

نگاهی کلی بر مشخصات آلاینده‌های شیرابه و روش‌های تصفیه آن

عباس طالبی*^۱، تقی عبادی^۲

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخ تصویب: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

چکیده

دفن پسماند از مقبول‌ترین و به صرفه‌ترین روش‌های مدیریت پسماندهای شهری به شمار می‌آید. اما با این وجود جریان یافتن شیرابه از محل دفن، یکی از مهم‌ترین معایب آن است چرا که شیرابه ترکیبی بسیار ناهمگن و متغیر است که انتشار آن در محیط می‌تواند منجر به افزایش خطر سمیت و تهدید سلامت عمومی شود. تحقیق حاضر با هدف افزایش آگاهی عموم جامعه نسبت به مشخصات و مخاطرات آلاینده‌های موجود در ترکیب شیرابه و مروری کلی بر روش‌های مورد استفاده برای تصفیه شیرابه صورت پذیرفته است. که با بررسی مهم‌ترین تحقیقات مرتبط با این حوزه پژوهشی مشاهده شد آلاینده‌های موجود در ترکیب شیرابه را می‌توان در چهار گروه مواد آلی محلول، ترکیبات معدنی ماکرو، فلزات سنگین و ترکیبات آلی زئوبیوتیک در نظر گرفت. همچنین مشخص شد روش‌های به کار گرفته شده برای تصفیه شیرابه را نیز می‌توان در سه گروه فرایندهای بیولوژیکی، فیزیکی- شیمیایی و تلفیقی دسته‌بندی نمود که از این بین، گستره کاربرد روش‌های بیولوژیکی سهم بیشتری را به خود اختصاص داده است.

کلید واژه‌ها: آلاینده، پسماند، دفن، تصفیه، شیرابه.



سرآغاز

مدیریت و دفع پسماندهای جامد شهری، یکی از مهم‌ترین بحران‌های محیط‌زیستی اکثر کشورهای جهان است. طبق آمار بانک جهانی در سال ۲۰۲۲ سالانه تقریباً ۲/۰۱ میلیارد تن پسماند جامد شهری در سطح جهان تولید شده است که حداقل ۳۳ درصد از آن به روشی نا ایمن، مدیریت و دفع شده است. علاوه بر این پیش‌بینی شده است میزان تولید پسماندهای جامد شهری تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۳/۴۰ میلیارد تن در سال افزایش یابد که این مقدار پسماند، بیش از دو برابر رشد جمعیت در مدت مشابه است. از جمله روش‌های مختلفی که تاکنون برای مدیریت این حجم از پسماند به کار گرفته شده است، می‌توان به کاهش از مبدأ، استفاده مجدد، بازیافت، کمپوست، سوزاندن و دفن بهداشتی اشاره نمود، که عموماً در کشورهای با سطح درآمد پایین، روش دفن به عنوان بهترین، آسان‌ترین و اقتصادی‌ترین راهکار برای مدیریت و دفع پسماندها به کار گرفته می‌شود (Nanda & Berruti, 2021).

استفاده از روش دفن برای مدیریت پسماندها، اگر چه از قابلیت اجرایی بالایی برخوردار است، اما پیامدهای ثانویه آن همچون جریان یافتن شیرابه از محل دفن پسماند، می‌تواند تهدید جدی برای محیط‌زیست به شمار آید. چرا که شیرابه ترکیبی سمی و خطرناک است که تاکنون بالغ بر ۲۰۰ آلاینده مختلف در آن شناسایی شده است که انتشار هر یک از این‌ها می‌تواند منجر به سطوح بالایی از سمیت و زمینه‌ساز آلودگی منابع آب، خاک و محیط اطراف شود (Luo et al., 2020, Nanda & Berruti, 2021). لذا در تحقیق حاضر سعی بر آن شده است با بررسی مهم‌ترین تحقیقات مرتبط با این حوزه پژوهشی، تصویری جامع از مشخصات و آلاینده‌های موجود در ترکیب شیرابه ارائه گردد. تا مطالعه آن بتواند در جهت افزایش آگاهی محیط‌زیستی عموم جامعه و همچنین در نظر گرفتن تمهیدات متناسب با مدیریت و تصفیه شیرابه، مؤثر واقع شود.

شیرابه

شیرابه ترکیبی بسیار ناهمگن و متغیر با رنگ تیره و بوی قوی است، که در نتیجه تخریب ماتریس پسماندها از طریق فرایندهای فیزیکی (نفوذ، رواناب و تبخیر)، شیمیایی (اکسیداسیون، تجزیه و ترسیب) و بیولوژیکی (استات‌سازی^(۱)،

متان‌سازی^(۲) و نیتریفیکاسیون) در سلول‌های محل دفن تولید می‌شود (Wijekoon et al., 2022). کمیت شیرابه تولید شده در یک محل دفن پسماند عمدتاً تحت تأثیر شرایط اقلیمی همچون میزان بارندگی، تبخیر و تعرق، رواناب‌های سطحی، نفوذ آب‌های زیرزمینی، میزان تراکم خاک و نحوه عملیاتی محل دفن پسماند است و کیفیت آن نیز به عوامل عملیاتی و محیطی بسیاری همچون ترکیب و درصد رطوبت پسماند، هیدروژئولوژی محل دفن، تغییرات اقلیمی، پویایی واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی و سن محل دفن پسماند وابسته است (Reshadi et al., 2020, Luo et al., 2020).

به‌طور کلی تجزیه پسماندها در محل دفن در پنج فاز هوازی اولیه، اسیدوژنیک بی‌هوازی، متان‌زایی، تثبیت متان و تجزیه هیومیک صورت می‌پذیرد. در فاز هوازی اولیه، اکسیژن موجود در پسماندها توسط میکروارگانیسم‌ها برای تولید دی‌اکسیدکربن مصرف می‌شود، که در این فاز دمای پسماندها از طریق رخداد واکنش‌های بیولوژیکی گرمازا افزایش می‌یابد. در فاز دوم باکتری‌های استوژنیک و تخمیری، اسیدهای چرب فرار با زنجیره بلند و پلیمرهای بزرگ را به اسید استیک و مونومرهای ساده‌تر تجزیه می‌کنند که انجام این واکنش‌ها منجر به کاهش pH شیرابه و افزایش غلظت فلزات سنگین در آن می‌شود.

فاز سوم مرحله متان‌زایی است که در آن اسیدهای انباشته شده از فاز اسیدی توسط باکتری‌های متانوژن به متان و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شوند و سرعت تولید متان را افزایش می‌دهند. pH شیرابه در این فاز به دلیل مصرف اسیدهای تولید شده افزایش می‌یابد. در فاز چهارم که برای مدت زمان بسیار طولانی ادامه دارد، هیدرولیز مواد پلیمری برای کنترل تولید متان صورت می‌پذیرد. در فاز پنجم نیز تجزیه مواد هیومیک در شرایط بی‌هوازی انجام می‌شود که ترکیبات تشکیل شده در این مرحله از ساختار نسبتاً پیچیده‌ای برخوردار هستند (Wijekoon et al., 2022). در شکل (۱) شماتیکی از تولید شیرابه در محل دفن پسماند نشان داده شده است.

آلاینده‌های موجود

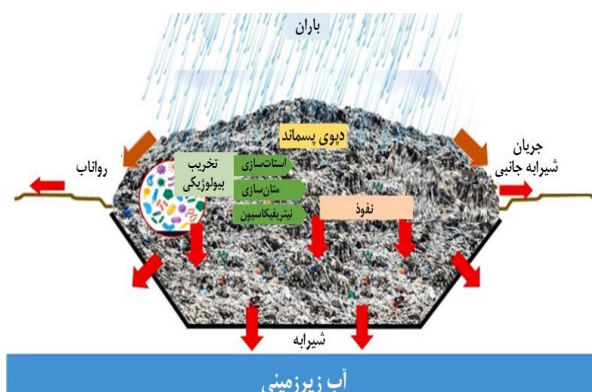
تاکنون طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها در ترکیب شیرابه شناسایی شده است، که به طور کلی آن‌ها را می‌توان در چهار نوع عمده و به شرح زیر طبقه‌بندی نمود (Wijekoon et al., 2022):

- دسته سوم آلاینده‌های شیرابه مربوط به فلزات سنگین است. این عناصر شامل روی، نیکل، کروم، کادمیوم، مس، سرب و متالوئیدهایی مانند جیوه، کبالت و آرسنیک هستند که منشأ آن‌ها را می‌توان به باتری‌ها، قطعات خودرو، رنگ‌ها، لامپ و سیم‌های برق موجود در پسماند مرتبط دانست. حضور این عناصر در شیرابه به علت ماهیت زیست‌تخریب‌ناپذیر و اثرات نامطلوبی برای انسان و سایر موجودات زنده شود. غلظت فلزات سنگین در شیرابه به سن محل دفن پسماند بسیار وابسته و متغیر است، به گونه‌ای که در فاز استات‌سازی به دلیل تولید اسیدهای آلی در مراحل اولیه تجزیه و کاهش pH شیرابه، حلالیت و غلظت فلزات سنگین موجود در شیرابه افزایش می‌یابد. ولی با ورود به فاز تثبیت متان، به دلیل افزایش pH و تشکیل کمپلکس‌هایی با مواد آلی محلول، غلظت این عناصر نیز کاهش می‌یابد.

- دسته چهارم آلاینده‌های شیرابه مربوط به ترکیبات آلی زئوبیوتیک^(۴) است. عموماً در غلظت‌های پایین و کمتر از یک میلی‌گرم بر لیتر و برای ترکیبات جداگانه گزارش شده‌اند. از این نوع آلاینده‌ها می‌توان به بنزن، تولوئن، فنل‌ها، فتالات‌ها و هیدروکربن‌های هالوژنه اشاره کرد، که منبع اولیه آن‌ها مواد شیمیایی خانگی و صنعتی، سموم و کودهای شیمیایی است.

به طور کلی مشخصات کیفی شیرابه‌های محل دفن پسماند با چندین پارامتر فیزیکی- شیمیایی مانند pH، COD، BOD، مواد جامد معلق، آمونیاک، نیتروژن کل، کلراید، فسفر و فلزات سنگین ارزیابی می‌شود. این مشخصات کیفی به عوامل عملیاتی و محیطی بسیاری همچون ترکیب و درصد رطوبت پسماند، هیدروژئولوژی محل دفن، تغییرات اقلیمی و سن محل دفن پسماند وابسته است. که از این میان، سن محل دفن از مهم‌ترین متغیرهای اصلی و تعیین‌کننده ویژگی‌های کیفی شیرابه است و غلظت هر یک از آلاینده‌های موجود در ترکیب شیرابه ارتباط مستقیمی با آن دارد (Luo et al., 2020). در جدول (۱) طبقه‌بندی از شیرابه با توجه به تغییرات ترکیبات آن ارائه شده است.

مطابق جدول (۱) با افزایش سن محل دفن پسماند، نسبت BOD/COD به مرور کاهش می‌یابد، چرا که اغلب مواد قابل



شکل (۱): شماتیک از تولید شیرابه در محل دفن پسماند (Wijekoon et al., 2022)

- دسته اول این آلاینده‌ها مربوط به مواد آلی محلول^(۳) و شامل ترکیباتی همچون اسیدهای چرب فرار، اسیدهای آب‌دوست و مواد آلی نسوز مانند مواد هیومیک است، که با داشتن گروه‌های عاملی مختلف می‌توانند با سایر ترکیبات موجود در شیرابه همچون آلاینده‌های معدنی، آلی و یا فلزات سنگین واکنش داشته باشند. رنگ قهوه‌ای مایل به تیره شیرابه نیز، ناشی از حضور این نوع ترکیبات و ایجاد کمپلکس‌هایی بین مواد هیومیک و فولویک با کلئیدهای هیدروکسید آهن است. با این حال از آن جا که تعیین مجزای هر کدام از این ترکیبات در شیرابه به صورت تجربی دشوار است، لذا این آلاینده‌ها به طور کلی با مشخصه‌هایی مانند COD و BOD تعیین می‌شوند. از این رو غلظت‌های بالای COD و BOD در شیرابه نشان دهنده وجود مقادیر زیاد مواد آلی محلول در آن است و نسبت BOD/COD پایین (به عنوان شاخص تجزیه بیولوژیکی) نشان‌دهنده غلظت کم اسیدهای چرب فرار و مقادیر بالاتر ترکیبات هیومیک و فولویک در شیرابه است.

- دسته دوم آلاینده‌های شیرابه ترکیبات معدنی ماکرو هستند، که شامل آمونیاک ($\text{NH}_4\text{-N}$)، پتاسیم (K^+)، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، هیدروژن کربنات (HCO_3^-)، آهن (Fe^{2+})، کلراید (Cl^-) و سولفات (SO_4) می‌باشند، که معمولاً غلظت آن‌ها وابسته به سن محل دفن پسماند است. به عنوان مثال در فاز متانوژن با افزایش pH شیرابه، برخی کاتیون‌ها (مانند کلسیم، منیزیم و آهن) جذب مواد آلی می‌شوند و غلظت کمتری از آن‌ها در شیرابه باقی می‌ماند.

معدنی در غلظتی فراتر از حد مجاز می‌تواند باعث بیماری‌هایی مانند میناماتا^(۶)، سندرم کودک آبی^(۷)، فیروز ریوی^(۸)، پنوموکونیوز^(۹)، سیروز کبدی^(۱۰)، آنسفالوپاتی^(۱۱)، آرژیری^(۱۲)، آلویسی^(۱۳) و حتی سرطان شوند (Nanda & Berruti, 2021). افزون بر این ماندگاری، ماهیت غیرقابل تجزیه زیستی، ضریب غنی‌شدگی بالا و توانایی ایجاد سمیت حتی در غلظت‌های پایین برخی از این آلاینده‌ها همچون فلزات سنگین و ترکیبات زئوبیوتیک، می‌تواند منجر به کاهش رشد و نمو، اختلال در غدد درون‌ریز و ایمنی و حتی مرگ انسان شود (Wijekoon et al., 2022).

علاوه بر این نفوذ شیرابه به منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند منجر به افزایش غلظت مواد مغذی و بروز پدیده یوتروفیکاسیون^(۱۴) (تغذیه گرای) شود، که این موضوع باعث کاهش غلظت اکسیژن در بسترهای آبی، افزایش غلظت مواد آلی طبیعی^(۱۵) و کاهش کیفیت آب شرب خواهد داشت (Thomsen et al., 2012).

تجزیه بیولوژیکی که با پارامتر BOD اندازه‌گیری می‌شوند، با افزایش سن محل دفن و در فاز تثبیت متان تجزیه می‌شوند و این در حالی است که مواد آلی غیر قابل تجزیه بیولوژیکی که بر میزان COD تاثیر گذارند، تا این مرحله بدون تغییر باقی می‌مانند. علاوه بر این با گذشت زمان و رسیدن محل‌های دفن پسماند به فاز متان‌زایی، pH شیرابه افزایش می‌یابد، که این مسأله باعث رسوب فلزات سنگین و کاهش غلظت آن‌ها می‌شود. لذا عموماً با توجه به سن محل دفن، شیرابه را می‌توان به سه دسته جوان (کمتر از ۵ سال)، متوسط^(۵) (۵ تا ۱۰ سال) و تثبیت شده (بیشتر از ۱۰ سال) طبقه‌بندی نمود.

خطرات محیط‌زیستی

آلاینده‌های موجود در شیرابه، می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت انسان و سایر جانداران باشد. در شکل (۲) اثرات مضر کوتاه مدت و بلند مدتی که آلاینده‌های شیرابه می‌توانند بر سلامت انسان داشته باشد، نشان داده شده است. بعضی از این آلاینده‌ها همچون آمونیوم، فلزات سنگین، متالوئیدها و مواد

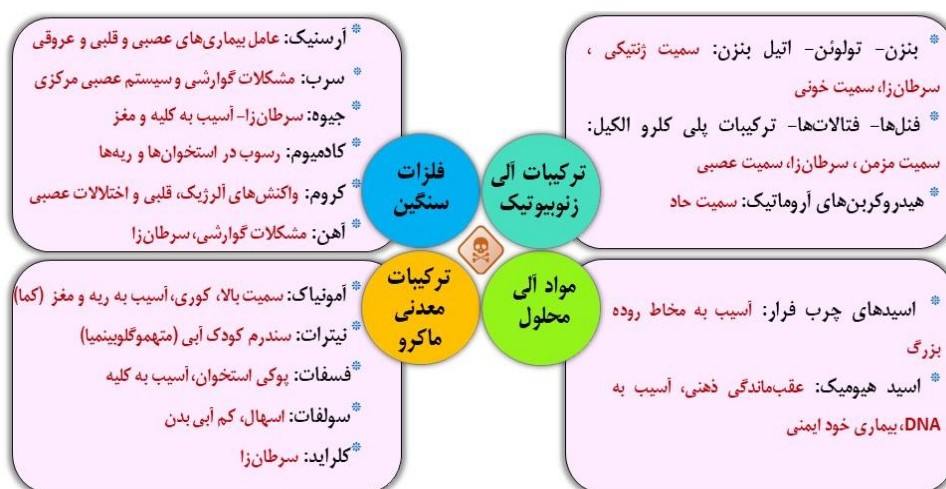
جدول (۱): طبقه بندی شیرابه محل دفن پسماند با توجه به تغییرات سن (Costa et al., 2019)

پارامتر (mg/L)	سن شیرابه (برحسب سال)			
	۰-۵	۵-۱۰	۱۰-۲۰	بیشتر از ۲۰
pH	۳-۶	۶-۷	۷-۷/۵	۷/۵
BOD	۱۰۰۰-۲۵۰۰	۱۰۰۰-۴۰۰۰	۵۰-۱۰۰۰	< ۵۰
COD	۱۵۰۰-۴۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰۰-۵۰۰۰	< ۱۰۰۰
TKN	۱۵۰۰-۴۵۰۰	۴۰۰-۸۰۰	۷۵-۳۰۰	< ۵۰
NH ₄ -N	۱۵۰۰-۴۲۵۰	۲۵۰-۷۰۰	۵۰-۲۰۰	< ۳۰
TDS	۱۰۰۰-۲۵۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۰۰-۵۰۰	< ۱۰۰۰
Cl ⁻	۱۰۰۰-۳۰۰۰	۵۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰-۵۰۰	< ۱۰۰

- تصفیه شیرابه در محل دفن پسماند تا سطحی ایمن و قابل رهاسازی در محیط‌زیست
روش‌های مورد استفاده برای تصفیه شیرابه را نیز می‌توان در سه گروه کلی فرایندهای بیولوژیکی، فیزیکی- شیمیایی و تلفیقی دسته‌بندی نمود (Siddiqi et al., 2022, Luo et al., 2020)، که در ادامه شرح مختصری از این روش‌ها ارائه شده است.

تصفیه شیرابه

آگاهی از تهدیدات و پتانسیل سمی شیرابه، لزوم برنامه‌ریزی برای جمع‌آوری و تصفیه آن را دو چندان می‌نماید. عموماً مدیریت شیرابه می‌تواند به سه حالت زیر در نظر گرفته شود؛
- انتقال و بازچرخانی مجدد شیرابه به محل دفن پسماند و یا تخلیه آن در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب
- جمع‌آوری در حوضچه‌های کم عمق به منظور انجام عملیات تبخیر و تخلیه مجدد لجن باقی‌مانده به محل دفن پسماند



شکل (۲): اثرات کوتاه مدت و بلند مدت آلاینده‌های شیرابه بر سلامت انسان (Wijekoon et al., 2022)

روش‌های بیولوژیکی

فرایندهای بیولوژیکی به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و مقرون به صرفه بودن می‌توانند به دو روش هوازی و بی‌هوازی برای حذف غلظت‌های بالای مواد آلی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، بیفنیل‌های پلی کلر شده و هالوژن‌های آلی موجود در شیرابه به کار گرفته شوند (Luo et al., 2020).

روش هوازی برای تصفیه شیرابه‌های جوان که نسبت BOD/COD در آن‌ها بالاتر از ۰/۵ است و حاوی غلظت‌های بالاتری از ترکیبات آلی محلول و معلق می‌باشند، کارایی مناسبی دارد. در این روش میکروارگانیسم‌های هوازی با استفاده از اکسیژن، ترکیبات آلی شیرابه را به گاز کربن‌دی‌اکسید تجزیه می‌کنند. همچنین حذف نیتروژن در شیرابه‌های قدیمی با استفاده از روش هوازی و با به کارگیری فرایندهای نیتریفیکاسیون و دی‌نیتریفیکاسیون نیز امکان‌پذیر است. رایج‌ترین فرایندهای تصفیه هوازی شیرابه، شامل لاگون هوادهی^(۱۶)، فرایند لجن فعال^(۱۷)، راکتور ناپیوسته متوالی^(۱۸)، تماس‌دهنده‌های بیولوژیکی چرخان^(۱۹)، صافی چکنده^(۲۰)، راکتور بیوفیلمی با بستر متحرک^(۲۱) و راکتور بیولوژیکی غشائی^(۲۲) است (Siddiqi et al., 2022).

در روش بی‌هوازی از میکروارگانیسم‌های متانوژن برای تجزیه مواد آلی به مخلوطی از بیوگاز (شامل کربن‌دی‌اکسید، متان، آمونیاک)، انواع اسیدهای چرب فرار و ترکیبات آلی ساده‌تر استفاده می‌شود. از مزایای این روش نسبت به روش هوازی می‌توان به کاهش قابل توجه مقدار لجن تولیدی، تثبیت بیشتر

مواد آلی و امکان تولید انرژی از بیوگاز خروجی اشاره کرد. هضم بی‌هوازی^(۲۳)، فیلتر بی‌هوازی^(۲۴) و راکتور بی‌هوازی با جریان رو به بالا^(۲۵) از کاربردی‌ترین فرایندهای بی‌هوازی هستند، که در تصفیه شیرابه به کار گرفته شده‌اند. با این حال اگرچه کارایی روش‌های بی‌هوازی برای حذف غلظت‌های بالای مواد آلی شیرابه مناسب هستند، اما زمان ماند طولانی و حساسیت نسبت به دما از مهم‌ترین معایب آن‌ها به شمار می‌آید (Siddiqi et al., 2022, Peng, 2017).

روش‌های فیزیکی- شیمیایی

عموماً تصفیه شیرابه‌هایی با سن کم و BOD/COD بالا، با استفاده از فرایندهای بیولوژیکی کاملاً مؤثر بوده است. با این حال کاربرد فرایندهای بیولوژیکی در تصفیه شیرابه‌هایی که حاوی ترکیبات سمی و مقاوم آلی هستند، چندان اثربخش نبوده است. بدین‌منظور از اوایل سال ۱۹۷۰ میلادی استفاده از فرایندهای فیزیکی- شیمیایی برای پیش تصفیه و یا تصفیه کامل شیرابه مورد توجه قرار گرفته است (Gautam et al., 2019) و تاکنون در تحقیقات بسیاری کارایی استفاده از این نوع فرایندها به منظور حذف ترکیبات آلی مقاوم همچون اسید هیومیک و فولویک و یا سایر ترکیبات غیرقابل تجزیه بیولوژیکی مانند فلزات سنگین در شیرابه را گزارش کرده‌اند. از رایج‌ترین روش‌های فیزیکی- شیمیایی می‌توان به فرایندهای انعقاد و لخته‌سازی، ترسیب شیمیایی^(۲۶)، عریان‌سازی با هوا^(۲۷)، جذب،

فیلتراسیون غشایی^(۲۸)، الکتروشیمیایی^(۲۹)، تبادل یونی^(۳۰) و (۲۰۲۰). در جدول (۲) شرح مختصری از هر یک از این فرایندها فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته^(۳۱) اشاره نمود (Luo et al.,) ارائه شده است.

جدول (۲): روش‌های فیزیکی-شیمیایی برای تصفیه شیرابه (Siddiqi et al., 2022, Luo et al., 2020)

روش مورد استفاده	توضیح مختصر	مزایا	معایب
انعقاد و لخته‌سازی	شامل دو مرحله استفاده از مواد منعقدکننده (همچون نمک‌های آهن یا آلومینیوم) برای تنظیم pH، ناپایداری و تشکیل لخته و سپس جداسازی مواد جامد از فاز مایع با روش‌های متداول جداسازی است	روش کار ساده، مقرون به صرفه و مناسب برای حذف آلاینده‌های کلوئیدی و سورفکتانت‌ها، فلزات سنگین، اسیدهای چرب و مواد هیومیک	حساسیت به pH، تولید لجن و افزایش غلظت آلومینیوم و آهن در فاز مایع
ترسیب شیمیایی	استفاده از مواد شیمیایی همچون آهک هیدراته، هیدروکسید سدیم و غیره برای تبدیل یون‌های حل شده در محلول به جامدات غیر محلول و سپس انجام عملیات ته‌نشینی	کاربرد آسان و اثربخشی مناسب، کم بودن هزینه‌های بهره‌برداری	حساسیت به pH، راندمان پایین در حذف COD، تولید لجن و نیاز به دوز بالای رسوب‌کننده.
عربان‌سازی با هوا	دمیده شدن حجم زیادی از هوا به منظور افزایش انتقال جرم مواد نامطلوب از فاز مایع به گاز	روشی ساده و مقرون به صرفه، کارایی مناسب در حذف آمونیم، هیدروژن سولفید، متان و مواد آلی فرار	آلودگی هوا و انتشار بوی بد در اثر عدم کنترل آمونیاک و هیدروژن سولفید، بازده کم در حذف COD
جذب	یک فرایند انتقال جرم است، که در آن ترکیبات فاز مایع از طریق پیوندهای فیزیکی و شیمیایی به سطح یک ماده جامد متصل می‌شوند. پرکاربردترین مواد جاذب، کربن فعال گرانولی یا کربن پودری هستند	راندمان مناسب جاذب کربن فعال برای حذف آلاینده‌های آلی و غیرآلی و ترکیبات آروماتیک، واکنش‌پذیری کم با اسید و باز	گران بودن کربن فعال گرانولی، نیاز به احیای دائم ستون کربن فعال.
فیلتراسیون غشایی	بر اساس اصل نفوذپذیری انتخابی یون‌ها و عبور آلاینده‌ها از یک مانع نازک با ایجاد گرادیان غلظت و نیروی فشار عمل می‌کند، که بر حسب اندازه مجاز ذرات، به چهار گروه اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، میکروفیلتراسیون، دسته‌بندی می‌شوند	راندمان بالای تصفیه	نیاز به پیش‌تصفیه، هزینه انرژی بسیار بالا برای سیستم پمپاژ تحت فشار و رسوب‌گیری و پوسته پوسته شدن غشا
الکتروشیمیایی	برقراری جریان الکتریکی بین کاتد و آند برای انتقال الکترون بین محلول الکترولیت و الکترودها به منظور معدنی‌سازی آلاینده‌ها	سازگاری با محیط‌زیست، سهولت در بهره‌برداری و راندمان مناسب	نیاز به تعویض الکترودها، تشکیل محصولات جانبی کلردار، مصرف بالا انرژی
تبادل یونی	حذف آلاینده با تبادل کاتیون‌ها یا آنیون‌ها بین محیط آلاینده و مواد تبادل یونی. که به طور معمول از رزین‌ها و مواد پلیمری مصنوعی به عنوان مواد تبادل یونی استفاده می‌شود	راندمان مناسب در حذف یون‌های فلزی و مواد آلی محلول	نیاز به پیش‌تصفیه شیرابه و بازسازی پلیمرها و رزین‌ها گران‌قیمت بودن پلیمرها و رزین‌های مصنوعی
فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته	به کارگیری عوامل اکسیدکننده‌ای همچون هیدروژن پراکسید، ازن و غیره، به منظور تولید گونه‌های فعالی مانند رادیکال هیدروکسیل، برای تجزیه و معدنی‌سازی آلاینده‌ها و تبدیل آن‌ها به آب، دی‌اکسید کربن و مواد بی‌خطر	کارایی مناسب برای حذف آلاینده‌های آلی مقاوم، ترکیبات سمی و معدنی همچون مواد آلی، سازگاری با محیط‌زیست	نیاز به مقادیر pH پایین، نیاز به دوز بالای مواد اکسیدکننده، تولید لجن اضافی، مصرف زیاد انرژی الکتریکی

روش‌های تلفیقی

تحقیقات نشان داده است که معمولاً کارایی روش‌های یکپارچه، که تلفیقی از فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی محسوب می‌شوند، نسبت به حالتی که صرفاً از یک فرایند مجزا برای تصفیه شیرابه استفاده می‌شود، راندمان و کارایی بیشتری خواهند داشت (Siddiqi et al., 2022). که این موضوع را می‌توان به هم‌افزایی مزیت‌های مربوط به هر روش و هم‌پوشانی محدودیت‌های هر یک از آن‌ها با یکدیگر مرتبط دانست. به طور کلی گستره کاربرد فرایندهای تلفیقی در تصفیه شیرابه می‌تواند در راستای بهبود راندمان تصفیه بیولوژیکی، حذف ترکیبات مقاوم زیستی و یا تصفیه تکمیلی شیرابه باشد. روش‌های تلفیقی می‌توانند به سه حالت ترکیب دو یا چند روش تصفیه بیولوژیکی، ترکیب دو یا چند روش فیزیکی- شیمیایی و یا ترکیب روش‌های بیولوژیکی و فیزیکی- شیمیایی با یکدیگر به کار گرفته شوند. با این حال انتخاب هر یک از این حالت‌ها مستلزم آن است که مواردی همچون هزینه، راندمان و اثرات آلاینده‌های ثانویه مورد ارزیابی قرار داده شوند (Luo et al., 2020).

روند تحقیقات مرتبط با تصفیه شیرابه

هر ساله مطالعات بسیاری با هدف بررسی مزایا و معایب هر یک از فرایندهای تصفیه شیرابه انجام می‌شود که یکی از انواع این مطالعات که در چند سال اخیر رواج پیدا کرده است، استفاده از رویکرد کتاب‌سنجی^(۳۲) برای آگاهی از سوابق پژوهشی، شناسایی نقاط عطف و یافتن جدیدترین مباحث مرتبط با تصفیه شیرابه است. به عبارتی کتاب‌سنجی فرایند استخراج داده‌های قابل اندازه‌گیری تحقیقات منتشر شده با هدف ارزیابی وضعیت فعلی، روند توسعه و شکاف‌های تحقیقاتی آن‌ها است (Donthu et al., 2021)، که در ادامه جهت ارزیابی روند تحقیقات مرتبط با تصفیه شیرابه خلاصه‌ای از نتایج این مطالعات ارائه شده است. در تحقیقی که رشادی و همکاران (Reshadi et al., 2021) با استفاده از رویکرد کتاب‌سنجی داشتند، روند تحقیقات مرتبط با تصفیه شیرابه را در بازه زمانی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۹ مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند فرایندهای مورد استفاده در این تحقیقات را می‌توان در پنج دسته اکسیداسیون پیشرفته، روش‌های حذف نیتروژن، تالاب‌های ساخته شده- انعقاد، جذب سطحی و فرایندهای غشایی در نظر گرفت. علاوه بر این با

تحلیل روند زمانی انتشار این تحقیقات پیش‌بینی نمودند، اگر چه گستره استفاده از هیچ یک از این فرایندها کم‌رنگ نشده است، اما به نظر می‌رسد توسعه فرایندهای مبتنی بر انعقاد (مانند انعقاد الکتریکی) و بهبود عملکرد فرایندهای غشایی و رفع مشکل رسوب و گرفتگی در آن‌ها، از مباحث پرطرفدار تصفیه شیرابه در آینده خواهد بود.

در تحقیق دیگری ایلماساری و همکاران (Ilmasari et al., 2022) با ارزیابی روند تحقیقات انجام شده در زمینه تصفیه بیولوژیکی شیرابه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۷۴ تا ۲۰۲۱، نتیجه گرفتند دو روش هضم بی‌هوازی و تالاب‌های ساخته شده^(۳۳) به عنوان پرطرفدارترین روش‌های تصفیه بیولوژیکی شیرابه به کار گرفته شده‌اند. همچنین با توجه به آن که استفاده از انرژی در قالب بیوگاز کمتر مورد توجه بوده است، لذا محققین را بر استفاده از سیستم‌های تصفیه پایدار با قابلیت بازیابی انرژی تشویق نموده‌اند.

قوش و همکاران (Ghosh et al., 2023) در تحقیق خود با بررسی روند تحقیقات مرتبط با تاثیر شیرابه و گاز محل دفن پسماند بر اکوسیستم و سلامت، در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲ داشتند، نتیجه گرفتند که فرایندهای بیولوژیکی از رایج‌ترین روش‌های تصفیه شیرابه در جهان به شمار می‌آیند. با این حال نتیجه‌گیری نمودند در اکثر کشورهای توسعه یافته استفاده از روش‌های تصفیه پیشرفته، علی‌رغم آنکه هزینه بالاتری دارد، مرسوم‌تر است.

در تحقیق دیگری کندو و همکاران (Kundu et al., 2023) با ارزیابی آخرین فناوری‌های مورد استفاده برای پیش تصفیه شیرابه نتیجه گرفتند در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۲ برای پیش تصفیه شیرابه، فرایندهای فیزیکی- شیمیایی نسبت به فرایندهای بیولوژیکی کاربرد بیشتری داشته است و از بین انواع مختلف فرایندهای فیزیکی- شیمیایی نیز، دو روش انعقاد و جذب، بیش‌ترین استفاده را در زمینه پیش تصفیه شیرابه داشته‌اند.

باه و همکاران (Bah et al., 2023) در تحقیق دیگری با تحلیل تحقیقات یک دهه گذشته مرتبط با استفاده از انرژی خورشیدی در تصفیه شیرابه، نتیجه‌گیری نمودند که روش تلفیقی فرایندهای فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیکی مبتنی بر استفاده از انرژی خورشیدی بیش‌ترین کارایی را در تصفیه شیرابه داشته است. از

این آلاینده‌ها به طور قابل توجهی به ترکیبات و ساختار پسماند، مکان و فناوری‌های به کار گرفته شده برای دفن و سن محل دفن پسماند وابسته است.

۳. سن محل دفن پسماند یکی از متغیرهای اصلی و تعیین‌کننده ویژگی‌های کیفی شیرابه به شمار می‌آید، که بر اساس آن می‌توان شیرابه را در سه دسته جوان (کمتر از ۵ سال)، متوسط (۵ تا ۱۰ سال) و تثبیت شده (بیشتر از ۱۰ سال) طبقه‌بندی نمود. همچنین با افزایش سن شیرابه، نسبت BOD/COD (قابلیت تجزیه‌پذیری بیولوژیکی) آن نیز به مرور کاهش می‌یابد.

۴. روش‌های مورد استفاده برای تصفیه شیرابه را می‌توان در سه گروه کلی فرایندهای بیولوژیکی، فیزیکی-شیمیایی و تلفیقی دسته‌بندی نمود، که در این بین فرایندهای بیولوژیکی از رایج‌ترین روش‌های تصفیه شیرابه به شمار می‌آیند. با این حال تحقیقات نشان داده است تلفیق فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی با یکدیگر نسبت به حالتی که صرفاً از یک فرایند مجزا برای تصفیه شیرابه استفاده می‌شود، راندمان بیشتری خواهد داشت.

سوی دیگر انجام تحقیقات مرتبط با توسعه فتوکاتالیست‌های ناهمگن و همگن و به کارگیری کاتالیست‌های مختلف آهن در فرایند فتوفنتون از بحث‌های مورد علاقه محققین در این حوزه بوده است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف افزایش آگاهی عموم جامعه نسبت به مخاطرات آلاینده‌های موجود در ترکیب شیرابه و مروری کلی بر روش‌های تصفیه آن صورت پذیرفته است. خلاصه‌ای از نتایج آن به شرح زیر است؛

۱. تولید شیرابه در محل دفن پسماند از طریق فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در پنج فاز هوازی اولیه، اسیدوژنیک بی‌هوازی، متان‌زایی، تثبیت متان و تجزیه هیومیک انجام می‌شود، که کمیت شیرابه تولیدی عموماً وابسته به شرایط اقلیمی، رواناب‌های سطحی و نحوه عملیاتی محل دفن پسماند است.
۲. آلاینده‌های موجود در ترکیب شیرابه را می‌توان در چهار گروه مواد آلی محلول، ترکیبات معدنی ماکرو، فلزات سنگین و ترکیبات آلی زئوبیوتیک طبقه‌بندی نمود. غلظت هر یک از

یادداشت‌ها

1. Acetogenesis
2. Methanogenesis
3. Dissolved organic matter (DOM)
4. Xenobiotic organic compounds (XOCs)
5. Methanogenesis
6. Intermediate
7. Minamata
8. Blue baby syndrome
9. Pulmonary fibrosis
10. Hepatic cirrhosis
11. Encephalopathy
12. Argyria
13. Alopecia
14. Eutrophication
15. Natural organic matter (NOM)
16. Aerated lagoon
17. Activated sludge process
18. Sequencing Batch Reactor (SBR)
19. Rotating Biological Contactors (RBC)
20. Trickling filters
21. Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)
22. Membrane Biological Reactor (MBR)
23. Anaerobic digestion
24. Anaerobic filter
25. Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)
26. Chemical precipitation (CP)
27. Air Stripping
28. Membrane filtration
29. Electrochemical
30. Ion exchange (IEX)
31. Advance oxidation processes (AOP)
32. Bibliometrics
33. Constructed Wetland

منابع

Bah, A., Chen, Z., Bah, A., Qian, Q., Tuan, P. D. & Feng, D. 2023. Systematic literature review of solar-powered landfill leachate sanitation: Challenges and research directions over the past decade. Journal

- of Environmental Management, 326, 116751.
- Costa, A. M., Alfaia, R. G. D. S. M. & Campos, J. C. 2019. Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, 232, 110-116.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N. & Lim, W. M. 2021. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296.
- Gautam, P., Kumar, S. & LAokhandwal, S. 2019. Advanced oxidation processes for treatment of leachate from hazardous waste landfill: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117639.
- Ghosh, A., Kumar, S. & Das, J. 2023. Impact of leachate and landfill gas on the ecosystem and health: Research trends and the way forward towards sustainability. *Journal of Environmental Management*, 336, 117708.
- Ilmasari, D., Sahabudin, E., Riyadi, F. A., Abdullah, N. & Yuzir, A. 2022. Future trends and patterns in leachate biological treatment research from a bibliometric perspective. *Journal of Environmental Management*, 318, 115594.
- Kundu, A., Reddy, C. V., Singh, R. K. & Kalamdhad, A. S. 2023. Critical review with science mapping on the latest pre-treatment technologies of landfill leachate. *Journal of Environmental Management*, 336, 117727.
- Kurniawan, T. A., Lo, W.-H. & Chan, G. Y. S. 2006. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 129, 80-100.
- Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D. & Pan, X. 2020. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of the Total Environment*, 703, 135468.
- Nanda, S. & Berruti, F. 2021. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 1433-1456.
- Peng, Y. 2017. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2567-S2574.
- Reshadi, M. A. M., Bazargan, A. & Mckay, G. 2020. A review of the application of adsorbents for landfill leachate treatment: Focus on magnetic adsorption. *Science of the Total Environment*, 731, 138863.
- Reshadi, M. A. M., Soleymani Hasani, S., Nazaripour, M., Mckay, G. & Bazargan, A. 2021. The evolving trends of landfill leachate treatment research over the past 45 years. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 66556-66574.
- Siddiqi, S. A., Al-Mamun, A., Baawain, M. S. & Sana, A. 2022. A critical review of the recently developed laboratory-scale municipal solid waste landfill leachate treatment technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102011.
- Thomsen, N. I., Milosevic, N. & Bjerg, P. L. 2012. Application of a contaminant mass balance method at an old landfill to assess the impact on water resources. *Waste Management*, 32, 2406-2417.
- Wijekoon, P., Koliyabandara, P. A., Cooray, A. T., Lam, S. S., Athapattu, B. C. L. & Vithanage, M. 2022. Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126627.

A General Overview of Leachate Pollutant Characteristics and Treatment Methods

Abbas Talebi ^{1*}, Taghi Ebadi ²

1. M.Sc. Civil- Environmental Engineering, Water and Environmental Department, Faculty of Civil and Environmental Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran.
2. Assoc. Professor, Water and Environmental Department, Faculty of Civil and Environmental Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: 2025/04/09

Accepted: 2025/06/02)

Abstract

Landfilling is considered one of the most widely used and cost-effective methods of urban waste management. However, one of its major drawbacks is the production of leachate a highly heterogeneous and variable liquid. The uncontrolled release of leachate into the environment poses significant risks due to its toxicity and potential threats to public health. This study aims to enhance public understanding of the nature and hazards of leachate pollutants, as well as to provide an overview of the main treatment methods. Based on a review of key research in this field, leachate pollutants can be categorized into four main groups: dissolved organic matter, macro inorganic compounds, heavy metals, and xenobiotic organic compounds. Correspondingly, leachate treatment methods are generally classified into three categories: biological, physico-chemical, and combined processes, among which biological methods are the most commonly applied.

Keywords: Landfill, Leachate, Treatment, Pollutant, Waste.

* Corresponding author:

Email: abbas.talebi@aut.ac.ir