organik Bileşikler (UOB) ve ağır metaller bulunduğu gözlemlenmiştir. Sözü edilen mikrokirleticilerin, ardışık kesikli reaktör, Ultrafiltrasyon (UF) ve Nanofiltrasyon (NF) birimlerindeki giderim verimleri incelenmiştir. Anılan

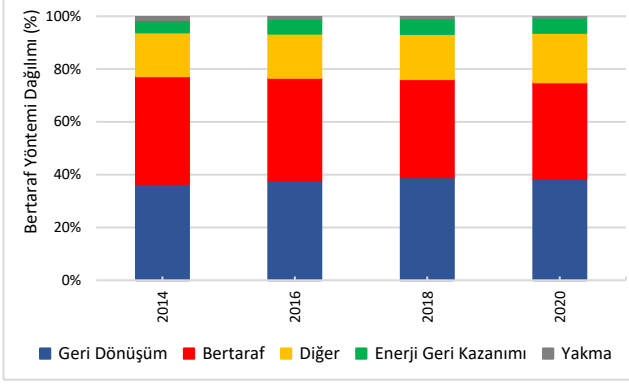
çalışmaya göre UOB'ların en çok giderildiği proses anoksik/aerobik proseslerde UOB'ların %81 ile %100'ü giderilebilmektedir. BTEX bileşiklerinin (benzen, tolüen, etilbenzen ve ksilen) ağırlıkta bulunduğu UOB'ların, çamurda birikimi ihmal edilebilecek düzeydedir. BTEX'ler arasında biyolojik reaktörde en fazla giderilen mikrokirleticiler etilbenzenlerdir. UF ünitesinde en fazla giderim verimine sahip bileşik ise, tarım ilaçlarında yaygın bir şekilde kullanılan 1,3-Dikloropropen'dir. Yarı-uçucu Organik Bileşikler (YUOB) içerisinde sızıntı suyundan en fazla bulunan bileşikler; 7171 µg/L ile tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılan DEHP bileşiği ve 8598 µg/L ile endüstriyel bir kimyasal olan nonilfenol bileşiğidir. Nonilfenol plastik işlemede, reçine ve boya endüstrisinde, antioksidan üretiminde ara ürün olarak ve metal işleme yapan malzemelerde kullanılan bir kimyasaldır. YUOB'in en çok giderildiği prosesler aerobik biyolojik arıtma ve membran prosesleridir. %100 giderilen YUOB'ler, PHA'lerden naftalin, tarım ilaçlarında kullanılan kimyasallardan klorfenvinfos ile alkilfenollerdir. Çalışmada gözlenen, literatür verilerinden daha yüksek YUOB giderim verimleri biyolojik proseslerdeki yüksek çamur yaşı ile açıklanmıştır (Argun vd., 2020).

2.4. Atık Yönetim Stratejisinin, DDT'ye Gelen Atık Miktar ve Bileşimi ile Sızıntı Suyu Karakterizasyonuna Etkisi

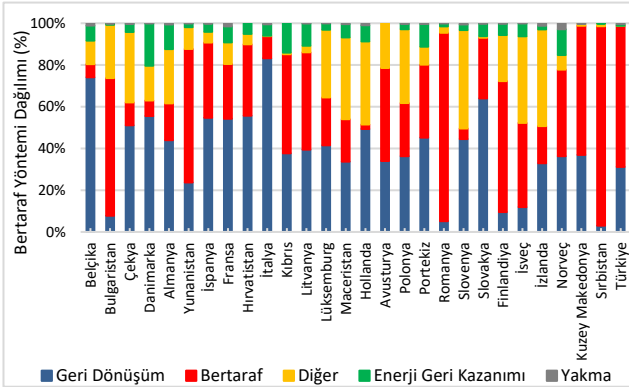
Atık yönetimi stratejisi, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve çevresel etkileri minimize etmek açısından büyük öneme sahiptir. Karışık toplanmış atıkların depolanmasıyla, ayrı toplanan atıkların döngüsel atık yönetiminin gerektirdiği geri dönüşüm/geri kazanım işlemlerinin uygulanması sonucu geriye kalan kalıntıların depolandığı sahalardan gelen sızıntı sularının miktar ve karakterizasyonları arasında büyük farklılıklar bulunmaktadır.

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin, Avrupa Komisyonu Atık Çerçeve Direktifindeki son güncellemeye göre; belediye atıklarının 2025'e kadar en az %55'ini, 2030'a kadar %60'ını ve 2035'e kadar %65'ini geri dönüştürmeleri gerekmektedir. Onaylanan diğer hedefler arasında 2035'e kadar çöp depolama alanlarına gidecek atık miktarında %10'luk bir üst sınır belirtilmektedir ve biyoatıkların zorunlu olarak ayrı toplanması bu direktifte yer almaktadır. Doğrudan düzenli depolama alanlarına gidecek atık miktarı, Türkiye'de ise %40 ile sınırlandırılmıştır (Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, 2021). 28 Avrupa Ülkesinde uygulanan (2014-2020 dönemi için) ortalama atık bertaraf yönetimi dağılımını gösteren grafik Şekil 1 ile verilmiştir. Şekilde yer alan 28 Ülkenin 4 yıllık atık yönetimi sistemi incelendiğinde bertaraf yöntemleri dağılımı bakımından belirgin bir değişiklik olmadığı, atık depolama yönteminin ağırlığını koruduğu görülmektedir.

Şekil 2'den anlaşıldığı üzere Direktiflerin etkisiyle Avrupa Birliği Ülkeleri'nde doğrudan düzenli depolamaya giden atık oranı 2014-2020 yılları arasında %40'tan %34'e düşmüştür. Düzenli depolama yerine atık geri dönüşüm, yakma ve kompost gibi yöntemler daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2'de de 28 Avrupa Ülkesinin 2020 yılındaki katı atık bertaraf yöntemlerinin dağılımı verilmiştir. Eurostat'taki en güncel veriye göre, 2020 yılı için bertaraf yöntemleri incelendiğinde; İtalya ve Belçika'nın Geri Dönüşüm oranının, diğer ülkelere göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Düzenli Depolama Yöntemini en az kullanan ülkelerin başında ise Hollanda, Slovenya, Danimarka ve Belçika gelmektedir.



Şekil 1. 28 Avrupa Ülkesinin 2014-2020 dönemi için, ortalama atık bertaraf yöntemi dağılımı (Eurostat, 2023).



Şekil 2. 2020 yılında 28 Avrupa Ülkesi için uygulanan atık bertaraf yöntemi dağılımı (Eurostat, 2023).

TÜİK verilerine göre 2002 yılında, toplam işlenen atık miktarının yaklaşık %1,5'inin kompost tesislerine gönderildiği görülmektedir. Bu oran 2010 yılında %1, 2022 yılında ise %0,1'in altına düşmüştür. Düzenli depolama tesisine giden belediye atıklarının oranı 2002 yılında ~%28, 2010 yılında ~%54 ve 2022 yılında ise ~%61 olarak verilmiştir (TÜİK, 2022). Bu artışta DDT sayılarındaki artışın etkili olduğu bilinmektedir.

Türkiye'deki sızıntı suyu kirlilik düzeyinin, döngüsel atık yönetimini uzun süreden beri etkin biçimde uygulayan bazı ülkelere göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir ((Renou vd., 2008), (Dhamsaniya vd., 2023)). Bunun ana sebebi; Türkiye'deki yönetmeliklerdeki atıkların zorunlu geri dönüştürülme oranlarının Avrupa Birliği'ndekilere göre daha az olması olarak gösterilebilir. Ayrıca Türkiye'de 2020 yılında doğrudan düzenli depolamaya gelen belediye atıklarının toplam oluşan atık miktarına oranı %61 iken 28 Avrupa Ülkesi'nde bu oran ortalama %37'dir (Eurostat, 2020).

2019 yılında yayınlanan Sıfır Atık Yönetmeliği ile ham madde ve doğal kaynakların etkin yönetimi amaçlanmaktadır. Tüm kaynaklarla birlikte insan ve çevre sağlığının korunması amacıyla getirilen Yönetmelikte, sıfır atık yönetim sistemi kurulmasının ilkeleri belirlenmektedir. Yönetmeliğe göre, sıfır atık sistemini kurmak isteyen birimlerin, atıklarını ayrı toplaması, atık türüne göre ayrı biriktirilmesi ve israfı önlemesi esastır. Yayınlandığı yıldan bu yana bu Yönetmeliğin içeriği ve esasları geliştirilmiştir. 2021 yılında Atık Getirme Merkezleri kurulması kararlaştırılmış, 2022 yılında ise bağımsız atık toplayıcıların sisteme dahil edilmesi amacıyla Atık Toplayıcı Genelgesi yayımlanmıştır.

Sıfır Atık Yönetmeliği'nden sonraki değişmelere bakılacak olursa; 2018 yılında düzenli depolama ve geri dönüşüm tesislerinde atık miktarı belediyeler tarafından toplanan atık

miktarının %79,5 iken 2020 yılında bu oran ~%82,6 olarak kaydedilmiştir (TÜİK, 2022). 2022 yılında ise aynı oran %85,9'a çıkmıştır (TÜİK, 2022). Tablo 2 ve Tablo 3 incelendiğinde; farklı yıllarda yayımlanmış kaynaklardan alınan sızıntı suyu karakterizasyonlarında biyobozunur KOİ(BOİ) oranlarının benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bunun yanında KOİ konsantrasyonlarında belirgin bir azalış görülmektedir. Bunun nedeni, düzenli depolamanın nihai bertaraf olarak ağırlık taşıdığı Türkiye ve benzeri ülkelerde, depo sahalarına gelen organik atıklarca zengin yeni atık miktarından kaynaklanan taze sızıntı suyu miktarı artışı, diğer bir ifade ile biyobozunur atıkların düzenli depolama tesisleri dışına yönlendirilmesi stratejisinin yeterince uygulanamaması olarak ifade edilebilir. TÜİK Atık İstatistiklerine göre 2022 yılında kompostta giden atık miktarının %1 civarında olması da bu durumu desteklemektedir (TÜİK, 2022).

Litvanya için yapılan bir çalışmada (Kalvas ve Gusca, 2021), 2016 yılı atık verileri ve atık yönetimi stratejileri ile Litvanya ve Avrupa Birliği Atık Yönetimi Yönetmeliği 2030 yılı atık yönetimi hedefleri karşılaştırılmıştır. Avrupa Birliği atık yönetimi stratejilerinin uygulanması halinde plastik ambalaj kullanımının düşeceği, fakat atık karakterizasyonu için net bir öngörde bulunulamayacağı belirtilmiştir, Litvanya'nın 2016 ve 2030 yılları için ortalama atık karakterizasyonunun aynı olacağı kabul edilmiştir. Gerçekleştirilen yaşam döngü analizi çalışmasının sonucuna göre; sızıntı suyu miktarının Litvanya için kişi başı 0,014 ton'dan 0,009 ton'a düşeceği öngörülmektedir. Bu değişimde, 2030 yılında depolama tesislerine gelen atık miktarındaki düşüşün etkili olacağı belirtilmiştir (Kalvas ve Gusca, 2021).

3. Sızıntı Suyu Arıtma Yöntemleri

Kentsel atıkların depolandığı II. Sınıf Düzenli Depolama Tesisleri veya Açık (Düzensiz, Vahşi) Atık Döküm Sahalarından açığa çıkan sızıntı suları çok yüksek seviyelere ulaşabilen ve depo yaşı ile değişen KOİ, AKM, Azot, TÇM, Fe ve Mn içerikleri ile düşük KOİ/TKN oranı dolayısıyla Atıksu Mühendisliği'nde "artılması en zor atıksular" sınıfında yer almaktadır.

Katı atık sızıntı sularının arıtılmasında karşılaşılan başlıca zorluklar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Wang vd., 2018):

- Sızıntı suları, kuvvetli organik atıksu sınıfından olup çok sayıda biyolojik inhibitör ve inorganik kirleticiler içermektedir. Bu yüzden biyolojik veya fizikokimyasal arıtma proseslerinden biri uygulanarak deşarj standartları sağlanamaz; ancak birden fazla arıtma prosesi ile istenen kalitede çıkış suyu elde edilebilir.
- Amonyak içeriği çok yüksek ve KOİ/TKN oranı (görel) düşük/dengesiz olduğu için, sızıntı sularının tam nitrifikasyonu mümkün olmakla birlikte, dışardan karbon ilavesi olmadan istenen oranda denitrifikasyon mümkün değildir. Bu yüzden çıkıştaki Nitrat ağırlıklı TN seviyesi genellikle 10~15 mg/L'nin önemli oranda üzerinde kalır.
- Sızıntı sularının biyolojik arıtımındaki önemli diğer bir sorun, açığa çıkan yüksek reaksiyon ısısının bastırılmasıdır. Bu yüzden genellikle yaz aylarında ön-soğutma ile aerobik reaktördeki sıcaklığın $\leq 33\sim 35$ °C altında tutulması gerekir.
- Sızıntı suyu miktarı ve kirliliğinin depo yaşı ve mevsimlere göre önemli ölçüde değişkenlik gösterebilmesi, kararlı ve istikrarlı bir çıkış suyu elde edilmesini güçleştirmektedir. Özellikle yaşlı depo sızıntı sularında, nitrifikasyon dolayısıyla alkalinite eksikliği sorunuyla karşılaşılabilir.
- Sızıntı suyu arıtma prosesleri oldukça kompleks ve arıtma maliyeti pahalıdır (8~15 \$/m³). Deşarj standartlarını sağlamak için, biyolojik arıtma proseslerinin

nanofiltrasyon ve ters osmoz sistemleriyle desteklenmesi gerekebilir.

3.1. Deşarj Standartları

Artırılmış sızıntı sularının dolaylı (atıksu kanal şebekesine) ve doğrudan (alıcı su kütlelerine) deşarjı için, aralarında Türkiye'nin de olduğu bazı ülkelerde geçerli deşarj standartlarında, Tablo 5'te de görüldüğü üzere, artırılmış sızıntı sularının kanalizasyona deşarjında (genellikle) NH₄-N için herhangi bir sınır değer bulunmamaktadır. Doğrudan alıcı ortama deşarj durumunda ise TN yerine NH₄-N için limit verilmektedir. Alıcı ortama deşarj halindeki KOİ limiti de ülkeler itibarı ile 100~600 mg/L aralığında değişmektedir (Wehrle Umwelt GmbH, 2011). Bu durum çözünmüş inert KOİ'yi gidermek üzere, genellikle biyolojik arıtma çıkış suyunun tamamı veya bir kısmına NF uygulanmasını gerektirebilmektedir.

3.2. Sızıntı Suyu Arıtma Seçenekleri

Karışık kentsel atıkların depolandığı tesislerde açığa çıkan sızıntı sularının arıtımı için başlıca; (1) Kentsel atıksularla birlikte arıtma, (2) Klasik (Geleneksel) Biyolojik Arıtma, (3) MBR Arıtma (4) MBR'a ilaveten NF ve TO sistemiyle arıtma ve (5) Doğrudan Ters Ozmos (TO) ile arıtma seçenekleri, başarısı kanıtlanmış uygun yöntemler olarak bilinmektedir.

3.2.1 Kentsel atıksularla birlikte arıtma

Katı atık düzenli depolama tesisinin kent merkezine yakın (20~30 km) ve sızıntı suyu miktarının az (<100 m³/gün) olduğu durumlarda; sızıntı sularının doğrudan (ön arıtma uygulanmaksızın veya TO uygulanıp hacmi %50~60 oranında azaltıldıktan sonra tankerlerle taşınarak kentsel AAT'lerde evsel atıksularla birlikte arıtımı mümkündür. Bu tür bir seçenekte, sızıntı sularının kentsel AAT'ye (kentsel atıksu debisinin nispeten düşük olduğu) gece saatlerinde verilmesi tercih edilmelidir. Konuyla ilgili bilimsel çalışmalar ve saha uygulamaları, sızıntı suyu debisinin kentsel atıksu debisinin %2'sini aşmadıkça, birlikte arıtma dolayısıyla merkezi AAT'de belirgin bir işletme sorunu veya performans kaybı yaşanmadığını göstermektedir ((Henry, 1985), (Pohland ve Harper, 1985)). Ancak sızıntı sularının toksik ve inhibitör kirlenmeler içerdiği halde, basit (havalandırmalı lagün türü) bir ön arıtma sonrası taşıma önerilmektedir. Bu tip suların birlikte arıtılması durumunda, sızıntı suyu ile gelecek KOİ ve TKN yüklerini arıtmak için kentsel AAT'nin hidrolik ve biyolojik kapasitesinin yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Örnek olarak, 300.000 nüfuslu (KOİ=600 mg/L, TKN=40 mg/L) bir şehrin 60.000 m³/gün kapasiteli kentsel AAT'de; KOİ=25.000 mg/L, TKN=2500 mg/L ve Q_{ss}=90 m³/gün debili sızıntı sularının arıtılması dolayısıyla gelecek ilave kirlilik yükleri ve debisi;

- $KOİ=2,5 \times 90 / (0,6 \times 60.000) = 0,063$ (%6,3 artış)
- $TKN=2,5 \times 90 / (0,04 \times 60.000) = 0,094$ (%9,4 artış)
- $Q_{ss}/Q_{AAT} = 90 / 60.000 = 0,0015$ (%0,15 artış)

gibi tesisin tasarım güvenliği için de rahatlıkla tolere edilebilecek düzeylerde (<%10'luk) kalmaktadır. Dolayısıyla bu seçenek, ilgili Su Kanalizasyon ve Katı Atık İdareleri arasında düzenlenecek bir protokolle, sızıntı suyuyla ortaya çıkan ilave işletme maliyeti bedeli karşılığında, kolayca hayata geçirilebilir. Bu tür bir uygulama ~15 yıldan bu yana Sakarya Büyükşehir Belediyesi'nce başarıyla sürdürülmektedir.

Dereli vd. (2020)'ye göre; İrlanda'daki DDT'lerde açığa çıkan sızıntı sularının %51'i (2013 yılı itibarı ile 560.000 m³/yıl) doğrudan atıksu kanalizasyon şebekesine verilmekte, kalan %49'u ise biriktirilerek arıtılmak üzere Merkezi AAT'lere taşınmaktadır. Fransa'da da kentsel atıksular ile birlikte arıtılan sızıntı suyu oranı %21 olarak belirtilmektedir (Dereli vd., 2020).

Yapılan laboratuvar ve tam ölçekli çalışmalarda, sızıntı suyunun kentsel atıksular ile birlikte anaerobik olarak arıtılabileceği de gösterilmiştir. Sızıntı suyu sayesinde kentsel atıksuların metan üretimi ve enerji geri kazanımı artış göstermektedir (Avrupa Komisyonu, 2001). Özellikle genç depolardan gelen sızıntı sularının yüksek kirlilik yükü ve biyolojik arıtılabilirliği ile düşük askıda katı madde oranı, anaerobik granüler çamur yataklı proseslerin uygulanmasına olanak sağlamaktadır (Luo vd., 2015). Genç sızıntı suyu eklenen sentetik atıksularda KOİ giderim verimi %67 ile %90 arasında değişmekteyken, yaşlı sızıntı suyu ile yapılan deneylerde bu oran %35'e düşmektedir (Singh ve Mittal, 2012). Yapılan çalışmalara göre, hacimce %5 oranında ve 2,84 kg KOİ/m³.gün yük ile kentsel atıksulara karıştırılan sızıntı sularında KOİ giderim verimi yaklaşık %70 olmaktadır (Torres vd., 2009). Aynı şekilde sızıntı sularının hacimce %2 oranında ve 0,63 kg KOİ/m³.gün yük ile kentsel atıksulara eklendiğinde, mevcut atıksuyun KOİ giderimi %58 olurken, oranın %2,5'a ve yükün 2 kg KOİ/m³.gün'e çıkarılmasıyla giderim verimi de %85'e çıkmıştır (Yangin vd., 2002).

3.2.2 Klasik (geleneksel) biyolojik arıtma

Sızıntı sularının biyobozunur KOİ(BOİ) ve NH₄-N giderimi sonrası dolaylı deşarjının mümkün olduğu, inert KOİ ile ilgili bir kısıtlamanın olmadığı durumlarda, Ardışık Kesikli Reaktör sistemi olarak uygulanacak klasik biyolojik arıtma seçeneği en uygun çözüme karşı gelir. Ardışık Kesikli Reaktör (AKR) sistemi, tercihen derin (h_{su} = 6-8 m) ve jet havalandırıcılarla karıştırılıp havalandırılan çelik/betonarme tanklar halinde tasarlanıp işletilerek BOİ₅<100 mg/L ve NH₄-N>50 mg/L içeren çıkış suyu kalitesine ulaşılabilir. Sızıntı suları için AKR uygulamalarında, soğuk iklim ve NH₄-N giderim verimiyle atık (depolama) hücresi yaşına bağlı olarak büyük reaktör hacimleri gerekebilir (Robinson vd., 1997). Bu yöntem atıksu kanal şebekesine deşarj öncesi ön arıtma maksadıyla da kullanılabilir.

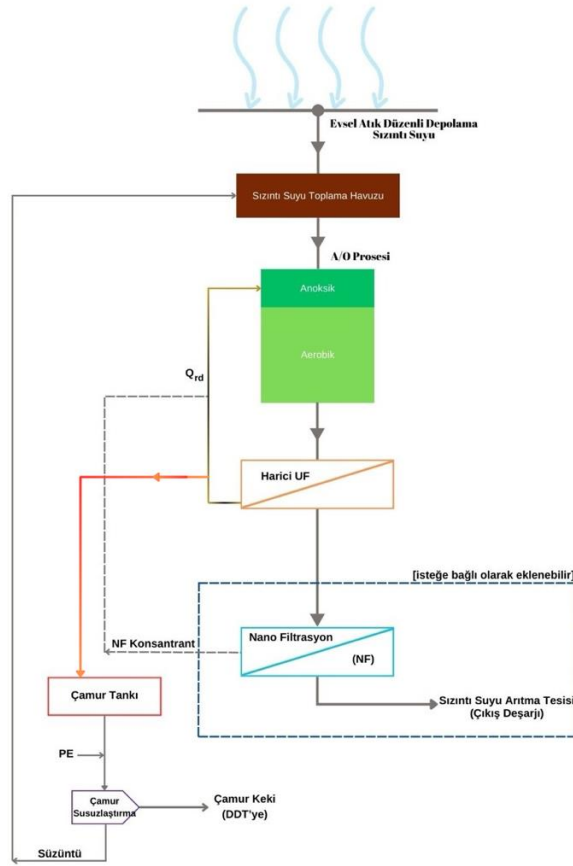
3.2.3 Membran biyoreaktörlerde (MBR) arıtma

Artırılmış sızıntı sularının alıcı ortamlara deşarjında; NH₄-N <10 mg/L, TKN giderimi ≥ %90 ve KOİ_{top} < 600 mg/L gibi sıkı limitlerin sağlanmasının istendiği durumlarda "Anoksik / Oksik (A/O) + Harici Ultrafiltrasyon (UF)" dizimli MBR prosesinin uygulanması zorunlu olabilir (Şekil 3). Tipik bir MBR sistemi iki ana üniteden oluşur: Besi maddesi (Azot) giderimli biyolojik arıtma sistemi (A/O prosesi) ve katı (biyokütle) – sıvı ayırımının gerçekleştirildiği Membran (Ultrafiltrasyon – UF) birimi, MBR sistemi; atıksuya alıştırılmış ve konsantrasyonu 10~15 g AKM/L ulaşan biyolojik çamuru ile neredeyse tam (%100) nitrifikasyon ve BOİ₅ giderimi ile çok üstün bir performans göstermektedir.

Genç ve orta yaşlı sızıntı sularını arıtmak için bilimsel ve teknik gerekliliklere uygun şekilde tasarlanıp işletilen, AO prosesli MBR (Harici UF ± NF) sistemlerinde; X= 10~18 mg AKM/L, ÇO= 2-2,5 mg/L, T≤ 30-32 °C, P_{UF}= 1 bar (P_{NF}= 15 bar), θ_x= 20-30 gün olmak üzere ≥ %98'lik KOİ, ~%100'lük NH₄-N giderimleri elde edilebilmektedir. Tipik işletme ve bakım maliyetleri de UF+NF'li halde ~7 \$/m³, NF olmaksızın ~5 \$/m³ civarında seyretmektedir (Hamle İnşaat, 2023).

Tablo 5. Bazı ülkelerdeki sızıntı suyu deşarj standartları (Wehrle Umwelt GmbH, 2011).

	KOİ			NH ₄ -N		
	Sızıntı Suyu	Kanala Deşarj	Alıcı Ortama Deşarj	Sızıntı Suyu	Kanala Deşarj	Alıcı Ortama Deşarj
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(%)	(mg/L)
Almanya (Kuzey Avrupa için örnek teşkil etmektedir)	2.000-5.000	400	200	500-1.200		
İspanya (Güney Avrupa için örnek teşkil etmektedir)	5.000-15.000	1.500	160	1.000-2.000	0-95	10-50
Çin (Asya için örnek teşkil etmektedir)	10.000-25.000	1.000	100	1.500-3.000		
Türkiye	5.000-25.000	4.000	600	1.000-2.500	Limit yok	<40



*PE: Polielektrolit; Q_{rd}: Geri devir akımı

Şekil 3. Anoksik / Oksik (A/O) + Harici Ultrafiltrasyon (UF) sistemi.

Sızıntı sularının MBR sisteminde arıtılmasıyla ilgili olarak Türkiye’de çok önemli tasarım ve işletme tecrübesi bulunmaktadır. İstanbul’da kurulu sızıntı suyu arıtan başarılı bir MBR tesisinin tipik performans verimleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Kömürçüoda tipik sızıntı suyu arıtma tesisi verimleri (Öztürk, 2023).

Parametreler	Giriş (Ham Sızıntı Suyu)	UF + NF Çıkış	Verim (%)
KOİ (mg/L)	13.500	220	98
TN	2.500	140	94
NH ₄ -N	2.000	8	99
TP	12	1	90

3.2.4 MBR ile birlikte NF ve TO destekli arıtma

Arıtılmış sızıntı sularının doğrudan akarsu, deniz vb., sucul ortamlara deşarjının gerekmesi halinde, KOİ ≤ 200 mg/L, NH₄-N ≤ 10 mg/L gibi çok düşük seviyelerde çıkış suyu üretilmesi zorunlu olabilmektedir. Deşarj limitlerinin oldukça düşük olduğu bu gibi durumlarda, MBR sisteminin NF ve TO sistemleriyle güçlendirilmesi gerekmektedir. Deşarj standartlarında öngörülen KOİ, NH₄-N, renk ve tuzluluk (iletkenlik) seviyelerine göre, MBR çıkışının belli bir kısmı veya tamamına NF ± TO uygulanabilmektedir. Bu kapsamda başlıca aşağıdaki seçenekler söz konusudur (Wehrle Umwelt GmbH, 2011);

- (i) Konsantratin düzenli depolama tesisi (DDT) kapalı hücrelerine geri verilmesine (sızdırılmasına) izin verilmemesi hali

Bu durumda;

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

- MBR sonrası granüler aktif karbon (GAK) filtrasyonu uygulanarak,
- MBR + NF sonrası GAK filtrasyonu uygulandıktan sonra doğrudan alıcı ortamlara deşarj söz konusu olabilir. NF konsantrasi en yakın kentsel AAT'ye taşınıp orada kentsel atıksularla birlikte ilave arıtıma da tabi tutulabilir.

(ii) Konsantrenin DDT kapalı hücrelerine geri verilmesinin mümkün olması hali

Bu durumda;

- MBR + NF sonrası konsantre DDT'ye geri verilebilir,
- MBR + TO (tek geçişli) sonrası konsantre DDT'ye geri verilebilir,
- MBR + TO (çift geçişli) sonrası konsantre giriş akımının ~%35'ine düşürüldükten sonra DDT'ye geri verilebilir,
- TO konsantresinin DDT'ye geri verilmesi dolayısıyla; sızıntı suyunda TÇM artışı, biyogaz üretiminde (NO3 beslenmesine bağlı) düşme, NF ve TO birimlerinde işletme sorunları yaşanabilir.

3.2.5 Doğrudan TO uygulaması

Sızıntı suyu debisinin 100 m³/gün ve altında olması dolayısıyla, MBR sistemi ile arıtımın fizibil olmadığı durumlarda; Asitleştirme ve Mikrofiltrasyonlu ön arıtma sonrası doğrudan TO uygulanarak konsantre miktarı giriş akımının ~%35'i seviyesine çekilebilir (Youcai, 2018). Genç ve orta yaşlı DDT sızıntı sularının arıtıldığı durumlarda, TO konsantrasi KOİ, TÇM, NH₄-N, klorür ve diğer parametreler bakımından çok yüksek seviyede kirlilik içerdiği için tanklerle en yakın kentsel AAT tesisine taşınarak birlikte arıtma seçeneği kullanılabilir. Böyle bir seçeneğin mümkün olmadığı durumlarda, depo gazından enerji sistemi atık ısı ile buharlaştırma ve sonrası kalan bakiyenin katılaştırma ve stabilizasyonu da bir diğer konsantre yönetim uygulamasıdır. TO konsantrenin hacmi minimize edilip uçucu kül ve çimento ile katılaştırılması da yönetim seçeneklerindedir ((York vd., 1999); (Hunce vd., 2012)).

Yaşlı depo sızıntı sularının doğrudan TO ile arıtımı sonrası oluşacak konsantrenin ise kapatılan hücrelerin üzerine geri çevrilerek, (atık kütesinin su muhtevası artırmak suretiyle) biyogaz üretimi canlandırılıp atık stabilizasyonunun hızlanması sağlanabilir.

4. Değerlendirme ve öneriler

Mutfak ve park-bahçe atıkları ile, arıtma çamuru vb. biyobozunur atıkların yüksek oranlarda (≥ %40) olduğu karışık belediye atıklarının depolandığı Düzenli Depolama Tesis veya Sahalarında açığa çıkan sızıntı suları (SS), depo yaşına da bağlı olarak, içindekileri çok yüksek seviyelerde KOİ, TKN, TÇM, AKM ve bazı metaller ile mikroplastikler gibi kirlenmeler dolayısıyla atıksu sektöründe "arıtılması en zor atıksular" sınıfında yer almaktadır. Döngüsel atık yönetiminin tam olarak uygulanmadığı ülkelerde; belediye atıkları içindeki ambalaj atıkları ve biyobozunur atıklar, ayrı toplama ile DDT'ler dışına ancak sınırlı oranda yönlendirilebildiği için, açığa çıkan SS miktar ve kirlilik yükü dolayısıyla önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Ayrı toplama ile döngüsel atık yönetimini (Sıfır Atık Yaklaşımı) 1990'lı yıllardan bu yana etkin biçimde uygulayan Almanya, İskandinav ülkeleri, İsviçre ve Japonya gibi ülkelerde DDT'ye kabul edilen atık miktarı çok büyük oranda (>%90) inert yapıda olup ağırlıklı olarak kül, cüruf ve atık (ön) işleme tesislerinin bakiyelerinden oluştuğu için, sızıntı suları da büyük ölçüde orta veya yüksek kirlilikte evsel atıksulara benzer karakterdedir (Tablo 4). Dolayısıyla DDT sızıntı sularının miktar ve karakterizasyonu, ülkelerin uyguladığı atık yönetim stratejileriyle çok kuvvetli bir etkileşim gösterir; bu bağlamda

Delibaş vd.

yüksek oranlarda ambalaj atıkları geri kazanım ve biyobozunur atık azaltım hedefleri ile atık azaltımını teşvik edici ekonomik araçların (atık kabul ücreti, düzenli depolama vergisi vb.) etkin biçimde uygulandığı durumlarda, DDT'ler dışına yönlendirilen atık miktarının ağırlıkça >%70'lere ulaşabileceği görülmektedir.

Sızıntı suyu yönetiminde kritik derecede önemli bir diğer husus, DDT'de iyi tasarım ve işletim pratiklerinin ne ölçüde uygulandığıdır. Bu bağlamda; 5 yıldan daha kısa sürelerde dolan küçük hücrelerle çalışılması, dolan hücrelerin üzerinin tekniğine uygun olarak eğimli ve az geçirimli nihai örtü tabakası ile kapatılması ile boş hücrelerden gelecek yağış sularının sızıntı sularından ayrılması vb. hususlar öne çıkmaktadır. İyi tasarım ve işletim pratikleriyle yönetilen DDT'lerde sızıntı suyu miktarı en aza indirilerek arıtma ile ilgili sorunlar daha kolay çözülebilir.

Döngüsel atık yönetimi ile DDT'lerde iyi tasarım ve işletim pratiklerine öncelik verilmekle birlikte, kaçınılmaz olarak açığa çıkan sızıntı sularının ilgili deşarj standartlarına uygun seviyede arıtımı için Bölüm 4'te değinilen çeşitli "kanıtlanmış" teknoloji seçenekleri mevcuttur. Sızıntı suyu debi ve kirlilik seviyesine göre, genellikle MBR ± (NF + TO) veya Doğrudan TO gibi arıtma teknolojilerinin yaygın olarak tercih edilmekte olduğu gözlemlenmektedir (Bölüm 3.2.). Membran teknolojileri sayesinde çok iyi kalitede çıkış suyu elde edilerek yüzeysel ve yeraltı sularının kirlenmeye karşı korunması sağlanabilmektedir. Ayrı arıtma yanında, ilgili su kanalizasyon İdaresi ile özel protokol yapılarak; kentsel AAT'ye fazla uzakta yer almayan (<30-40 km) DDT'lerinde açığa çıkan sızıntı sularının, bağlantı (iletim) ve taşıma maliyetleri de gözletilmek suretiyle kentsel atıksularla birlikte arıtımı da, DDT'nin işletmeye alınmasını izleyen dönemde (belli süreyle), diğer bir seçenek olarak kullanılabilir.

5. Teşekkür ve Bilgi

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

6. Kaynaklar

Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği (RG Tarihi: 26.06.2021, No: 38745, Tür: 7, Tertip: 5). Resmî Gazete, 31523., <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=38745&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>

Argun, M.E., Akkuş, M., and Ateş, H. (2020), Investigation of micropollutants removal from landfill leachate in a full-scale advanced treatment plant in Istanbul city, Turkey, *Science of The Total Environment*, 748, 141423, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141423>.

Avrupa Komisyonu. (2001). Atık depolama alanları hakkında 26 Nisan 1999 tarihli 1999/31/EC Konsey Direktifi. Avrupa Komisyonları Resmi Gazetesi, 16.7.1999, L 182/1.

Delibas, R.C., Gulhan, H., Ulutas, A. and Ozturk, I. (2023), Dynamic modelling of a full scale mbr treating sanitary landfill leachate: effect of ammonia stripping, 7th MEMTEK International Symposium on Membrane Technologies and Applications, pp. 65-72, October 17-19, 2023, Istanbul, Türkiye.

Delibaş, R.C. (2022). Modelling of A Leachate Treatment Plant with Membrane Bioreactor Process, İTÜ, Lisansüstü Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi.

- Dereli, R. K., Giberti, M., Liu, Q., & Casey, E. (2020). Modeling co-treatment of leachate in municipal wastewater treatment plants in the context of dynamic loads and energy prices. In *Frontiers in Water-Energy-Nexus—Nature-Based Solutions, Advanced Technologies and Best Practices for Environmental Sustainability: Proceedings of the 2nd Water Energy NEXUS Conference, November 2018, Salerno, Italy*, pp. 493-496. Springer International Publishing.
- Dereli, R.K., Clifford, E. & Casey, E. (2021) Co-treatment of leachate in municipal wastewater treatment plants: Critical issues and emerging technologies, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(11): 1079-1128, DOI:10.1080/10643389.2020.1745014
- Dhamsaniya, M., Sojitra, D., Modi, H., Shabiiimam, M.A., and Kandya, A. (2023), A review of the techniques for treating the landfill leachate, *Material Today: Proceedings*, 2023, 77(1): 358-364, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.496>.
- Eurostat (2023), Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations EU 2014-2020. Erişim tarihi: Mayıs 2024. Erişim Adresi: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/b0146e61-8785-421e-a442-9e3a42de4e85?lang=en>
- Fadel M, Bou-Zeid E, Chahine W, Alayli B. (2002), Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*. 22(3): 269-282, doi: 10.1016/s0956-053x(01)00040-x.
- Godvin Sharmila V., Shanmugavel S.P., Tyagi V. K., and Banu J. R. (2023), Microplastics as emergent contaminants in landfill leachate: Source, potential impact and remediation technologies, *Journal of Environmental Management*, 343, 118240, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118240>.
- Gulhan, H., Dereli, R.K., Ersahin, M.E., and Koyuncu, I. (2022), Dynamic Modeling of a full-scale membrane bioreactor performance for landfill leachate treatment, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 45:345–352, <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02664-x>.
- Hamle İnşaat AŞ. (2023), Şahsi görüşme ile alınan, Türkiye'deki uygulamalı veriler.
- Henry, J.G. (1985), New developments in landfill leachate treatment, proceedings of international conference on new directions and research in waste treatment and residual management, University of British Columbia, pp. 1-139.
- Hunce, S., AKGÜL, D., DEMİR, G., & MERTOĞLU, B. (2012), Solidification/stabilization of landfill leachate concentrate using different aggregate materials, *Waste Management*, vol.32, no.7, 1394-1400.
- Kavals, E. & Gusca, J. (2021), Life Cycle Assessment-Based Approach to Forecast the Response of Waste Management Policy Targets to the Environment. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1) 121-135. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2021-0008>
- Fadel M, Bou-Zeid E, Chahine W, Alayli B. (2002), Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Manag.* 22(3):269-82. doi: 10.1016/s0956-053x(01)00040-x. Ambalaj
- Kumar, V., Sharma, N., Umesh, M., Chakraborty, P., Kaur, K., Duhan, L., Sarojini, S., Thazeem, B., Pasrija, R., Vangnai, A.S., and Maitra, S.S. (2023), Micropollutants characteristics, fate, and sustainable removal technologies for landfill leachate: A technical perspective, *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103649, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103649>.
- Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M., and Sillanpää, M. (2018), Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology, *Water Research*, 133, 236-246, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>.
- Luo, J., Qian, G., Liu, J., & Xu, Z. P. (2015). Anaerobic methanogenesis of fresh leachate from municipal solid waste: A brief review on current progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 21–28. doi:10.1016/j.rser.2015.04.053
- Mintenig, S.M., Int-Veen, I., Löder, M.G.J., Primpke, S., and Gerdt, G. (2017), Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging, *Water Research*, 108, 365-372, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>.
- Ohoro C.R., Adeniji A.O., Okoh A.I., and Okoh O.O. (2019), Distribution and chemical analysis of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in the environmental systems: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(17):3026, <https://doi.org/10.3390/ijerph16173026>.
- Öztürk, F. (2011). Katı atık sızıntı suyu miktarını azaltıcı yönetim stratejileri (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=rCbWnuqW6HxCZ_98ARapgvsh9dRvOPQHytJj-DMcOoo3y4KsT41vLU4qz1ch4
- Öztürk, İ. (2015), Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları, İSTAÇ Teknik Kitaplar Serisi Yayını.
- Öztürk, İ. (2023), The Significance of membrane technologies on the management of sanitary landfill leachate. 7th MEMTEK International Symposium on Membrane Technologies and Applications, İstanbul, Türkiye.
- Pohland, F.G., and Harper, S.R. (1985), Critical review and summary of leachate and gas production from landfills, Report to EPA, WERL, Coop. Aggrement CR809997, Cincinnati, Ohio.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., and Moulin P. (2008), Landfill leachate treatment: Review and opportunity, *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>.
- Robinson, H.D., Last, S.D., Raybould, A., Savory, D. & Walsh, T.C. (1997), State of the Art Landfill Leachate Treatment Schemes in the United Kingdom, Proceedings of

- Sardinia 97 Sixth Landfill Symposium, Italy, pp. 191-209.
- Scarlat, N., Fahl, F., and Dallemard, J.F. (2019), Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe, *Waste Biomass Valorization*, 10, 2425–2444, <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0297-7>.
- Singh, V., & Mittal, A. K. (2012). Toxicity and treatability of leachate: Application of UASB reactor for leachate treatment from Okhla landfill, New Delhi. *Water Science and Technology*, 65(10), 1887–1894. doi:10.2166/wst.2012.864
- Torres, P., Rodriguez, J. A., Barba, L. E., Marmolejo, L. F., & Pizarro, C. A. (2009). Combined treatment of leachate from sanitary landfill and municipal wastewater by UASB reactors. *Water Science and Technology*, 60(2), 491–495. doi:10.2166/wst.2009.365
- TÜİK (2018), Belediye Atık İstatistikleri 2018, Türkiye İstatistik Kurumu TÜİK Haber Bülteni, TS 30666, Erişim Tarihi: Ocak 2024 Erişim Adresi: <https://tuikweb.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=306663>
- TÜİK (2020), Belediye Atık İstatistikleri 2020, TÜİK Haber Bülteni, TS 37198, Erişim Tarihi: Ocak 2024 Erişim Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>
- TÜİK (2022), Belediye Atık İstatistikleri 2022, Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni, TS 49570, Erişim Tarihi: Ocak 2024 Erişim Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2022-49570>
- Wang, J.Y., An, X.L., Huang, F.Y., and Su, J.Q. (2020), Antibiotic resistome in a landfill leachate treatment plant and effluent-receiving river, *Chemosphere*, 242, 125207, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125207>.
- Wang, K., Li, L., Tan, F., and Wu, D. (2018). Treatment of landfill leachate using activated sludge technology: A review, *Hindawi, Volume 2018*, 1039453, <https://doi.org/10.1155/2018/1039453>.
- Wang, K., Reguyal, F., and Zhuang, T. (2021), Risk assessment and investigation of landfill leachate as a source of emerging organic contaminants to the surrounding environment: A case study of the largest landfill in Jinan City, China, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 18368–18381, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10093-8>.
- Wehrle Umwelt GmbH (2011), Treatment of leachate from landfills - example from Europe & Asia , unpublished technical study.
- Yangin, C., Yılmaz, S., Altınbaş, M., & Oztürk, I. (2002). A new process for the combined treatment of municipal wastewaters and landfill leachates in coastal areas. *Water Science and Technology*, 46(8), 111–118. doi:10.2166/wst.2002.0156
- York, R. J., Thiel, R. S., & Beaudry, E. G. (1999), Full-scale experience of direct osmosis concentration applied to leachate management, In S. Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia, Italy: Sardinia '99 Seventh International Waste Management and Landfill Symposium.
- Youcai, Z. (2018), Leachate generation and characteristics. In: ZhaoYoucai (Ed.), Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste, Elsevier, pp. 1–30.
- Zhang, L.Y., Tang, C., Li, M.C., Wang, H.J., Zhang, S.J., Wang, J.C., Dong, X.W., Fang, D., Bai, H., Sun, Y., and Yue, D.B. (2023), Identification of key surfactant in municipal solid waste leachate foaming and its influence mechanism, *Water Research*, 231, 119487.
- Zhang, Z., and Chen, Y. (2020), Effects of microplastics on wastewater and sewage sludge treatment and their removal: A review, *Chemical Engineering Journal*, 382, 122955, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122955>.

