

A REVIEW OF LANDFILL LEACHATE TREATMENT METHODS

Todor Angelov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: tangelov419@gmail.com

ABSTRACT. Leachate from landfills is a highly polluted liquid generated when atmospheric precipitation and groundwater infiltrate and percolate through municipal solid waste. Its composition varies significantly depending on a number of factors, like the landfill's age, the nature of the waste disposed of, the region's climatic conditions, and others. Consequently, leachate often contains high concentrations of organic and inorganic contaminants, heavy metals, ammonium nitrogen, and other potentially harmful substances. This review examines the leachate formation process, its key characteristics, and the types of leachate characteristic of the various stages of operation of landfills. In addition, the environmental impacts associated with leachate pollution are highlighted. Furthermore, major treatment methods, both conventional and advanced, are presented. Finally, recommendations for selecting suitable treatment methods are proposed, taking into account the specific characteristics and type of leachate.

Key words: landfill leachate, treatment methods.

ОБЗОР НА МЕТОДИТЕ ЗА ТРЕТИРАНЕ ИНФИЛТРАТНИ ВОДИ ОТ ДЕПА ЗА ТВЪРДИ БИТОВИ ОТПАДЪЦИ

Тодор Ангелов

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Инфилтратът от депата за отпадъци представлява силно замърсена течност, формирана вследствие на просмукването на валежи и подпочвени води през масива от депонирани твърди битови отпадъци. Съставът му варира в значителна степен и зависи от редица фактори, сред които възрастта на депото, типа на отпадъците, климатичните особености на региона, както и от някои други фактори. В резултат на това инфилтратът често съдържа значителни количества органични и неорганични замърсители, тежки метали, амониев азот и други потенциално опасни вещества. Настоящият обзор има за цел да представи анализ на процесите, водещи до образуването на инфилтрат, неговите основни характеристики и типологията на инфилтратите, характерни за различни етапи от експлоатацията на депата за отпадъци. Разгледани са също така екологичните рискове, произтичащи от замърсяването с инфилтрат. Освен това са представени основните методи за третиране на инфилтрат, включващи както конвенционални подходи, така и усъвършенствани технологични решения. Накрая са формулирани препоръки относно избора на най-подходящи методи за третиране, съобразени със специфичните характеристики и типа на инфилтрата.

Ключови думи: инфилтрат от депата за отпадъци, методи за третиране.

Въведение

Депонирането продължава да бъде един от най-често използваните методи за управление на битови отпадъци в световен мащаб, макар че напоследък се полагат все повече усилия за популяризиране на концепцията на кръговата икономика и йерархията на отпадъците включваща ограничаване на образуването им, повторна употреба и рециклиране (Abdel-Shafy & Mansour, 2018; Pires & Martinho, 2019; Yaashikaa et al., 2022).

Трябва да се отбележи обаче, че този метод създава редица екологични проблеми, като сред най-сериозните е генерирането на инфилтратни води (инфилтрат). Инфилтратът представлява течност с комплексен състав, която се образува вследствие на взаимодействието между депонираните твърди отпадъци и атмосферни валежи, повърхностни и подпочвени води, проникващи през тялото на депото. Този състав е доста променлив и се влияе от множество фактори, основните сред които са химичният и морфологичен състав на отпадъците, климатичните условия на района, хидрогеоложките особености на площадката, възрастта, както и методите за експлоатация и управление на депото (Dagwar & Dutta, 2024). Поради тази сложна взаимовръзка инфилтратът съдържа разнообразни органични и неорганични замърсители като летливи органични съединения и феноли, тежки метали, амониев азот, хлориди, сулфати и редица други потенциално опасни вещества (Schwarzbauer et al., 2002; Eggen et al., 2010).

Тези замърсители могат да окажат сериозно въздействие върху околната среда, засягайки най-вече

подземните и повърхностните води, почвения слой, флората и фауната, и човешкото здраве (Danthurebandara et al., 2012). Особено тревожно е замърсяването на водните ресурси, тъй като то може да предизвика дълготрайни и трудно обратими ефекти върху качеството на питейната вода и оттам върху екологичното равновесие (Research Clue, 2014).

Освен това, наличието на тежки метали и устойчиви органични замърсители в инфилтрата крие риск от натрупване в живите организми и увеличаване на концентрацията им по хранителната верига. Това е опасно, защото в дългосрочен план може да доведе до хронични здравословни проблеми както при хората, така и при животните.

През годините са разработени редица технологии за третиране на инфилтрат, които включват както конвенционални физикохимични и биологични методи, така и съвременни подходи като мембранни технологии, усъвършенствани окислителни процеси (Advanced Oxidation Processes AOPs), както и различни комбинации от тях (Tu et al., 2020; Xiang et al., 2025). Ефективността на тези методи обаче често зависи от специфичния състав на инфилтрата, нивото на замърсители, pH, температура и дори сезонните колебания.

Всичко това налага необходимостта от дълбоко разбиране на механизмите, които стоят зад образуването и трансформацията на инфилтрата, както и внимателен подбор на подходящ метод за третиране, съобразен с конкретните условия и нормативните изисквания.

Генериране, характеристики и тип на инфилтратните води

Генерирането на инфилтрат в депата за отпадъци представлява сложен процес, който включва едновременното действие на множество физични, химични и биологични механизми (Christensen et al., 1992). В основата на образуването на инфилтрат стоят процесите на биологично разграждане на отпадъците, преминаването на вода през отпадъчния масив и разтварянето на различни химични съединения. В тялото на депото микроорганизмите осъществяват непрекъснато разграждане на органичната материя чрез аеробни и анаеробни процеси (Morling, 2007). В резултат на тяхната метаболитна активност се образуват органични киселини, алкохоли, амоняк и въглероден диоксид.

Тези съединения се разтварят в просмукващата се вода, при което се образува инфилтрат със сложен химичен състав. По време на движението на водата под действието на гравитационните сили и разликите в хидравличния напор, тя разтваря както лесноразтворими вещества, така и съединения, подложени на постепенно разграждане. Образуването на инфилтрат започва, когато влагосъдържанието на отпадъците надвиши тяхната влагоемност, при което излишната течност дренира през отделните слоеве на отпадъчния масив и се натрупва в основата на депото.

От друга страна, хранителните отпадъци, растителните остатъци и други органични материали постъпват в депото с високо съдържание на влага. В процеса на тяхното разграждане се освобождават допълнителни количества вода, които допринасят за генерирането на инфилтрат дори при отсъствие на външни източници на вода. При депа, разположени под нивото на подземните води или в непосредствена близост до него, възходящата инфилтрация на подземни води може да увеличи количеството на образувания инфилтрат.

Освен това биохимичното разграждане на органичната материя води до образуване на вода като метаболитен продукт. Допълнителен принос имат и материалите, използвани за ежедневно запръстване и рекултивиране на депото, които задържат влага и постепенно я освобождават към инфилтратния поток (Yatoo et al., 2024; Environmental Studies Institute, 2025).

Инфилтратът, образуван в депата за отпадъци, съдържа голямо разнообразие от специфични химични съединения и се характеризира с високи концентрации на разтворени органични вещества (биохимична потребност от кислород - БПК, химична потребност от кислород - ХПК и общ органичен въглерод - ООВ), токсични съединения и метали (El-Saadony et al., 2026).

Освен това той се отличава с интензивно оцветяване, характерен неприятен мирис и повишена мътност, както и с ниски стойности на рН (Wan et al., 2022). Въпреки че съставът на инфилтрата може да варира значително, според възрастта на депонираните отпадъци могат да бъдат разграничени три основни типа инфилтрат (Dong, 2007) (таблица 1).

Таблица 1. Типове инфилтрат

Тип инфилтрат	Млад	Межди-нен	Стабили-зиран
Възраст на депото, години	<5	5-10	>10
рН	<6.5	7	>7.5
ХПК, г/л	>20	3-15	<2
БПК/ХПК	>0.3	0.1-0.3	<0.1
ООВ/ХПК	0.3	-	0.4
Органична материя	70-90% Летливи мастни киселини	20-30% Летливи мастни киселини	Високомолекулни съединения
Азот, мг/л ОВ	100-2000		
Метали, г/л	2	<2	<2

Влияние на инфилтратните води върху околната среда

Изтичането и разпространението на инфилтратни води в околната среда може да доведе до замърсяване на почвите, подземните и повърхностните води, като по този начин представлява сериозна заплаха за човешкото здраве и екосистемите (Daniel et al., 2021). Инфилтратът, образуващ се при просмукването на води през отпадъчните маси, се характеризира със сложен химичен състав, включващ тежки метали, органични съединения, антибиотично-резистентни микроорганизми, както и остатъци от фармацевтични продукти и продукти за лична хигиена, които при попадане в хранителната верига или при директна експозиция могат да окажат неблагоприятно въздействие върху човешкото здраве, свързано с токсични, канцерогенни и мутагенни ефекти. Особено сериозен е рискът от замърсяване на водните ресурси вследствие на миграцията на инфилтрат към подземни и повърхностни водоизточници. Наличието на високи концентрации на органични и неорганични замърсители може значително да влоши качеството на водите, включително на източниците за питейно-битово водоснабдяване. Инфилтратът е способен да променя киселинно-алкалния баланс (рН) на водата и да благоприятства образуването на опасни химични съединения, които са с повишен риск за човешкото здраве (Parvin & Tareq, 2021). Продължителната употреба на вода от замърсени водоизточници може да доведе до различни здравословни проблеми, включително нарушения във функциите на черния дроб и бъбреците, както и до повишен риск от развитие на онкологични заболявания. Друг съществен замърсител, често присъстващ в инфилтратните води е амонякът. Високите концентрации на амониев азот във водните обекти могат да предизвикат процеси на еутрофикация, характеризирани с прекомерно развитие на водорасли и други водни растения. Това води до намаляване на концентрацията на разтворен кислород във водата, нарушаване на екологичното равновесие и застрашаване на водните организми. В резултат могат да настъпят масова смъртност на риби, намаляване на биоразнообразието и деградация на водните екосистеми.

Следователно ефективното събиране, контролиране и третиране на инфилтрата от депата за твърди битови отпадъци е от съществено значение за ограничаване на

отрицателните въздействия върху околната среда, опазването на водните ресурси и защитата на човешкото здраве. Прилагането на адекватни методи за третиране на инфилтрат представлява ключов елемент от устойчивото управление на отпадъците и намаляването на екологичните рискове, свързани с тяхното депониране (Bouaouda et al., 2023; Hin et al., 2025).

Конвенционални методи за третиране

Конвенционалните методи за третиране на инфилтрат се основават на утвърдените и широко прилагани физични, химични и биологични техники за пречистване на отпадъчни води (Ahmed et al., 2017; Ahmed et al., 2021; Aziz et al., 2023; Clemente et al., 2024). Физичните техники включват процеси, базирани на механична сепарация или филтрационни механизми, предназначени за отделяне на суспендирани твърди частици и неразтворени вещества. Сред тях най-често се прилагат седиментацията и филтрацията. Седиментацията се основава на гравитационното утаяване на суспендираните частици, което позволява тяхното ефективно отделяне от течната фаза (Bashir et al., 2016). От своя страна, филтрационните техники, използват пореста среда (пясък или активен въглен) за задържане както на суспендираните твърди частици, така и на някои органични съединения. Ефективността на седиментацията по отношение на отстраняването на суспендираните твърди вещества е 50–70%, докато при филтрацията с активен въглен се достигат 85–95% за ХПК и 80–90% за БПК (Wang & Qiao, 2024).

Химичните методи се основават на добавянето на химични реагенти с цел улесняване на процесите на коагулация, флокулация, утаяване, окисление и неутрализация на съдържащите се в инфилтратата замърсители. Тези методи са насочени към повишаване на ефективността на отстраняване на разтворени метали, органични съединения и други замърсители чрез протичане на химични реакции, при които те се трансформират в неразтворими съединения или агрегати, подлежащи на отделяне от течната фаза. Сред най-широко прилаганите химични методи за пречистване са коагулацията и флокулацията, химичното утаяване (преципитация), както и окислително-редукционните процеси. Процесът на коагулация и флокулация включва добавяне на коагуланти, като железен трихлорид или алуминиев сулфат, последвано от въвеждане на флокуланти, предимно полимерни реагенти, с цел стимулиране на агрегацията на суспендираните твърди вещества и колоидните частици в по-едри флокули, които могат лесно да бъдат отделени от инфилтратата (Chen et al., 2024). Чрез коагулация и флокулация могат да бъдат отстранени между 60% и 90% от суспендираните вещества и 50%–70% от ХПК (Wang & Qiao, 2024). Химичното утаяване (преципитацията) се основава на добавянето на реагенти, които взаимодействат с разтворените замърсители и водят до образуване на неразтворими утайки, подлежащи на последващо отстраняване чрез седиментация или филтрация. Този процес е особено ефективен за отстраняване на тежки метали, като се постига степен на отстраняване от 80% до 95% за елементи като олово, кадмий и хром. Окислително-редукционните процеси, включват прилагане на окислител с цел разграждане на органичните замърсители и

намаляване на концентрациите на токсични съединения. Например, озонирането може да доведе до намаляване на оцветяването с 80%–90% и до отстраняване на 70%–85% от ХПК (Wang & Qiao, 2024).

Отдухването с въздух (air stripping) е масообменен процес за третирането на инфилтратни води, при който замърсители, като летливи органични съединения (ЛОС) и амоняк, се отстраняват от инфилтратата чрез пропускане на въздух през течността. Процесът се основава на трансфера на замърсители от течната в газовата фаза, като с цел увеличаване на контактната повърхност се използват колонии с пълнеж или специални аерационни резервоари. Отдухването с въздух е ефективно, просто за прилагане и предлага висока степен на пречистване (De et al., 2019).

Биологичните методи за пречистване на инфилтрат от депа за отпадъци използват метаболитната активност на микроорганизмите за разграждане на органични замърсители и отстраняване на биогенни елементи. Те включват аеробни и анаеробни процеси, както и изкуствени влажни зони, които осигуряват подходящи условия за микробно разграждане и трансформация на замърсителите.

Аеробните процеси протичат в присъствие на разтворен кислород в резултат на което сложните органични съединения се окисляват до по-прости продукти като въглероден диоксид, вода и нова биомаса. Към най-разпространените аеробни технологии за третиране на инфилтрат се отнасят системите с активна утайка, биофилтрите и мембранните биореактори (Bhambore & Suresh Kumar, 2022; Nuansawan et al., 2023). Освен разграждането на органичната материя, при аеробни условия протичат и процеси на нитрификация, при които амониевият азот се окислява последователно до нитрити и нитрати от специални бактерии.

Анаеробните процеси протичат в безкислородна среда и се осъществяват от различни групи микроорганизми чрез последователни етапи на хидролиза, кисела ферментация и образуване на метан. Крайните продукти от разграждането на органичните вещества са предимно метан и въглероден диоксид, които формират биогаз. Типични примери за анаеробни технологии са UASB-реакторите (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), анаеробните лагуни и анаеробните биореактори с фиксирана биомаса. Тези системи са особено подходящи за третиране на инфилтрата с високи концентрации на органични замърсители, като същевременно позволяват оползотворяване на получения метан като енергиен ресурс. (Beegle & Borole, 2018; Anjum et al., 2023).

Изкуствените влажни зони комбинират растителност, почвен субстрат и микроорганизми за отстраняване на замърсителите чрез физични, химични и биологични механизми. В тях протичат едновременно аеробни и анаеробни процеси в различните слоеве на субстрата, което благоприятства както разграждането на органичните вещества, така и процесите на нитрификация и денитрификация. По този начин се осигурява ефективно намаляване на концентрациите на органични замърсители и азотни съединения (Bakhshoodeh et al., 2020).

По отношение на ефективността, аеробното пречистване достига 70–90% отстраняване на БПК и 60–80% на ХПК, анаеробните системи – 80–90% на БПК и 70–85% на ХПК, а изкуствените влажни зони – 60–80% на БПК,

50–70% на ХПК и 40–60% на амонячен азот (Wang & Qiao, 2024).

Усъвършенствани методи за третиране

Мембранните процеси включват микрофилтрация (MF), ултрафилтрация (UF), нанофилтрация (NF) и обратна осмоза (RO) (Dong, 2007; Yang et al., 2019). При микрофилтрацията и ултрафилтрацията се използва полупропусклива мембрана, която изпълнява ролята на селективна бариера, задържайки разтворени и суспендирани макромолекули, чиито размери не позволяват преминаването им през мембранните пори. Размерът на порите е в диапазона от 0,1 до 10 μm при микрофилтрацията и от 0,005 до 0,1 μm при ултрафилтрацията. Многобройни изследвания потвърждават ефективността на микрофилтрацията и ултрафилтрацията при отстраняването на високомолекулни органични съединения от потоци инфилтрат. Потенциалът за приложение на тези технологии е особено висок при обекти, където инфилтратът се характеризира с наличието на един доминиращ замърсител. Напредъкът в разработването на мембрани с по-висока производителност и повишена химическа устойчивост допринася за утвърждаването на микрофилтрацията и ултрафилтрацията като все по-ефективни и икономически обосновани методи за пречистване.

Обратната осмоза (RO) представлява процес, при който върху инфилтрата се прилага налягане, осигуряващо преминаването му през полупропусклива мембрана. Мембраната пропуска водните молекули, като същевременно задържа по-голямата част от разтворените замърсители. Системите за обратна осмоза могат да постигнат ефективност на отстраняване над 99% за широк спектър от замърсители, което ги прави незаменим елемент в технологични схеми, изискващи високо качество на пречиствения изходен поток. Въпреки високата си ефективност, обратната осмоза все още не намира широко приложение при третиране на инфилтрат от депа за отпадъци в голям мащаб. Това се дължи както на чувствителността на мембраните към замърсяване и увреждане, така и на сложния химичен състав и високото замърсяващо натоварване на инфилтрата. Поради тази причина технологията най-често се използва като допълнителен („полиращ“) етап след прилагането на конвенционални методи за пречистване. Обратната осмоза е ефективна при отстраняването на разтворени неорганични вещества, включително метали, металцианидни комплекси и други йонни форми, както и на органични съединения с висока молекулна маса, като например пестициди. За осигуряване на надеждна и продължителна експлоатация на мембраните е необходимо предварително третиране на инфилтрата, обикновено чрез комбинация от процеси, включващи филтрация, хлориране, адсорбция върху активен въглен и корекция на рН.

Усъвършенстваните окислителни процеси (AOPs) се характеризират със способността си да генерират силно реактивни частици, най-вече хидроксилни радикали, които разграждат широк спектър от замърсители. Сред най-широко прилаганите AOPs се открояват процесът на Фентън, озонирането и електрохимичното окисление (Wu et

al., 2021). Процесът на Фентън се отличава с висока ефективност при разграждането на органични замърсители чрез генериране на хидроксилни радикали в присъствието на железен катализатор и водороден пероксид (Babunonusami & Muthukumar, 2014). Методът е особено подходящ за третиране на инфилтрат с високо съдържание на трудно разгражими органични вещества, като осигурява 75–90% отстраняване на химичната потребност от кислород (ХПК) и 80–95% разграждане на специфични органични съединения (Pliego et al., 2015; El-Saadony et al., 2026). Въпреки високата си ефективност, конвенционалният процес на Фентън е свързан с редица практически ограничения. За оптимално генериране на хидроксилни радикали е необходимо поддържането на киселинна среда (рН 2,5–3,5), което налага корекция на рН както преди, така и след третирането. Това увеличава експлоатационната сложност на процеса и води до по-висок разход на реагенти.

Озонирането използва озон (O_3) като окислител за директно разграждане на замърсителите. Методът е особено ефективен при отстраняването на оцветяване (80–90%), миризми и определени органични съединения. Освен това озонирането повишава биоразградимостта на устойчивите органични вещества, което го прави подходящ предварителен етап преди биологично пречистване. Поради тези предимства технологията намира широко приложение в промишлените инсталации за третиране на инфилтрат, особено като „полиращ“ етап за обезцветяване и дезинфекция (El-Saadony et al., 2026). Основен недостатък на процеса е високата му енергоемкост, тъй като генерирането на озон на място изисква значителни количества електроенергия. Енергийните разходи обикновено са в диапазона 12–20 kWh/kg O_3 , което води до експлоатационни разходи от приблизително 1–3 USD/m³ обработен инфилтрат (Tripathi & Hussain, 2022).

Електрохимичното окисление използва електрически ток за окисление на замърсителите върху повърхността на електроди или в обема на разтвора. Чрез механизми на пряко и непряко окисление методът е способен да разгражда широк спектър от замърсители, включително багрила, фармацевтични съединения и сложни органични молекули (da Silva et al., 2021). Процесът е особено ефективен при третирането на инфилтрат от депа за отпадъци с високо съдържание на органични замърсители и амоняк. Прилагането му позволява отстраняване на 75–95% от ХПК и до 90% от амонячния азот, което го определя като перспективна технология за пречистване на силно замърсени отпадъчни води. Допълнителни предимства на метода са неговата оперативна гъвкавост и ограничената необходимост от използване на химически реагенти, въпреки че високата консумация на електроенергия и износването на електродите могат да ограничат икономическата му ефективност при приложение в голям мащаб (Wang & Qiao, 2024).

Заклучение

Изборът на подходяща технология за пречистване на инфилтратни води се основава както на възрастта на депото, така и на физикохимичните характеристики на инфилтрата. Инфилтратите от нови депа се отличават с висока биоразградимост и значително органично натоварване, поради което биологичните методи,

включително аеробни и анаеробни процеси, представляват най-ефективното решение. С напредване на възрастта на депото биоразградимостта намалява, а концентрациите на амониен азот и трудноразградими органични съединения се увеличават, което налага прилагането на комбинирани технологии, съчетаващи биологични и физикохимични методи. При стабилизирани инфилтрати от стари депа, характеризиращи се с наличие на трудноразградими органични вещества и устойчиви азотни съединения, водеща роля имат процеси като мембранна филтрация и усъвършенствани окислителни методи. В случаите на наличие на специфични замърсители, като тежки метали и ксенобиотични органични съединения, е необходимо прилагането на специфични техники като адсорбция или йонообмен. Следователно, максимална ефективност на пречистването може да бъде постигната чрез адаптиране на технологичната схема към променящия се състав на инфилтрата през различните етапи от жизнения цикъл на депото.

Литература

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1275–1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S., & Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 274–298. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.045>
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., et al. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125912. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>
- Anjum, M., Anees, M., Qadeer, S., Khalid, A., Kumar, R., & Barakat, M. A. (2023). A recent progress in the leachate pretreatment methods coupled with anaerobic digestion for enhanced biogas production: Feasibility, trends, and techno-economic evaluation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1), 763. <https://doi.org/10.3390/ijms24010763>
- Aziz, H. A., Ramli, S. F., & Hung, Y. T. (2023). Physicochemical technique in municipal solid waste (MSW) landfill leachate remediation: A review. *Water*, 15, 1249. <https://doi.org/10.3390/w15061249>
- Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 557–572. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., et al. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Bashir, M. J. K., Ibrahim, N., Ismail, M. N., & Jaya, M. A. (2016). Physical treatment technologies for landfill leachate: Performance and limitation. In H. Aziz & S. Amr (Eds.), *Control and Treatment of Landfill Leachate for Sanitary Waste Disposal* (pp. 250–285). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9610-5.ch011>
- Beegle, J. R., & Borole, A. P. (2018). Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.057>
- Bhambore, N., & Suresh Kumar, M. (2022). Municipal solid waste generation, management scenarios, and leachate treatment using sequencing batch biofilter granular reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, 167, 454–468. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.027>
- Bouaouda, S., Souabi, S., Bouyakhssass, R., Taleb, A., Madinzi, A., & Anouzla, A. (2023). Techniques for treating leachate discharges: A critical review. *European Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 8, 573–599. <https://doi.org/10.1007/s41207-023-00366-2>
- Chen, H., Xu, H., Zhong, C., Liu, M., Yang, L., He, J., Sun, Y., Zhao, C., & Wang, D. (2024). Treatment of landfill leachate by coagulation: A review. *Science of the Total Environment*, 912, 169294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169294>
- Christensen, T. H., Cossu, R., & Stegmann, R. (1992). *Landfilling of waste: Leachate*. Chapman & Hall.
- Clemente, E., Domingues, E., Quinta-Ferreira, R. M., Leitão, A., & Martins, R. C. (2024). European and African landfilling practices: An overview on MSW management, leachate characterization and treatment technologies. *Journal of Water Process Engineering*, 66, 105931. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105931>
- da Silva, S. W., Welter, J. B., Albornoz, L. L., Heberle, A. N. A., Ferreira, J. Z., & Bernardes, A. M. (2021). Advanced electrochemical oxidation processes in the treatment of pharmaceutical-containing water and wastewater: A review. *Current Pollution Reports*, 7, 146–159. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00176-6>
- Dagwar, P. P., & Dutta, D. (2024). Landfill leachate: A potential challenge towards sustainable environmental management. *Science of the Total Environment*, 926, 171668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171668>
- Daniel, A. N., Ekeleme, I. K., Onuigbo, C. M., Ikpeazu, V. O., & Obiekezie, S. O. (2021). Review on effect of dumpsite leachate to the environmental and public health implication. *GSC Advanced Research and Reviews*, 7(2), 051–060. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2021.7.2.0097>
- Danthurebandara, M., Van Passel, S., Nelen, D., Tielemans, Y., & Van Acker, K. (2012). *Environmental and socio-economic impacts of landfills*. [Publication details unavailable].
- De, S., Hazra, T., & Dutta, A. (2019). Sustainable treatment of municipal landfill leachate by combined association of air stripping, Fenton oxidation, and enhanced coagulation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 49. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7171-8>
- Dong, Y. (2007). *Landfill leachate treatment case study, SRV Återvinning* (Master's thesis). Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Eggen, T., Moeder, M., & Arukwe, A. (2010). Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants. *Science of the Total Environment*, 408(21), 5147–5157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.049>

- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Fahmy, M. A., Mohammed, D. M., Salem, H. M., Abd El-Mageed, T. A., Abu-Elsaoud, A. M., Alsyad, K. M., Ahmed, A. E., Al-Najjar, M. A. A., El-Tarabily, K. A., & AbuQamar, S. F. (2026). Hazardous landfill leachate: Integrated treatment strategies, regulatory frameworks, and circular economy perspectives. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 312, 119878. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2026.119878>
- Environmental Studies Institute. (2025, October 30). *Landfill leachate: Generation, characteristics, and sources*. [<https://evs.institute/disposal-of-wastes/landfill-leachate-generation-characteristics-sources/>]
- Hin, S. F. T., Harun, M. H. C., Rasit, N., Yatim, N. I., Hairom, N. H. H., Yusoff, W. M. H. W., Mohammad, A. W., & Hamzah, S. (2025). Characteristics, environmental impacts, and evolution of landfill leachate treatment technologies: A review. *Letters in Applied NanoBioScience*, 14(4), Article 266. <https://doi.org/10.33263/LIANBS144.266>
- Joshi, R., & Pant, D. (2017). Landfill biodegradation process and leachate. In V. C. Kalia (Ed.), *Waste bioremediation* (pp. 233–247). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4>
- Lakhout, A. (2026). Landfill emissions and environmental challenges: A comprehensive review. *Fuel*, 417, 138671. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138671>
- Morling, S. (2007). *Landfill leachate: Generation, composition, and some findings from leachate treatment at Swedish plants*. [Publication details unavailable].
- Nuansawan, N., Witthayaphirom, C., Sawasdee, A., Chiemchaisri, C., & Shoda, M. (2023). Removals of endocrine disrupting compounds during landfill leachate treatment in two-stage aerobic sequential batch reactor: Effect of *Alcaligenes faecalis* No. 4 bioaugmentation. *Emerging Contaminants*, 9, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100223>
- Parvin, F., & Tareq, S. M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: A systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3>
- Pires, A., & Martinho, G. (2019). Waste hierarchy index for circular economy in waste management. *Waste Management*, 95, 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.014>
- Pliego, G., Zazo, J. A., García-Muñoz, P., Muñoz, M., Casas, J. A., & Rodríguez, J. J. (2015). Trends in the intensification of the Fenton process for wastewater treatment: An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(24), 2611–2692. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1025646>
- Research Clue. (2014). *Environmental impact of leachate pollution of ground water supplies*. <https://nairaproject.com/projects/1364.html>
- Schwarzbauer, J., Heim, S., Brinker, S., & Littke, R. (2002). Occurrence and alteration of organic contaminants in seepage and leakage water from a waste deposit landfill. *Water Research*, 36(9), 2275–2287. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00452-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00452-3)
- Tripathi, S., & Hussain, T. (2022). Water and wastewater treatment through ozone-based technologies. In M. Shah, S. Rodriguez-Couto, & J. Biswas (Eds.), *Development in wastewater treatment research and processes* (pp. 139–172). Elsevier.
- Tu, A., Zhang, Z., Hao, S., & Li, X. (2020). Review on landfill leachate treatment methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 565(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012038>
- Wan, Y., Chen, X., Liu, Q., Hu, H., Wu, C., & Xue, Q. (2022). Informal landfill contributes to the pollution of microplastics in the surrounding environment. *Environmental Pollution*, 293, 118586. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118586>
- Wang, J., & Qiao, Z. (2024). A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1439128. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>
- Wu, C., Chen, W., Gu, Z., & Li, Q. (2021). A review of the characteristics of Fenton and ozonation systems in landfill leachate treatment. *Science of the Total Environment*, 762, 143131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143131>
- Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A review on landfill leachate treatment technologies: Comparative analysis of methods and process innovation. *Applied Sciences*, 15(7), 3878. <https://doi.org/10.3390/app15073878>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Nhung, T. C., Hemavathy, R. V., Jawahar, M. J., Neshanthini, J. P., & Rangasamy, G. (2022). A review on landfill system for municipal solid wastes: Insight into leachate, gas emissions, environmental and economic analysis. *Chemosphere*, 309 (Part 1), 136627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136627>
- Yang, Z., Zhou, Y., Feng, Z., Rui, X., Zhang, T., & Zhang, Z. (2019). A review on reverse osmosis and nanofiltration membranes for water purification. *Polymers*, 11(8), 1252. <https://doi.org/10.3390/polym11081252>
- Yatoo, A. M., Hamid, B., Sheikh, T. A., Ali, S., Bhat, S. A., Ramola, S., Kumar, S. (2024). Global perspective of municipal solid waste and landfill leachate: Generation, composition, eco-toxicity, and sustainable management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 23363–23392.