2025, Vol.11, No.4, Pages 63 to 82
Journal of Water and Sustainable Development

سال یازدهم، شماره ۴، ۱۴۰۳، صفحات ۶۳ تا ۸۲
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review Article

نوع مقاله: مروری

Effectiveness of Different Adsorbents in Removing Heavy Metals from Municipal Wastewater: A Review Study

A.R. Radkhah[1*], S. Eagderi[2], S. Atash Afrazah[3]

1, 2- Ph.D. Graduate and Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. 3- Environmental Expert, Faculty of Natural Resources, Birjand University, Birjand, Iran.

*(Corresponding Author Email: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

Received: 12-07-2024 Revised: 07-09-2024
Accepted: 16-09-2024 Available Online: 08-03-2025

کارایی جاذب‌های مختلف در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری (مطالعه مروری)

علیرضا رادخواه[1*]، سهیل ایگدری[2]، صدیقه آتش‌افرازه[3]

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ۳- کارشناس محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

*(رایانامه نویسنده مسئول، E-Mail: alirezaradkhah@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

Abstract

Today, the removal of heavy metals from industrial and urban wastewater is considered as one of the serious issues and challenges facing humanity. The present study was carried out with the aim of investigating the efficiency of different adsorbents in removing heavy metals from municipal wastewater. In this study, various adsorbents such as natural adsorbents such as forest adsorbents, and wood waste, agricultural waste, fruit and vegetable peels, coal, and biochar were discussed. In addition, the role and application of nanoabsorbents, nanocomposites and carbon nanotubes in urban wastewater treatment were studied. The literature review showed that bioabsorbents are more beneficial for removing heavy metals from urban wastewater due to being economical and environmentally friendly. Natural materials that are usually used as adsorbents have different capacities to remove heavy metals from wastewater. Among the natural adsorbents, the use of agricultural residues, biochars and coal-based adsorbents has received more attention. However, most of the research has been done on a laboratory scale. According to the obtained information, nanoabsorbents can also remove toxic metals from municipal wastewater. Studies showed that the most widely used nanomaterials as adsorbents for removing heavy metals include graphene, iron oxide, magnesium oxide, activated carbon, manganese oxide, zinc oxide, titanium oxide, and carbon nanotubes. Despite the key role of nanomaterials in the removal of heavy metals, considering that these materials are still not cheap compared to traditional materials (such as activated carbon), the use of bioadsorbents can be effective in urban wastewater treatment.

Keywords: Heavy Metals, Natural Adsorbents, Municipal Wastewater, Agricultural Wastes, Nano Adsorbents.

چکیده

در عصر حاضر، حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی و شهری به‌عنوان یکی از مسائل جدی و چالش‌های پیش‌رو بشر به‌شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی جاذب‌های مختلف در حذف فلزات سنگین از پساب شهری به اجرا درآمد. در این پژوهش، جاذب‌های مختلفی از قبیل جاذب‌های طبیعی مانند جاذب‌های جنگلی و ضایعات چوب، پسماندهای کشاورزی، پوست میوه و سبزیجات، زغال‌سنگ و بیوچار مورد بحث قرار گرفت. علاوه‌براین، نقش و کاربرد نانوجاذب‌ها، نانوکامپوزیت‌ها و نانولوله‌های کربنی در تصفیه پساب شهری مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی منابع علمی مختلف نشان داد جاذب‌های زیستی به دلیل اینکه از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و هچنین دوستدار محیط‌زیست هستند، مطلوبیت بیشتری برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری دارند. مواد طبیعی که معمولاً به‌عنوان جاذب استفاده می‌شوند، دارای ظرفیت‌های متفاوتی برای حذف فلزات سنگین از پساب هستند. در بین جاذب‌های طبیعی، استفاده از پسماندهای کشاورزی، بیوچارها و جاذب‌های مبتنی بر زغال‌سنگ بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، اما بااین‌حال، بیشتر پژوهش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است. بر طبق اطلاعات به‌دست آمده، نانوجاذب‌ها نیز می‌توانند فلزات سمی را از پساب‌های شهری حذف نمایند. بررسی‌ها نشان داد پرمصرف‌ترین نانومواد به‌عنوان جاذب برای حذف فلزات سنگین شامل گرافن، اکسید آهن، اکسید منیزیم، کربن فعال، اکسید منگنز، اکسید روی، اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی می‌باشند. باوجود نقش موثر نانومواد در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری، باتوجه‌به اینکه این مواد در مقایسه با مواد سنتی (مانند کربن فعال) هنوز ارزان نیستند، استفاده از جاذب‌های زیستی می‌تواند کارایی موثری در تصفیه پساب‌های شهری داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، جاذب‌های طبیعی، پساب شهری، پسماندهای کشاورزی، نانوجاذب‌ها.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: Radkhah, A.R., Eagderi, S., & Atash Afrazah, S. (2025). Effectiveness of Different Adsorbents in Removing Heavy Metals from Municipal Wastewater: A Review Study. Journal of Water and Sustainable Development, 11(4), 63-82. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v11i4.2407-1346

مقدمه

آب یک منبع طبیعی مهم است که حفظ آن در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار بسیار اهمیت دارد. ازاین‌رو، جلوگیری از آلوده شدن آب توسط آلاینده‌های مختلف و تصفیه آن در بسیاری از کشورهای جهان اولویت زیادی دارد. بااین‌حال، برخی از فناوری‌های مورد استفاده برای تصفیه آب، آلاینده‌های ثانویه یا محصولات جانبی آزاد می‌کنند که باعث آلودگی بیشتر محیط‌زیست می‌شوند (Kwame Nti و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، دسترسی به فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای تصفیه پساب یک ضرورت مهم محسوب می‌شود.

به‌طورکلی، جدا از منابع طبیعی و انسانی، دو نوع عمده آلاینده برای پساب وجود دارد که شامل آلاینده‌های آلی و معدنی می‌باشند. آلاینده‌های آلی شامل آفت‌کش‌ها، فنل‌ها، علف‌کش‌ها، نفت، رنگ‌ها، روغن‌ها، بی‌فنیل‌ها، چربی‌ها، پروتئین‌ها، نشاسته‌ها و داروها هستند، درحالی‌که آلاینده‌های معدنی حاوی کودهای شیمیایی و فلزات سنگین هستند (Elgarahy و همکاران، ۲۰۲۱). پساب حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، صنایع و بخش خانگی حاوی مقادیر متفاوتی از آلاینده‌های معدنی به‌ویژه فلزات سنگین می‌باشند که در صورت انتشار در محیط، خطرات محیط‌زیستی متعددی به دنبال خواهند داشت (Khan و همکاران، ۲۰۰۸). در میان فلزات سنگین، مس (Cu)، جیوه (Hg)، کادمیوم (Cd)، قلع (Sn)، روی (Zn)، سرب (Pb)، آهن (Fe)، منگنز (Mn)، نقره (Ag)، کروم (Cr)، کبالت (Co)، آرسنیک (As)، آلومینیوم (Al) ونیکل (Ni) از عناصر سمی به‌شمار می‌روند (Kolesnikov و همکاران، ۲۰۲۲). پساب‌های حاوی این عناصر بالقوه سمی (PTEs)[1] به دلیل ماندگاری، تحرک و حلالیت بیشتر، به‌درستی تصفیه نمی‌شوند و ممکن است به همین صورت وارد محیط‌زیست و منابع آب شیرین شوند (Okoro و همکاران، ۲۰۲۳). این عناصر سمی می‌توانند توسط موجودات آبزی، محصولات زراعی و سایر گونه‌های گیاهی جذب شوند و به زنجیره غذایی انسان راه پیدا کنند و در نتیجه اثرات منفی بر سلامت انسان برجای بگذارند (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰ الف، ۱۴۰۰ ب). ازاین‌رو، حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی و شهری به‌عنوان یکی از مسائل جدی و چالش‌های پیش‌رو در عصر حاضر به‌شمار می‌رود.

تاکنون فناوری‌های متعددی به‌منظور کاهش خطرات محیط‌زیستی و بهداشتی ناشی از پساب فلزات سنگین استفاده شد که جمله آن‌ها می‌توان به فرآیندهایی مانند فیلتراسیون غشایی، اسمز معکوس، رسوب شیمیایی و جذب سطحی/زیستی اشاره نمود (Nishat و همکاران، ۲۰۲۳). در بین تمام تکنیک‌های ذکر شده، روش جذب با استفاده از مواد مختلف برای تصفیه پساب ساده‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر است. علاوه‌بر مزایای اولیه، این فرآیند باعث آلودگی ثانویه ناشی از تولید محصولات جانبی نمی‌شود (Dehghani و همکاران، ۲۰۲۳). مواد معدنی و آلی (مانند خاک رس، کربن فعال، زئولیت، مواد پلیمری، پسماندهای کشاورزی و غیره) که معمولاً به‌عنوان جاذب استفاده می‌شوند، ظرفیت‌های متفاوتی برای حذف آلاینده‌های خاص از پساب دارند (Gil و همکاران، ۲۰۲۱).

برخی از پژوهشگران، مواد جاذب را با ترکیب آن‌ها با سایر مواد شیمیایی اصلاح کرده‌اند تا ظرفیت جذب آلاینده‌ها را افزایش دهند (Tamjidi وهمکاران، ۲۰۲۱). در پیشرفت‌های اخیر، فناوری نانو تقریباً در تمام زمینه‌های مورد علاقه بشر، از جمله پاک‌سازی محیط، خاک و مدیریت منابع طبیعی، به‌ویژه تصفیه پساب مورد استفاده قرار گرفته است (Alazaiza و همکاران، ۲۰۲۱). بسیاری از نانوجاذب‌ها برای حذف مواد آلی و معدنی از پساب استفاده می‌شوند و در بسیاری از موارد حتی از جاذب‌های سنتی موثرتر هستند (Anjum و همکاران، ۲۰۱۶). این جاذب‌ها شامل نانوذرات (NPs)[2] مبتنی بر اکسید فلز، نانولوله‌های کربنی (CNTs)[3]، گرافیت، نانوکامپوزیت‌های گیاهی (NCs)[4] و غیره هستند (Agasti و همکاران، ۲۰۲۲).

باتوجه‌به اثرات منفی پساب‌های حاوی فلزات سنگین بر محیط‌زیست و همچنین سلامت انسان، مطالعه حاضر با هدف بررسی کارایی جاذب‌های مختلف در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری در قالب یک مطالعه مروری به اجرا درآمد. در این مطالعه، جاذب‌های مختلفی از قبیل جاذب‌های طبیعی و همچنین، جاذب‌های صنعتی و رویکردهای مبتنی بر فناوری نانو مورد مطالعه قرار گرفتند.

روش‌های حذف فلزات سنگین از پساب

در این بخش، مهمترین روش‌های مورد استفاده برای حذف فلزات سنگین از پساب به‌صورت مختصر بررسی می‌شود.

۱- اسمز معکوس (RO)

فرآیند اسمز معکوس در حذف ترکیبات آلی و معدنی از پساب موثر است. در این روش، حذف ریزآلاینده‌های معدنی بسته به نوع پلیمر، مواد و شرایط عملیاتی اعمال شده بین ۹۵ تا ۱۰۰ درصد متغیر است (Aziz و Kasongo، ۲۰۲۱). در اسمز معکوس، پساب حاوی فلزات سنگین با فشار به سوی آن سوی قسمت از غشای نیمه‌تراوا که غلظت فلزات کمتر است، هدایت می‌شود. در این حالت، یون‌های فلزی امکان عبور از منافذ کوچک غشای نیمه تراوا را پیدا نمی‌کنند و به دام می‌افتند (Birniwa و همکاران، ۲۰۲۴).

۲- تبادل یونی

در سال‌های اخیر، فرآیند تبادل یونی به‌طور فزاینده برای حذف فلزات سنگین یا بازیافت فلزات گران‌بها استفاده شده است. در این روش، پساب از درون محیطی که به‌صورت انتخابی یون‌های

فلزات سنگین را جذب می‌کند، عبور داده می‌شود. تبادلات یونی بین فلزات سنگین و سطح مواد مبادله کننده یونی (رزین) که در تماس با محلول هستند، موجب جذب فلزات سنگین روی سطح مواد مبادله‌کننده و تشکیل کمپلکس می‌شود. از روش تبادل یونی معمولاً برای بازیافت فلزات گران‌بها، کروم، نیکل و عناصر دیگر استفاده می‌شود (Al-Enezi و همکاران، ۲۰۰۴).

۳- رسوب شیمیایی

ته‌نشینی شیمیایی شامل افزودن مواد شیمیایی به پساب جهت تشکیل رسوبات نامحلول با فلزات سنگین است. از جمله مواد شیمیایی که برای این روش استفاده می‌شوند می‌توان به کلسیم هیدروکسید، سدیم هیدروکسید و کلرید آهن اشاره کرد. این مواد پس از افزودن به پساب موجب تشکیل رسوبات نامحلول با فلزات سنگین می‌شوند که به واسطه فیلتراسیون یا ته‌نشینی می‌توان آن‌ها را از پساب خارج نمود (Das و Poater، ۲۰۲۱).

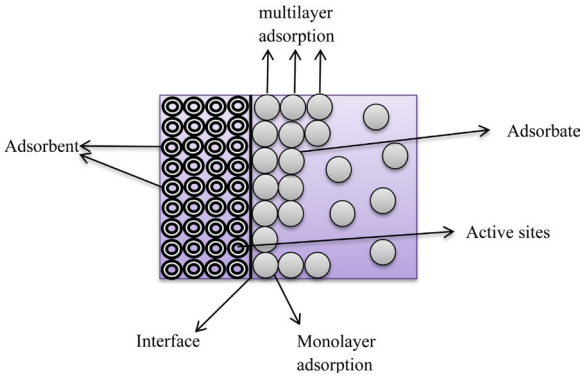
۴- فیلتراسیون غشایی

فیلتراسیون غشایی نوعی فناوری جداسازی است که از یک غشاء برای جداسازی مواد هنگام اعمال نیروی محرکه در سراسر غشا استفاده می‌کند. فیلتراسیون غشایی، مواد آلاینده مانند فلزات سنگین را بر اساس اندازه منافذ غشا، غلظت محلول و فشار اعمال شده جدا می‌کند (Xiang و همکاران، ۲۰۲۲). در دهه‌های اخیر، فناوری‌های غشایی توجه فزاینده‌ای را برای تصفیه فلزات سنگین به خود جلب کرده‌اند. این روش به دلیل برخورداری از ویژگی‌های خاصی از جمله سادگی روش، هزینه پایین، نیاز به اشغال فضای اندک و همچنین امکان دستیابی به ضریب آلودگی‌زدایی بالا در فرآیندهای تصفیه پساب مورد توجه قرار گرفته‌اند (Mulder، ۲۰۰۲).

علاوه‌بر موارد ذکر شده، روش دیگری نیز برای حذف فلزات سنگین از پساب وجود دارد که شامل جذب سطحی/جذب زیستی می‌باشد. در ادامه، فرآیند جذب و سازوکار آن در حذف فلزات سنگین مورد بحث قرار می‌گیرد.

فرآیند جذب

فرآیند جذب، پدیده‌ای سطحی است که در آن اتم‌ها، یون‌ها یا مولکول‌های گاز، مایع یا جامدِ محلول به محل فعال جاذب می‌چسبند و ازاین‌رو لایه‌ای از ماده جذب شونده روی سطح جاذب ایجاد می‌کنند. همچنین، فرآیند جذب می‌تواند به‌عنوان حذف ماده از مایع یا گاز توسط یک فاز جامد تعریف شود (شکل ۱) (Czelej و Kurzydlowski، ۲۰۱۶). فرآیند جذب در سیستم‌های متعددی از جمله سیستم‌های شیمیایی، فیزیکی، طبیعی و بیولوژیکی مشاهده شده است. علاوه‌براین، فرآیند مذکور به‌طور گسترده در کاربردهای صنعتی مانند کاتالیزورهای ناهمگن، چیلرهای جذب و تصفیه آب استفاده می‌شود (Mortada و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۱- طرح شماتیکی از فرآیند جذب (Soliman و Moustafa، ۲۰۲۰)

اگر فرآیند جذب روی سیستم‌های بیولوژیکی رخ دهد، به آن جذب زیستی (Biosorption) می‌گویند. جذب زیستی هم حذف فلز و هم بازیابی آن را با هم ادغام می‌کند. جذب زیستی به دلیل بازیابی آسان و مقرون‌به‌صرفه بودن جاذب موثر است (Rashid و همکاران، ۲۰۱۶). جاذب‌های زیستی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، زباله‌های صنعتی، ضایعات کشاورزی، پسماندهای طبیعی و سایر مواد بیولوژیکی به‌طور گسترده برای جذب رنگ‌ها و فلزات سنگین از پساب‌های شهری و صنعتی استفاده می‌شوند (Soliman و همکاران، ۲۰۱۹). این جاذب‌های بیولوژیکی زنده یا مُرده می‌توانند پتانسیل‌های مختلفی برای جذب فلزات داشته باشند، اما بااین‌حال، فقط مواد زیستی کم‌هزینه با ظرفیت انباشتگی بالا، میل ترکیبی و سرعت سریع در جذب فلز می‌توانند به‌عنوان جاذب زیستی مناسب انتخاب شوند (Priya و همکاران، ۲۰۲۲). به‌عنوان‌مثال، قارچ‌ها به دلیل رشد آسان و انبوه و همچنین نیاز آن‌ها به یک بستر ارزان‌قیمت، می‌توانند گزینه مفیدی در تصفیه پساب باشند. در این رابطه، Aftab و همکاران (۲۰۱۷) از سویه‌های قارچی برای بازیابی یون‌های روی (Zn^{2+}) از پساب استفاده کردند و دریافتند که استفاده از جاذب‌های قارچی برای حذف و بازیابی یون‌های روی (Zn^{2+}) از پساب شهری مفید هستند. همچنین، این پژوهشگران بیان کردند برای بازیابی سایر یون‌های فلزات سنگین از پساب‌های شهری می‌توان از سویه‌های قارچی به‌عنوان جاذب‌های زیستی استفاده نمود. علاوه‌براین، یون‌های فلزی جاذب را می‌توان بازیابی کرد و زیست‌توده آن را برای تصفیه مداوم پساب بازیافت نمود (Rashid و همکاران، ۲۰۱۶).

۱- سازوکار جذب

پدیده جذب دو پارامتر اصلی را توصیف می‌کند که شامل جاذب (adsorbent) و ماده جذب‌شونده (adsorbate) می‌باشد (Mortada و همکاران، ۲۰۱۵). در سطح جاذب، اتم‌های سطح بیرونی به‌طور کامل توسط سایر اتم‌های جاذب احاطه نشده‌اند، بنابراین می‌توانند مولکول‌های حاصل از مواد دیگر را جذب

کنند. وقوع فرآیند جذب معمولاً به این دلیل است که اتم‌های جاذب که روی سطح قرار می‌گیرند، در مقایسه با اتم‌های واقع در قسمت‌های عمده ماده، در محیط یکسانی نیستند (Soliman و همکاران، ۲۰۱۹). اتم‌های مستقر روی سطح جاذب توسط ذرات مجاور از همه طرف احاطه نشده‌اند، این امر باعث می‌شود که مولکول‌های سطح انرژی بیشتری نسبت به مولکول‌های موجود در قسمت‌های عمده ماده داشته باشند، ازاین‌رو، آن‌ها نیروهای جاذبه دارند. این نیروی جاذبه در واحد سطح تعریف می‌شود و تحت عنوان "انرژی سطح" که مسئول جذب یون‌های فلزی روی سطح جاذب می‌باشد، شناخته می‌شود (Soliman و Moustafa، ۲۰۲۰). کارایی فرآیند جذب با افزایش سطح جاذب در فشار و دمای خاص افزایش می‌یابد (Da browski، ۲۰۰۱).

۲- نوع جذب

فرآیند جذب را می‌توان باتوجه‌به نیروی جاذبه بین جاذب و ماده جذب شونده به دو دسته اصلی تقسیم کرد. هنگامی‌که ذرات جذب شونده توسط نیروی ضعیف واندروالس به ذرات سطحی جاذب متصل می‌شوند، جذب را جذب فیزیکی (Physisorption) می‌گویند. اگر ذرات جذب شونده با نیروی جاذبه قوی ناشی از پیوندهای شیمیایی کووالانسی یا یونی به جاذب متصل شوند، جذب را جذب شیمیایی (Chemisorption) می‌نامند (Da browski، ۲۰۰۱).

- **جذب فیزیکی (Physisorption):** جذب فیزیکی معمولاً در دمای پایین اتفاق می‌افتد و با افزایش دما طبق اصل لوشاتلیه (Le-Chatelier's principle) کاهش می‌یابد. نیرویی که ذرات جذب شونده را نگه می‌دارد، نیروی واندروالس (Vander Waal) است که هیچ ترجیحی برای جذب‌شونده‌های خاص نشان نمی‌دهد. فرآیند فیزیکی با دمای پایین جذب خود نیازی به انرژی فعال‌سازی ندارد و یک لایه چند مولکولی با ماهیت برگشت‌پذیر تشکیل می‌دهد (Soliman و Moustafa، ۲۰۲۰). جذب فیزیکی عمدتاً به مساحت سطح جاذب‌ها بستگی دارد، ازاین‌رو سرعت جذب مواد با افزایش سطح جاذب افزایش می‌یابد. در فرآیند فیزیکی، به دلیل نیروی ضعیف جذب، آنتالپی جذب بسیار پایین (۴۰-۲۰ کیلوژول بر مول) است (Da browski، ۲۰۰۱).

- **جذب شیمیایی (Chemisorption):** فرآیند جذب شیمیایی تنها در صورتی مشاهده می‌شود که توانایی ایجاد پیوند شیمیایی بین ماده جذب‌شونده و جاذب وجود داشته باشد. از نمونه‌های جذب شیمیایی می‌توان به جذب اکسیژن و هیدروژن با فلز به‌واسطه تشکیل هیدرید اکسیدهای فلزی اشاره کرد. جذب شیمیایی از نوع جذب لایه تک مولکولی با ویژه‌مندی بالا (High specificity) بوده و در دمای بالا رخ می‌دهد و نیاز به انرژی فعال‌سازی و دمای بالای جذب دارد (Rashid و همکاران، ۲۰۱۶). فرآیند جذب شیمیایی شامل تشکیل یک ترکیب جدید است، ازاین‌رو ماهیت برگشت‌ناپذیر و ارزش آنتالپی بالایی (۲۴۰-۸۰ کیلوژول بر مول) دارد (Da browski، ۲۰۰۱). فرآیند جذب شیمیایی مانند جذب فیزیکی به سطح جاذب و دمای جذب بستگی دارد، به‌طوری‌که با افزایش میزان این دو عامل، جذب شیمیایی افزایش می‌یابد (Soliman و Moustafa، ۲۰۲۰). برای توضیح بیشتر، جدول (۱) مقایسه‌ای بین فرآیند جذب فیزیکی و جذب شیمیایی را نشان می‌دهد.

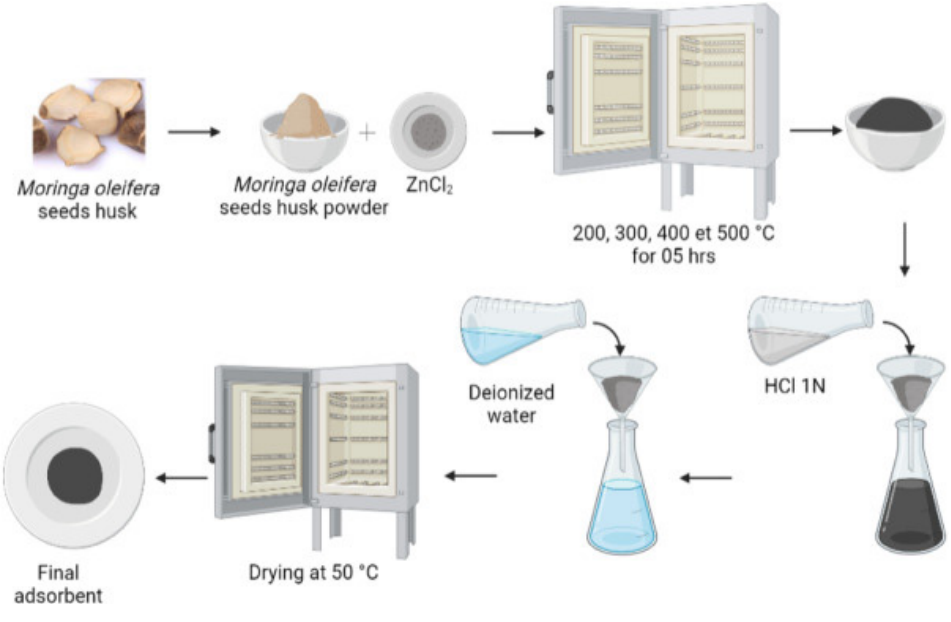
جدول ۱- مقایسه بین فرآیندهای جذب فیزیکی و شیمیایی (Soliman و Moustafa، ۲۰۲۰)

پارامترها	جذب فیزیکی	جذب شیمیایی
نیروی جذب	نیروی ضعیف (نیروهای واندروالسی)	نیروهای ویژه، پیوند شیمیایی یونی یا کووالانسی
ویژه‌مندی (Specificity)	غیرویژه (unspecific)	خیلی ویژه (Very specific)
لایه‌های جذب شده	تشکیل لایه‌های چند مولکولی	تشکیل لایه‌های تک مولکولی
ماهیت	ماهیت‌برگشت‌پذیر	ماهیت‌برگشت‌ناپذیر
دما	در دمای بالا نامطلوب است و با کاهش دما افزایش می‌یابد.	در دمای بالا مطلوب است و با افزایش دما افزایش می‌یابد.
آنتالپی جذب	آنتالپی پایین (۴۰-۲۰ کیلوژول بر مول)	آنتالپی بالا (۲۴۰-۸۰ کیلوژول بر مول)
مساحت سطح	با افزایش مساحت سطح، افزایش می‌یابد	با افزایش مساحت سطح، افزایش می‌یابد
فشار	با افزایش فشار، افزایش می‌یابد	با افزایش فشار، افزایش می‌یابد
انرژی فعال‌سازی	مورد نیاز نیست	انرژی فعال‌سازی بالا مورد نیاز است

فرآیندهای تهیه جاذب

به‌طورکلی، پروسه تهیه جاذب‌ها باتوجه‌به منشا و منبع آن‌ها متفاوت است. ازاین‌رو، مراحل تهیه جاذب‌ها در مطالعات مختلف، متفاوت می‌باشد. در این بخش، فرآیند تهیه جاذب‌ها در برخی از مطالعات انجام گرفته بررسی می‌شود. در پژوهش Khalfaoui و همکاران (۲۰۲۲)، از پوسته گیاه مورینگا (Moringa Oleifera) به‌عنوان ماده اولیه برای تهیه کربن فعال به‌منظور حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری استفاده شد. در شکل (۲) مراحل اصلی تهیه این جاذب به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. براساس پژوهش

Khalfaoui و همکاران (۲۰۲۲)، پوسته گیاه مورینگا (M. Oleifera) جمع‌آوری شده در آفتاب خشک شده و سپس با استفاده از آسیاب خانگی پودر شدند. ۲۵ گرم از پودر حاصل از پوسته گیاه و ۵۰ گرم از روی کلرید ($ZnCl_2$) به‌منظور فعال‌سازی شیمیایی در بوته سرامیکی قرار داده شدند. مخلوط به‌دست آمده به چهار نمونه تقسیم شد و هر نمونه در یک کوره (با دماهای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۵ ساعت با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه قرار گرفت. سپس، پوسته‌های گیاه کربونیزه شده، پنج بار با اسید کلریدریک ۱ مولار شستشو شد تا ناخالصی‌های کلرید روی حذف شود. سپس از آب دیونیزه برای شستشوی بیشتر برای حذف هیدروژن کلرید (HCl) استفاده شد. در نهایت، پودر نهایی به‌دست‌آمده از پوسته‌های گیاه مورینگا (M. Oleifera) به‌عنوان کربن فعال برای جذب آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین از پساب استفاده می‌شود.



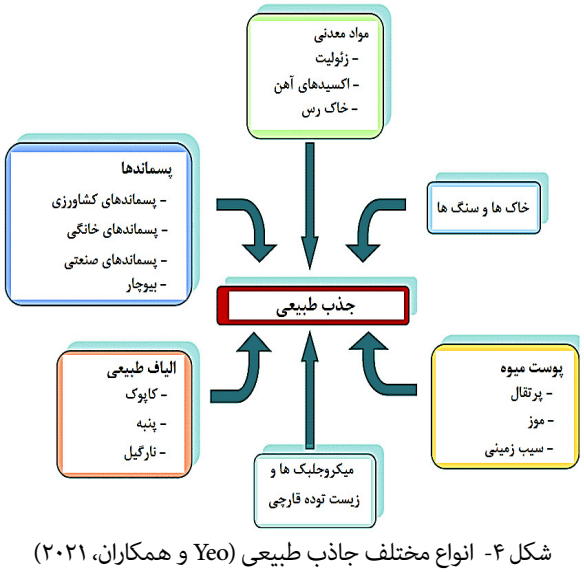
شکل ۲- نمایش شماتیکی از مراحل اصلی تهیه جاذب (Khalfaoui و همکاران، ۲۰۲۲)

Ahmadi و همکاران (۲۰۲۰) از بنتونیت خاک رس و کامپوزیت بنتونیت خاک رس با $MnFe_2O_4$ به‌عنوان جاذب‌های کارآمد برای جذب یون‌های کروم (III) و کروم (VI) از پساب استفاده کردند. بر اساس پژوهش Ahmadi و همکاران (۲۰۲۰)، بنتونیت خاک رس از معادن استان بوشهر (ایران) جمع‌آوری شد و سپس در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد تا آب‌گیری کامل حاصل شود. پس از آن خاک رُس خشک شده در آسیاب پودر شد و سپس، در بطری‌های ضدرطوبت در دمای محیط نگهداری شد. برای تهیه جاذب کامپوزیت بنتونیت خاک رس با $MnFe_2O_4$، محلول آبی حاوی منگنز (II) و آهن (III) به نسبت مولی ۲:۱ تهیه شد. سپس ۱ گرم از بنتونیت خاک رس تهیه شده به محلول اضافه شد و سپس روی هم‌زن مغناطیسی به مدت ۴۰ دقیقه مخلوط شد تا یون‌های Fe^{+3} و Mg^{2+} روی لایه‌های سطح بنتونیت خاک رس قرار گیرند. پس از آن، قبل از افزودن محلول هیدروکسید سدیم (به میزان ۵ مول بر لیتر) برای تنظیم مقدار pH به ۱۱، دمای محلول به ۷۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. سپس محلول حاصل به مدت ۱ ساعت هم زده شد. پس از آن، کامپوزیت تهیه شده از محلول خارج شد و چندین بار با آب مقطر شسته شد تا کاملا خنثی شود. کامپوزیت خنثی شده در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت حرارت داده شد تا کاملاً خشک شود و برای استفاده به‌عنوان جاذب آماده شود. شکل (۳) روش بیان شده برای تولید جاذب و استفاده از آن برای حذف یون های کروم (III) و کروم (VI) از پساب را نشان می‌دهد.

شکل ۳- مراحل تولید جاذب برای حذف کروم (III) و کروم (VI) از پساب (Ahmadi و همکاران، ۲۰۲۰)

جاذب‌های زیستی برای تصفیه پساب

با پیشرفت در شیمی مواد، تمرکز به سمت توسعه جاذب‌های مقرون‌به‌صرفه از منابع طبیعی، در دسترس و ارزان قیمت مانند پوست میوه، پوست برنج، کاه گندم، ضایعات نارگیل و قهوه، باگاس نیشکر، زغال‌سنگ نارس، پسماندهای کشاورزی و پسماندهای خانگی (شکل ۴) تغییر یافته است (Fatima و همکاران، ۲۰۲۱). این ضایعات همراه با پوست میوه و سایر ضایعات آلی از طریق تصفیه با مواد شیمیایی مختلف یا خشک کردن و اصلاح آن‌ها به جاذب‌های مقرون‌به‌صرفه تبدیل می‌شوند (Karić و همکاران، ۲۰۲۲). لازم‌به‌ذکر است با پیشرفت در رویکردهای تحلیلی و فنی، تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی با استفاده از پسماندهای آلی توجه بسیار زیادی را به سوی خود جلب نموده است.



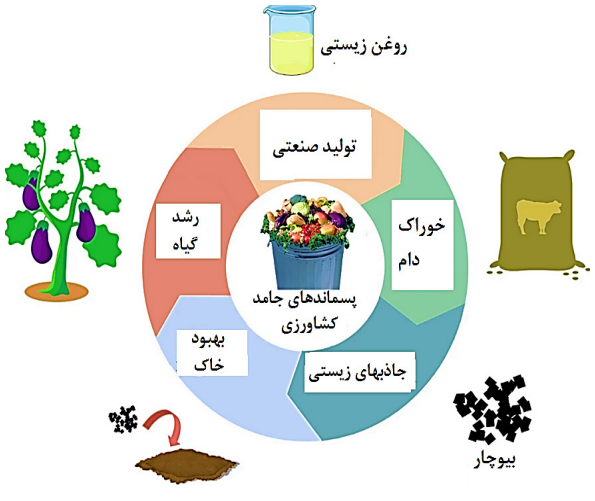
شکل ۴- انواع مختلف جاذب طبیعی (Yeo و همکاران، ۲۰۲۱)

۱- جاذب‌های جنگلی و ضایعات چوب

پسماندهای جنگلی (مانند شاخه‌ها، برگ‌ها و پوست درختان) در مقادیر زیادی به شکل زباله جامد انباشته می‌شوند و می‌توانند به‌عنوان ماده اولیه برای تولید جاذب‌ها برای تصفیه پساب شهری استفاده شوند (Ogbu و همکاران، ۲۰۲۲). پلی‌ساکاریدها (پکتین، سلولز) و کمپلکس‌های پلی‌فنل (فلاونوئیدها، تانن‌ها، لیگنین، ترپن‌ها) دارای گروه‌های عملکردی خاص در ترکیب با گروه‌های هیدروکسیل (OH-) یا کربوکسیل (COOH) با یون‌های عبوری هستند (BoŻym و همکاران، ۲۰۲۱). این ضایعات پتانسیل جذب یون فلزی بالایی از طریق فرآیند تبادل یونی یا کیلاسیون دارند. انواع مختلفی از ضایعات جنگلی - مانند پوست درخت، خاک اره، پکتین کاج و سوزن کاج - به‌عنوان جاذب برای حذف PTE استفاده شده است (Sen، ۲۰۲۳). ضایعات جنگلی همچنین برای ساخت بیوچار[5]، یک ماده کربنی جاذب که از طریق پیرولیز آهسته به دست می آید، استفاده می‌شود (Kuppusamy و همکاران، ۲۰۱۵). لازم‌به‌ذکر است ضایعات جنگلی بالاترین راندمان حذف فلزات سنگین را دارند که در حدود ۲۶۴ میلی‌گرم در گرم از پساب شهری تخمین زده شده است. ضایعات تولید شده از محصولات جنگلی با بازدهی بیش از ۶۹ درصد استفاده شده است (Aghababaei و همکاران، ۲۰۱۷).

۲- پسماندهای کشاورزی به‌عنوان جاذب کارآمد

پسماندهای کشاورزی به دلیل در دسترس بودن و مقرون‌به‌صرفه بودن، اهمیت فوق العاده‌ای برای ساخت جاذب‌ها دارند (Sen، ۲۰۲۳). این پسماندها برای اهداف زیادی استفاده می‌شوند که از جمله مهمترین آن‌ها می‌توان به کاربردشان در رشد گیاه، اصلاح خاک، خوراک حیوانات و جاذب‌های زیستی اشاره کرد (شکل ۵).



شکل ۵- استفاده از پسماندهای کشاورزی در مسیرهای مختلف

پسماندهای کشاورزی معمولاً از لیگنین و سلولز به‌عنوان اجزای اصلی تشکیل شده‌اند و دارای گروه‌های هیدروکسیل (OH-) و کربوکسیل (COOH-) می‌باشند (Saberi Riseh و همکاران، ۲۰۲۳). این گروه‌ها را می‌توان با ایجاد جفت الکترون با یون‌های فلزی ترکیب کرد و کمپلکس‌ها را تشکیل داد (Rudi و همکاران، ۲۰۲۰). پسماندهای کشاورزی مانند بقایای انگور، تفاله‌های چای و قهوه، پوست آجیل، پاپایا و برگ گیاه، دانه‌های زائد، جلبک‌ها، پوست برنج و گیاهان آفتابگردان توسط بسیاری از دانشمندان برای حذف فلزات سنگین مانند آرسنیک (As)، کروم (Cr)، جیوه (Hg)، سرب (Pb)، نیکل (Ni) و کادمیوم (Cd) استفاده شده است (Matei و همکاران، ۲۰۲۱). در جدول (۲) برخی از پسماندهای کشاورزی که برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری و صنعتی استفاده می‌شوند، ارائه شده است.

جاذب‌های حاصل از پسماندهای کشاورزی را می‌توان با پیش‌تصفیه‌های شیمیایی مختلف اصلاح کرد تا پتانسیل گروه‌های

عاملی افزایش یابد و در نتیجه ظرفیت جذب جاذب‌ها بهبود پیدا کند (Karić و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات همچنین نشان داده‌اند که لیگنوسلولز به‌دست‌آمده از محصولات مبتنی بر پسماندهای کشاورزی می‌تواند یک ماده کارآمد برای تولید مواد کربنی مانند بیوچار باشد که مساحت سطح، حجم منافذ و توزیع منافذ بیشتری دارند (Blasi و همکاران، ۲۰۲۳). بیوچار حاصل به‌واسطه ویژگی‌های ذکرشده می‌تواند پتانسیل قابل توجهی در حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری داشته باشد.

جدول ۲- کارایی جاذب‌های حاصل از پسماندهای کشاورزی در حذف فلزات سنگین (Hussain و همکاران، ۲۰۲۱)

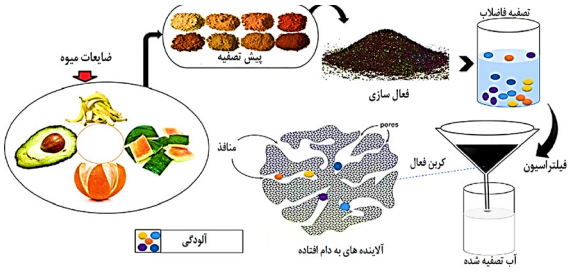
نوع پساب	نوع جاذب	دوز جاذب (g/L)	یون فلزی	مقدار جذب شده (mg/g)	زمان تماس (دقیقه)	دما (درجه سانتیگراد)	pH
پساب بیمارستانی	پوست گیاه مانیوک (Manihot esculenta)	۱۰	Pb^{2+}	۵/۸۰	۲۰-۱۲۰	۳۹/۸	۸
			Cu^{2+}	۸			
پساب حاوی یون کُروم	پودر پوست کدو	۶	Cr^{6+}	۱۸/۷	۴۰-۶۰	۲۸	۱
پساب حاوی یون مس	کاه جو	۱	Cu^{2+}	۴/۶۴	۱۲۰	۲۵	۶-۷
پساب حاوی یون نیکل	بادام هندی	۳	Ni^{2+}	۱۸/۸۶	۳۰	۳۰	۵
پساب حاصل از صنعت آبکاری	پوست پرتقال اصلاح شده شیمیایی	۲	Cu^{2+}	۲۸۹	۱۸۰	۳۰	۵
پساب حاوی یون اورانیوم	پوست گریپ فروت	۲	U^{6+}	۱۴۰/۸۰	۶۰-۸۰	۲۴/۸۵	۴-۶
پساب حاوی یون کروم	پوست بادام زمینی	۱	Cr^{6+}	۴/۳۲	۳۶۰	۳۰	۲
پساب حاوی یون سرب	بیوچار نیشکر و پوست پرتقال	۱	Pb^{2+}	۸۶/۹۶	۳۰	۲۵	۵
پساب حاصل از صنعت آبکاری	پوست انبه	۵	Ni^{2+}	۳۹/۷۵	۱۲۰	۲۵	۶
		۵	Cu^{2+}	۴۶/۰۹			
		۵	Zn^{2+}	۲۸/۲۱			
پساب حاوی یون مس	پوسته گندم	۱۰	Cu^{2+}	۱۷/۴۲	۶۰	۲۵	۷

۳- پوست میوه و سبزیجات

در اغلب پسماندهای آشپزخانه، ضایعات میوه و سبزیجات و پوست بیشترین نسبت را تشکیل می‌دهند. بسیاری از پوست میوه‌ها و سبزیجات در زباله‌ها ریخته می‌شوند یا مستقیماً به دام‌ها داده می‌شوند (Zhu و همکاران، ۲۰۲۳). ضایعات و فرآورده‌های جانبی سبزیجات و میوه‌ها که به مقدار قابل توجهی در طی فرآوری صنعتی/تولید محصولات ثانویه تولید می‌شوند، یک مشکل جدی را تشکیل می‌دهند. آنها به دلیل اثرات مضر محیطی باید مدیریت یا بازیافت شوند (Sharma و همکاران، ۲۰۲۱). پوست میوه و سبزیجات به‌عنوان منبعی از جاذب‌های طبیعی به‌شمار می‌روند که سازگار با محیط‌زیست و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه هستند. این جاذب‌های طبیعی می‌توانند انواع مختلف آلاینده‌های موجود در پساب‌های شهری را حذف نمایند و بار آلودگی را کاهش دهند. ازاین‌رو، این مواد منبعی تجدیدپذیر و امیدبخش برای تصفیه پساب‌های شهری به‌شمار می‌روند (Matei و همکاران، ۲۰۲۱). این موضوع توسط بسیاری از پژوهشگران از جمله Yeo و همکاران (۲۰۲۱) مورد تایید قرار گرفته است، به‌طوری‌که این پژوهشگران اظهار داشتند پوست میوه‌ها (مانند پرتقال، مرکبات، انبه) عملکرد بسیار خوبی در حذف بسیاری از آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین از پساب‌های شهری دارند. در شکل (۶) توسعه جاذب‌های زیستی مشتق شده از ضایعات میوه برای تصفیه پساب نشان داده شده است.

پوست‌های میوه (مانند پوست نارگیل) حاوی گروه‌های عاملی از OH- و COOH- موجود در سلولز، همی سلولز و پکتین هستند که در اتصال و حذف کادمیوم (Cd)، سرب (Pb)، آرسنیک (As)، کروم (Cr)، مس (Cu) و نیکل (Ni) نقش دارند (Freitas و همکاران، ۲۰۱۹). Feng و همکاران (۲۰۰۹) کارایی جاذب‌های مبتنی بر پوست میوه را برای حذف مس (II) از پساب شهری بررسی کردند. بر اساس نتایج، در ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه‌های پسابِ شهری دارای ۱۴/۳۳ میلی‌گرم در لیتر یون مس (II)، کارایی جذب تا ۹۷ درصد ثبت شد. همچنین، پژوهشگران برای ارزیابی مقرون‌به‌صرفه بودن روش، همان فرآیند را برای بررسی قابلیت استفاده مجدد جاذب تکرار کردند و به این نتیجه رسیدند که جاذب می‌تواند چندین بار برای یک فرآیند یکسان استفاده شود (Neisan و همکاران، ۲۰۲۳).

Santhi و Manonmani (۲۰۱۱) بیان کردند ۶ گرم جاذب برای حذف ۹۵-۹۰ درصد کروم (VI) از پساب شهری کافی است. همچنین، این پژوهشگران بیان داشتند سرعت حذف آلاینده با افزایش زمان تماس افزایش یافت تا پس از ۱۲۰ دقیقه به حالت تعادل برسد. آن‌ها میزان حذف آلاینده از پوست مرکبات (Citrus nobilis) را ۵۸/۹۷ درصد ثبت کردند. پوست مرکبات همچنین برای حذف فلزات سنگین از ۱۰ نمونه پساب شهری و صنعتی واقع در شهر لوندرینا (برزیل) استفاده شد. برای همه نمونه‌ها، نرخ پالایش مس (II)، کادمیوم (II) و سرب (II) با جذب زیستی تا ۹۹ درصد ثبت شد (Sahu و Verma، ۲۰۲۱).



شکل ۶- توسعه جاذب‌های زیستی مشتق شده از ضایعات میوه برای تصفیه پساب (Solangi و همکاران، ۲۰۲۱)

۴- جاذب‌های مبتنی بر زغال سنگ

در این بخش کاربردهای اخیر جاذب‌های مبتنی بر زغال سنگ برای حذف آلاینده‌های مختلف به‌ویژه فلزات سنگین از پساب‌های شهری بررسی می‌شود. به‌طور خاص، این بخش بر استفاده از اشکال مختلف جاذب‌های مبتنی بر زغال سنگ مانند زغال سنگ غیرمعدنی، زغال سنگ سولفونه، زغال سنگ حاوی کلسیم، زغال سنگ دوپ شده با کیتوزان[۶] و خاکستر بادیِ (Fly ash) زغال سنگ تمرکز دارد (Silva، ۲۰۲۳).

زغال سنگ یک ماده آلی است که حاوی مواد معدنی مختلف نیز می‌باشد. علاوه‌براین، مواد آلی معمولاً ۸۵ تا ۹۵ درصد زیست‌توده خشک زغال سنگ را تشکیل می‌دهند. زغال سنگ یک سنگ رسوبی پیچیده است که عمدتاً از محصولات جانبی بقایای گیاهی و مشتقات آنها تشکیل شده است (Schweinfurth، ۲۰۲۲). این ماده منبع کربن است، اگرچه دارای عناصر مختلفی مانند هیدروژن، اکسیژن، گوگرد و نیتروژن است. زغال سنگ و مشتقات آن نه تنها به‌عنوان سوخت، بلکه به‌عنوان مواد گران‌بها در فرآیندهای مختلف حفاظت از محیط‌زیست نیز استفاده می‌شود (Bustin و همکاران، ۱۹۹۳). زغال سنگ ارزان است و به وفور وجود دارد، حتی برخی از کشورها ذخایر متعدد زغال سنگ به‌عنوان معادن دارند. بااین‌حال، خواص ویژه‌ای دارند که آن را به یک ماده جاذب کارآمد برای حذف فلزات سنگین و عناصر بالقوه سمی (PTEs) تبدیل می‌کند (SME، ۲۰۲۳).

زغال سنگ می‌تواند کمپلکس‌های پایداری با فلزات سنگین ایجاد کند زیرا گروه‌های COOH- و گروه‌های فنل متصل به ساختارهای معطر دارند. گروه‌های کربوکسیل یا هیدروکسیل می‌توانند در واکنش‌های تبادل یونی شرکت کنند. Çigdem و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند استفاده از زغال سنگ توانایی زیادی برای حذف موثر یون‌های جیوه، سرب، کادمیوم، مس و روی از پساب شهری دارد. تجزیه و تحلیل زغال سنگ خام و زغال سنگ مبادله شده نشان داد به دلیل توسعه کربوکسیلات‌های فلزی تبادلی، مقدار قابل توجهی از فلزات سنگین حذف شده و روی سطح زغال سنگ دیده شدند (Younas و همکاران، ۲۰۲۱). در پژوهش‌های زیادی از جمله Anwar و همکاران (۲۰۰۹) نیز حذف کروم (VI) از پساب‌های شهری با استفاده از زغال سنگ تایید شد.

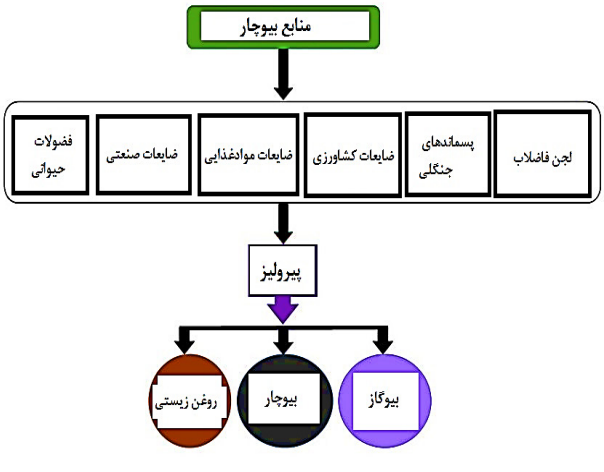
استفاده از زغال سنگ نارس یا پیت در تصفیه پساب شهری در چند دهه گذشته به دلیل تخلخل بالا و ظرفیت جذب آن مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از پژوهشگران زغال سنگ نارس را به چهار گروه طبقه‌بندی می‌کنند: پیت مور، پیت چوب، پیت علفی و پیت رسوبی. دارای خواص غنی، ارزان و همه کاره بودن و قابلیت جذب قوی برای سموم مختلف مانند PTEها و آلاینده‌های آلی است (Dehghani و همکاران، ۲۰۲۳). زغال سنگ نارس فرآوری نشده حاوی بسیاری از اجزای تشکیل‌دهنده مانند لیگنین، سلولز، اسیدهای فولویک و هیومیک؛ و گروه‌های عاملی قطبی مانند الکل‌ها، آلدئیدها، کتون‌ها، اسیدهای کربوکسیلیک و هیدروکسیدهای فنل می‌باشد که ظرفیت تبادل کاتیونی قوی‌ای دارند (Vecino و همکاران، ۲۰۱۳). راندمان حذف زغال سنگ نارس یا پیت برای رنگ‌ها در صورت تیمار با اسیدها بیشتر است. بر اساس پژوهش Cheng و همکاران (۲۰۲۳)، زغال سنگ نارس کارایی قابل توجهی در حذف فلز فلزات سنگین شامل مس (Cu)، منگنز (Mn)، کادمیوم (Cd) و جیوه (Hg) از پساب‌های شهری و صنعتی نشان داد.

۵- بیوچار

بیوچارهای حاصل از پسماندهای کشاورزی توجه بیشتری را در میان جاذب‌های ارزان و موثر برای تصفیه پساب شهری به خود جلب کرده‌اند (Jagadeesh و Sundaram، ۲۰۲۳). آن‌ها ساختار متخلخل و پایداری دارند و یک ماده جامد نامحلول و غنی از کربن هستند که توسط تجزیه در اثر حرارت (۷۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) در شرایط بی‌هوازی تولید می‌شوند. آنها را می‌توان از طیف وسیعی از محصولات زائد کشاورزی و سایر مواد زائد زیست‌توده مانند نی، پوست برنج، مخمر، خاک اره، پسماندهای آشپزخانه، باقی‌مانده چای و بسیاری دیگر تولید کرد (Hasnain و همکاران، ۲۰۲۳). شکل (۷) نمودار شماتیکی از مسیرهای تشکیل بیوچار از مواد اولیه مختلف را نشان می‌دهد.

بیوچار به‌عنوان یک روش کارآمد برای تصفیه پساب تایید شده است. توانایی آن برای جذب فلزات سنگین در دهه گذشته بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است و نشان می‌دهد که بیوچار ارزان، سازگار با محیط‌زیست، و حتی از زغال چوب فعال موثرتر است (Wang وهمکاران، ۲۰۲۱). خواص شیمیایی سطح بیوچار تحت تاثیر تغییرات پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی در طی پیرولیز قرار میگیرد. اگرچه راندمان جذب پایین بیوچار در رابطه با فلزات سنگین، استفاده از آن را در زمینه تصفیه پساب‌های شهری محدود می‌کند، اما بااین‌حال، تصور می‌شود که تخلخل پایین، سطح ویژه و محل‌های جذب پایین از عوامل مرتبط با این موضوع باشد (Hasnain و همکاران، ۲۰۲۳).

ساختار داخلی و سطحی بیوچار شامل تلفیقی از درشت منافذ، مزوپورها و میکروپورها است که به موجب آن بیوچار فلزات سنگین را در ساختار منافذ داخلی و سطحی خود حفظ می‌کند (Bolan و همکاران، ۲۰۲۳). پژوهش‌ها نشان داده است گروه‌های عاملی COOH- و OH- قبل و بعد از جذب به دلیل کمپلکس شدن با سرب و کادمیوم تغییر کرده‌اند. پیوند O- فلز باعث کاهش چگالی الکترونی O_2 می‌شود که انرژی محدود گروههای عاملی حاوی O_2 را به شدت کاهش می‌دهد و پایداری آن را بهبود می‌بخشد. برهم کُنش فلز را می‌توان با تداخل در پیوندهای C-C قطع کرد (Qiu و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه‌براین، O_2 که شامل گروه‌های عاملی می‌شود، هنگامی‌که یون‌ها با فلزات سنگین مبادله می‌شوند، H^+ منتشر می‌کند که منجر به کاهش pH محلول می‌شود. پتانسیل pH و شرایط ردوکس[۷] نقش مهمی در حذف عناصر بالقوه سمی (PTEs) مانند فلزات سنگین از پساب‌های شهری دارد (Jin و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۷- یک نمودار شماتیک از مسیرهای تشکیل بیوچار از مواد اولیه مختلف (Srivatsav و همکاران، ۲۰۲۰)

نانومواد: استفاده بالقوه در تصفیه پساب

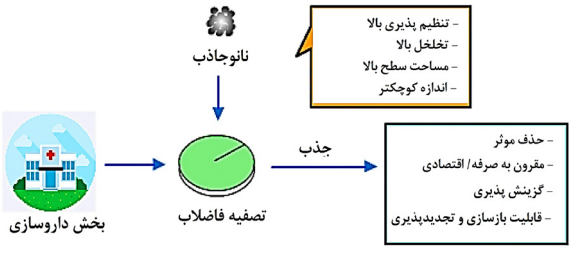
فناوری نانو در حوزه علم نانو وجود دارد. نانومواد، ریزترین ساختارهای جهان با قدر چند نانومتر هستند که توسط انسان سنتز شده‌اند. به طور ویژه، نانوذرات (NPs) قطعاتی هستند که یک جزء ساختاری دارند و در ابعادی بیش از ۱۰۰ نانومتر نیستند (Khan و همکاران، ۲۰۱۹). نانوذرات به اشکال متعددی مانند نانوسیم‌ها، کلوئیدها، فیلم‌ها، نقاط کوانتومی، ذرات و نانولوله‌ها در حال توسعه هستند. امروزه به‌منظور تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی، نانوذرات بسیار موثر، سازگار با محیط‌زیست و ارزان با عملکردهای منحصربه‌فرد توسعه یافته است (Mbarek و همکاران، ۲۰۲۲). باتوجه‌به خواص منحصربه‌فرد این مواد، می‌توان آن‌ها را به سه نوع تقسیم کرد که شامل نانوجاذب‌ها، نانوکاتالیست‌ها و نانوفیلم‌ها می‌باشند. نانوجاذب‌ها را می‌توان با استفاده از اتم‌های این اجزاء که از نظر شیمیایی مؤثر بوده و قابلیت جذب بالایی دارند و بر روی سطوح آن‌ها هستند، تولید کرد (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰b).

۱- نانوجاذب‌ها

استفاده از نانو جاذب‌ها برای حذف آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین در تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی یک رویکرد مثبت به‌شمار می‌آید. پتانسیل نانو جاذب‌ها در سال‌های اخیر بررسی شده‌اند. اندازه کوچکتر ذرات، فعالیت شیمیایی و ظرفیت جذب آن‌ها را افزایش می‌دهد (رادخواه و همکاران، ۱۴۰۰b). نانوجاذب‌ها به دلیل نقشی که در فرآیند جذب دارند، به گروه‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. این مواد شامل نانوذرات فلزی (NPs)، نانوذرات مغناطیسی و نانوذرات اکسید فلز هستند. علاوه‌براین، آخرین پیشرفت‌ها شامل نانومواد کربن، نانوذرات کربن و نانوصفحات کربنی است (Anjum و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه‌براین، انواع مختلفی از نانوذرات سیلیکونی به‌عنوان نانولوله‌های سیلیکونی جذب‌کننده، نانوذرات سیلیکونی و نانوصفحات سیلیکونی استفاده می‌شوند (Martínez-Carmona و Vallet-Regí، ۲۰۲۰). در پژوهش‌های مختلف، نانومواد مبتنی بر پلیمر، نانوالیاف و آئروژل‌ها نوعی از نانوذرات فلزی بودند که برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های شهری و صنعتی استفاده شدند (Younas و همکاران، ۲۰۲۱؛ Maleki و همکاران، ۲۰۲۴).

ترکیب شیمیایی، ساختار، حلالیت، شکل، ابعاد فراکتال (Fractal)، اندازه و شیمی سطح عواملی هستند که بر عملکرد نانوذرات مورد استفاده به‌عنوان جاذب تأثیر می‌گذارند (شکل ۸). فعالیت‌های شیمیایی و همچنین اندازه ذرات دو ویژگی مهم نانوذرات هستند (رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰). در مقایسه با سایر مواد (مانند دی اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم در مقیاس معمولی)، نانوذرات مزایای برجسته‌ای دارند (Altammar، ۲۰۲۳). علاوه‌براین،

این مواد می‌توانند با یک معرف خاص اصلاح شوند تا عملکرد پیش تغلیظ آن‌ها برای یونهای فلزی بهبود یابد. فرآیند جذب به ضریب جذب و بازسازی و توزیع آلاینده‌ها مطابق با شرایط تعادل بستگی دارد. علاوه‌براین، یک واکنش ردوکس با آلاینده‌های معدنی پایدار، شروع تغییر ساختار یونی را تسهیل می‌کند (Wysocka، ۲۰۲۳). بااین‌حال، برخی از پژوهشگران معتقد هستند که تغییرات در شرایط ردوکس بر اثرات سمی آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد (رادخواه و ایگدری، ۱۴۰۲). Ahmaruzzaman (۲۰۱۱) بیان کردند نانوجاذب‌ها می‌توانند فلزات سنگین مانند کروم، جیوه، روی، مس، نیکل و سرب را از پساب‌های شهری و صنعتی حذف نمایند. بااین‌حال، پرمصرف‌ترین نانوذرات به‌عنوان جاذب برای حذف فلزات سنگین شامل گرافن، اکسید آهن، اکسید منیزیم، کربن فعال، اکسید منگنز، اکسید روی، اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی (CNTs) می‌باشند (Younas و همکاران، ۲۰۲۱؛ Ardakani و Gholikandi، ۲۰۲۰؛ Le Ba و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۸- نانوجاذب‌ها رویکردی موثر برای حذف ترکیبات سمی از پساب (Neha و همکاران، ۲۰۲۱)

۲- نانوکامپوزیت‌ها در تصفیه پساب

نانوکامپوزیت‌ها (NCs) معمولاً مخلوطی از اجزاء (دو یا بیشتر) با خواص مختلف هستند که معمولاً به یک ماده واحد با مجموعه‌ای جامع از خواص پردازش می‌شوند (Ingrosso و همکاران، ۲۰۱۰). مزیت کلیدی استفاده از مواد کامپوزیت، توانایی ترکیب ویژگی‌های دو ماده برای کاربردهای خاص است. در شرایط فعلی، نانوذرات در زمینه‌های مختلف مانند ساخت‌وساز، هوانوردی، وسایل نقلیه و صنایع زیست¬پزشکی به محبوبیت قابل توجهی دست یافته‌اند. لازم‌به‌ذکر است پژوهشگران بر روی استفاده از این مواد در تصفیه پساب‌های شهری تمرکز کرده‌اند (Younas و همکاران، ۲۰۲۱).

نانوذرات (NPs) نسبت سطح به حجم بالایی دارند و می‌توانند به‌طور قابل توجهی خواص ماتریس (فلز/ پلیمر/ سرامیک) نانوذرات ساخته شده در آن‌ها را برای تشکیل مواد کامپوزیتی بهبود بخشند. در سال‌های اخیر، نانو ذرات به دلیل مساحت بالای سطح، مقرون‌به‌صرفه بودن، خواص ضد رسوب، پایداری حرارتی و ویژگی‌های مکانیکی عالی برای حذف ریزآلاینده‌ها استفاده شده‌اند (Gupta و همکاران، ۲۰۱۱؛ رادخواه و صادقی‌نژاد ماسوله، ۱۴۰۰).

۳- نانولوله‌های کربنی

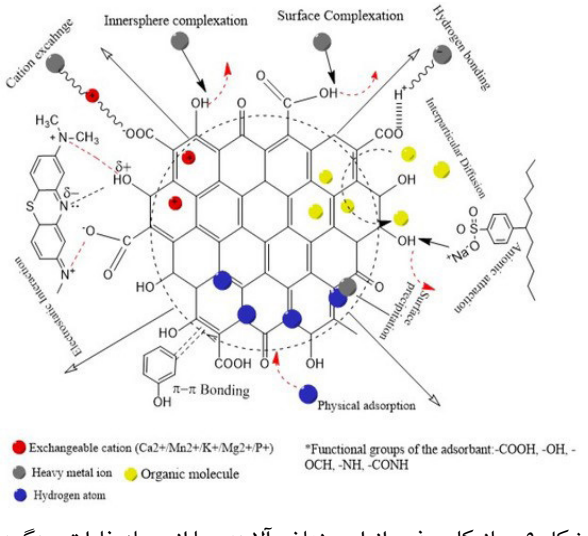
نانولوله‌های کربنی (CNTs) موادی هستند که به‌طور گسترده‌ای مورد پژوهش قرار گرفته‌اند که می‌توانند فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی مختلف را از پساب‌های شهری و صنعتی به‌واسطه سازوکار جذب، حذف نمایند. بااین‌حال، مصرف ناکافی، مشکلات ایجاد شده در جداسازی مواد و همچنین، اندازه ریز ذرات از جمله معایب استفاده از نانولوله‌های کربنی به‌عنوان جاذب می‌باشند (Abdollahi و همکاران، ۲۰۲۳). به‌منظور پرداختن به این مسائل، محققان نانولوله‌های کربنی معمولی را به نانولوله‌های کربنی اصلاح شده مانند نانولوله‌های کربنی چند جداره تغییر دادند. نانولوله‌های کربنی مغناطیسی اصلاح شده قابلیت مصرف بالایی دارند و می‌توانند به‌راحتی از پساب‌های شهری و صنعتی به‌واسطه خاصیت آهن‌ربایی حذف شوند. پژوهش‌های مختلف استفاده از نانولوله‌های کربنی چندجداره را برای حذف سرب، منگنز و مس گزارش کردند. Gupta و همکاران (۲۰۱۱) ظرفیت جذب نانولوله‌های کربنی اصلاح شده و اصلاح نشده را برای حذف آلومینیوم (Al) بررسی کردند. بر طبق نتایج به‌دست آمده، نانولوله‌های کربنی پوشش داده شده و اصلاح شده ظرفیت حذف بیشتری نسبت به نانولوله‌های کربنی بدون پوشش و اصلاح نشده نشان دادند.

تغییر سطح نانولوله‌های کربنی می‌تواند فعالیت جذبی آنها را بهبود بخشد. بسیاری از پژوهشگران از تکنیک‌های مختلفی شامل تیمار اسیدی، اشباع فلز و پیوند مولکول/گروه عملکردی به‌منظور اصلاح سطح استفاده کردند. اصلاح خواص نانولوله‌های کربنی روش دیگری برای بهبود کارایی آنها برای حذف آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین است. این امر می‌تواند به روش‌های مختلفی – به‌عنوان‌مثال، از طریق فناوری پلاسما، تغییرات شیمیایی و امواج مایکروویو- انجام شود. در میان این فناوری‌ها، فناوری پلاسما به دلیل مصرف انرژی کمتر و سازگاری آن با محیط‌زیست یکی از مطلوب‌ترین و مناسب‌ترین فناوری‌ها به‌شمار می‌رود. Chen و همکاران (۲۰۱۲) سودمندی نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با گروه‌های عملکردی مختلف برای بهبود کیفیت پساب شهری آلوده به فلزات سنگین را شرح دادند. علاوه‌براین، نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با فلزات/ اکسیدهای فلزی مانند MnO_2 و Al_2O_3 نتایج امیدوارکننده‌ای را برای سازوکار جذب خود نشان داده‌اند.

- **سازوکار جذب کربن فعال:** جذب مواد مختلف آلی، غیرآلی، آفت کش‌ها، سورفکتانت ها، فلزات سنگین و غیره بر روی سطوح جاذب می‌تواند از طریق سازوکارهای مختلفی از جمله تشکیل پیوندهای هیدروژنی، نیروهای واندروالس، برهم‌کنش های الکترواستاتیکی، بارش سطحی، سازوکارهای تبادل یونی، تبادل کاتیونی یا آنیونی، پُرشدن منافذ، برهم‌کُنش‌های (فعل و انفعالات) آب‌دوست یا آب‌گریز، فرآیندهای انتشار و غیره صورت گیرد (Alam و همکاران، ۲۰۲۰). حذف آلاینده‌ها با استفاده از جاذب معمولاً از چهار مرحله

مختلف پیروی می‌کند که عبارتند از: (۱) انتقال ماده جذب‌شونده به سطح جاذب، (۲) ایجاد فیلم (لایه) بر روی سطح جاذب، (۳) انتشار ماده جذب‌شونده در داخل منافذ و (۴) برهم‌کُنش بین منافذ و سطح جاذب با مولکول‌هایِ ماده جذب‌شونده. این نوع از برهم‌کُنش‌ها و فعل و انفعالات می‌تواند قوی، ضعیف یا خاص باشد (Sarkar و همکاران،۲۰۰۳؛Ahmed و همکاران،۲۰۱۵). در شکل (۹) جاذب‌های متفاوت و سازوکارهای مختلف آن‌ها برای اتصال آلاینده‌ها به کربن فعال نشان داده شده است (Alam و همکاران، ۲۰۲۰).

تبادل کاتیون و آنیون زمانی اتفاق می‌افتد که محل‌های مخالف هم در مولکول‌های جاذب و هم در مولکول‌های ماده جذب‌شونده وجود داشته باشند. در این مورد، ارزش پتانسیل زتای (zeta potential) جاذب‌بسیار مهم است زیرا نقش حیاتی در ترکیبات یونی مختلف دارد. ازاین‌رو، این نوع پیوندها به‌راحتی می‌توانند فرآیند جذب کلی را تشکیل داده و تسریع نمایند. به‌عنوان‌مثال، حذف متیلن بلو (MB) با جذب سطحی کربن فعال به این دلیل است که متیلن بلو به شکل کاتیونی MB^+ است. فرآیند جذب کلی از چهار مرحله ذکر شده در بالا پیروی می‌کند (Kannan و Meenakshisundaram، ۲۰۰۲). انواع مشابهی از برهم‌کنش‌های آنیونی و کاتیونی می‌تواند بین جاذب و ماده جذب‌شونده رخ دهد. اتم اکسیژن در کربن فعال می‌تواند اثرات قوی بر جذب آلاینده‌ها داشته باشد، به‌ویژه زمانی که در سطح کربن ظاهر می‌شود (Pastor-Villegas و همکاران، ۱۹۹۸). بسیاری از پژوهش‌ها نشان دادند جذب یون به کربن فعال به دلیل تبادل یونی با پروتون‌ها در گروه‌های عملکردی اکسیژن رخ می‌دهد (Nieto-Márquez و همکاران، ۲۰۱۷). بر اساس پژوهش‌های انجام شده، یون‌های فلزی سخت مانند روی (Zn^{2+}) و نیکل (Ni^{2+}) به سطح گروه عاملی (-COOH, -OH) جذب می‌شوند (Alam و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۹- سازوکار جذب انواع مختلف آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین روی سطح کربن فعال (Alam و همکاران، ۲۰۲۰)

بازیابی، احیا و دفع جاذب‌های استفاده شده

بازیابی و احیا جاذب یکی از معیارهای مهم در انتخاب آن می‌باشد. احیای جاذب می‌تواند کل هزینه‌های فرآیند و وابستگی روش به تامین مداوم منابع را کاهش دهد. موفقیت فرآیند دفع یا واجذب (Desorption process) به نوع سازوکار استفاده شده در حذف آلاینده‌ها و استحکام مکانیکی ماده جاذب بستگی دارد (Baskar و همکاران، ۲۰۲۲). از آنجایی‌که بیشتر جاذب‌های زیستی سیستم تبادل یونی برای عناصر بالقوه سمی مانند فلزات سنگین دارند، شرایط اسیدی برای دفع این عناصر کافی است. بنابراین، استفاده از اسیدها در دفع مفید است، زیرا محلول‌های اسیدی از شایع‌ترین ضایعات در تمام صنایع به‌شمار می‌روند (Ungureanu و همکاران، ۲۰۲۳).

جاذب‌هایی که در تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی استفاده می‌شوند، می‌توانند بازیابی، دفع یا بازیافت شوند. بسیاری از پژوهشگران بیان داشتند که بازیابی آلاینده‌ها (به ویژه فلزات ارزشمند) و درعین‌حال، احیای جاذب برای استفاده مجدد اهمیت ویژه‌ای دارد (Younas و همکاران، ۲۰۲۱). کارایی یک ماده به‌عنوان جاذب نه تنها به قابلیت جذب آن بستگی دارد، بلکه به سهولت بازیابی و بازیافت آن نیز مرتبط می‌باشد (Ngeno و همکاران، ۲۰۲۲). بازیابی و دفع مواد جاذب در چند سال گذشته به طور مفصل بحث شدند تا بتواند خطرات بالقوه این مواد را کاهش دهد. به‌طورکلی، وجود آلاینده‌ها مانند آرسنیک (As) و سایر فلزات سمی در مواد جاذب می‌تواند مشکلات محیط‌زیستی جدی ایجاد کند. بنابراین، دفع جاذب‌ها به‌عنوان یکی از نکات مهم در این زمینه مطرح می‌باشد. از این نظر، تثبیت/جامدسازی (stabilization/solidification) به‌عنوان یک فناوری مناسب برای پاک‌سازی جاذب‌ها در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، این گزینه به‌طور گسترده برای دفع جاذب‌های سمی استفاده می‌شود، زیرا می‌تواند این مواد را از طریق روش‌های شیمیایی، فیزیکی یا حرارتی به موادی با سمیت کمتر تبدیل کند (Tchounwou و همکاران، ۲۰۱۲).

یک ماده جاذب فقط با احتراق یا انحلال در اسیدها یا بازهای قوی حذف می‌شود. اگر از یک ماده کم هزینه به‌عنوان جاذب زیستی برای بازیافت فلزات گران‌بها استفاده شود، از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. بااین‌حال، تاکنون بر دفع غیرمخرب از جاذب زیستی تمرکز شده است. در بسیاری از موارد، اسیدها یا بازهای آلی رقیق می‌توانند به طور موثر جاذب را دفع کنند، اگرچه ممکن است آسیب ساختاری به خود جاذب وارد کنند که منجر به کاهش ظرفیت جاذب پس از بازیابی می‌شود. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، pH محلول تأثیر قابل توجهی بر جذب آلاینده‌های هدف دارد (Maslova و همکاران، ۲۰۲۱).

بنابراین، از دیدگاه نظری می‌توان به سادگی با کنترل میزان pH در محلول دفع به احیای جاذب‌ها و بازیابی آلاینده‌ها کمک کرد. مزایای احیای جاذب شامل قابلیت استفاده مجدد از این مواد، کاهش هزینه‌های دفع منابع فلزی و عدم نیاز به ضایعات ثانویه می‌باشد (Gkika و همکاران، ۲۰۲۲). تاکنون، محلول‌های مختلفی از جمله HCl، H_2SO_4، $NaNO_3$، NaOH، HNO_3، NaCl، CH_3COONa و $NaHCO_3$ برای بازیابی و احیای جاذب‌ها استفاده شدند (Younas و همکاران، ۲۰۲۱).

روش دیگر استخراج با حلال (استخراج آلی) است که در این روش باید توجه ویژه‌ای به انتخاب حلال و مقرون‌به‌صرفه بودن آن نمود (Zhang و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه‌براین، مخلوطی از حلال‌های آلی و محلول‌های آبی می‌تواند در موارد خاص اثرات مفیدی داشته باشد (Garcia و همکاران، ۲۰۱۸). با استفاده از معرف‌های فنتون، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته برای فعال‌سازی مجدد حرارتی یا فرآیندهای فوتوکاتالیستی برای بازسازی مواد امکان‌پذیر است (Unuabonah و Taubert، ۲۰۱۴). بااین‌وجود، آن‌ها برای بازسازی نانوکامپوزیت‌ها به‌منظور حامل‌های آلی مناسب نیستند، زیرا اکسیداسیون می‌تواند باعث تجزیه مواد شود (Younas و همکاران، ۲۰۲۱).

جلبک Ascophyllum nodosum مملو از کبالت (Co) که در معرض یک محلول اسیدی قرار می‌گیرد، می‌تواند دفع/واجذب خوبی داشته باشد، اما منجر به کاهش قابل توجه وزن زیست‌توده جلبک می‌شود که بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. بنابراین، پژوهشگران مواد جاذب دیگری را مورد آزمایش قرار دادند و دریافتند که ۰/۰۵ مولار کلسیم کلرید (در HCl) می‌تواند یک جاذب موثر باشد (Vijayaraghavan و Balasubramanian، ۲۰۱۵). روش‌های دیگر، مانند کمپلکس‌سازی و کیلاسیون نیاز به غربالگری گسترده‌ای از جاذب‌های مؤثر دارند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که معدود معرف‌های شیمیایی، از جمله اتیلن دی آمین تتراستیک اسید (EDTA)، برای زیست‌توده‌های مختلف موثر و بی‌ضرر هستند (Younas و همکاران، ۲۰۲۱).باتوجه‌به این موضوع، انتخاب یک جاذب زیستی مناسب برای حذف یون‌های فلزی از پساب‌های شهری و صنعتی امر دشواری است. این انتخاب باید بر اساس معیارهای متعددی باشد که تأثیر مستقیمی بر عملکرد جاذب‌های زیستی دارد.

مقایسه از نظر کارایی و هزینه اقتصادی

دو عامل حیاتی که فرآیند جذب را اقتصادی می‌کند، کارایی (ظرفیت جذب) و هزینه اقتصادی جاذب مورد استفاده است. بااین‌حال، در مقایسه با جاذب‌های استاندارد، ظرفیت جذب نسبی است زیرا در چندین فاکتور متفاوت است که شامل غلظت اولیه جاذب است (Bassareh و همکاران، ۲۰۲۳). هزینه یک جاذب به عوامل مختلفی از جمله دسترسی، منابع، پردازش مورد نیاز، شرایط پردازش، موقعیت‌های بازیافت و نیمه عمر بستگی دارد. از آنجایی‌که خاکستر بادی بدون هزینه در نیروگاه‌ها در دسترس است، استفاده از آن اغلب هزینه‌های حمل و نقل را به همراه دارد (Khan و همکاران، ۲۰۲۳). قیمت خاکستر بادی از سرباره ضایعات ۰/۰۰۲ دلار به‌ازای هر کیلوگرم است. با هزینه حمل و نقل، مواد شیمیایی، انرژی الکتریکی و غیره که در طول فرآیند استفاده می‌شود، هزینه محصول نهایی حدود ۰/۰۰۹ دلار به‌ازای هر کیلوگرم می‌باشد. پس از خاکستر بادی، هزینه جاذب‌های کربن‌دار (مانند کود) کمتر از ۰/۱ دلار آمریکا به‌ازای هر کیلوگرم است که آن را به یک ماده مفید تبدیل می‌کند. کربن فعال معمولاً به‌دلیل ترکیبی از دو عامل، قابلیت جذب و هزینه جاذب، قیمت‌هایی دارد که معمولاً بیش از ۳ دلار است (Younas و همکاران، ۲۰۲۱؛ Mulay و Martsinovich، ۲۰۲۲).

باتوجه‌به تغییرات تقاضای بازار، کیفیت و کمیت پساب‌های مختلف نیز در حال تغییر است. این امر منجر به تغییر در هزینه‌های تصفیه شده است (Zimmermann و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، اطلاعات کامل در مورد هزینه تصفیه پساب‌های شهری در ارتباط با "روش جذب" به‌ندرت در منابع علمی ارائه شده است. در نتیجه، ارزیابی کلی هزینه و سودمندی فرآیند جذب برای حذف فلزات سنگین باید با جزئیات بیشتری بررسی شودو برای استفاده در آینده پیشنهاد شود. هزینه‌های نیروی کار در بین کشورهای مختلف، متفاوت است. برای به دست آوردن یک برآورد دقیق از هزینه‌های عملیاتی یک تاسیسات تصفیه پساب شهری، پژوهش‌ها در مقیاس خاصی باید انجام شود. به دلیل شرایط عملیاتی متفاوت، مقایسه مستقیم هزینه‌های تصفیه می‌تواند دشوار باشد (Mahamuni و Adewuyi، ۲۰۱۰). علاوه‌براین، کل هزینه‌های تصفیه انواع مختلف پساب‌های شهری به روش مورد استفاده در شرایط محلی بستگی دارد. این موضوع را می‌توان چنین بیان نمود که اکثر صنایع در مناطق تجاری یا صنعتی شهرها واقع شده‌اند. سرعت جریان و ویژگی‌های پساب به‌طور گسترده‌ای متفاوت است و تخمین دقیق هزینه‌های تصفیه دشوار است. این مسئله، مقایسه فناوری‌های تصفیه را از نظر نسبت هزینه به فایده برای پساب‌های حاوی فلزات سنگین و سایر عناصر سمی (PTEs) دشوار می‌کند (Yin و همکاران، ۲۰۲۰).

در جدول (۳) کارایی جاذب‌های مختلف در حذف یکی از مهمترین فلزات سنگین (آرسنیک: As) به‌صورت موردی نشان داده شده است. در این جدول، میزان تاثیر و کارایی نانوجاذب‌ها، بیوچارها، جاذب‌های مبتنی بر زغال‌سنگ، مواد معدنی (مانند: زئولیت) و ضایعات میوه و گیاهان بررسی شد.

جدول ۳- کارایی جاذب‌های مختلف در حذف آرسنیک (Yeo و همکاران، ۲۰۲۱)

نوع جاذب	مقدار جاذب (گرم)	مقدار محلول (ml)	غلظت اولیه (mg/L)	حذف (٪)	
				As (V)	As(III)
جاذب‌های مبتنی بر زغال سنگ نارس	۰/۵	۴۰	۸-۹۰۴	-	۴۳-۱۰۰
بیوچار اصلاح شده با گل قرمز (RM-BC)[8]	۰/۱۲	۳۰	۱-۵۰	۳۲-۱۰۰	۴-۵۰
نانوذرات مغناطیسی کیتوزان (MCNP)	۰/۰۵	۱۰۰	۰/۲-۵۰	۶۵-۱۰۰	۶۰-۱۰۰
بیوچار چوب کاج	۰/۰۵	۲۰	۱-۵۰	۲-۲۵	-
زئولیت کلینوپتیلولیت اصلاح شده (MCZ)	۱	۲۰۰	۰/۰۰۵-۰/۰۵	۴۰-۵۵	-
زغال سنگ نارس اصلاح شده با آهن	۰/۵	۴۰	۱۰۰-۲۷۰	۷۰-۱۰۰	-
زیست توده مرکبات لیمتا (PPAC-۵۰۰)	۰/۱۵	۵۰	۰/۰۵-۲/۵	۶۲-۱۰۰	۵۵-۹۳
برگ‌های پودر Pinus roxburghii	۰/۲-۲	۵۰	۱۰	۴-۷۵	-
مونت موریلونیت‌های اصلاح شده با آهن	۰/۰۲۵-۰/۳	۲۵	۰/۰۰۵	۹۷-۱۰۰	۹۶-۱۰۰
زیست‌توده گیاه Momordica charantia	۰/۰۵-۰/۲۵	۵۰	۰/۵	-	۶۶-۸۸
زغال استخوان	۰/۰۵-۰/۴	۵۰۰	۰/۵	۳۰-۱۰۰	-

نتیجه‌گیری و رهیافت ترویجی

در شرایط فعلی، فناوری‌های پیشرفته تصفیه آب برای تامین آب با کیفیت بالا و کاهش آلاینده‌های شیمیایی و بیولوژیکی از ضروریات به‌شمار می‌روند. تاکنون، بیشتر یافته‌های منتشر شده شامل پژوهش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی است. نقطه ضعف اصلی استفاده از جاذب‌های مقرون‌به‌صرفه به‌عنوان جایگزینی برای کربن فعال و همچنین سایر فناوری‌های گران قیمت تصفیه، نبود اطلاعات در این زمینه می‌باشد.

به‌منظور ترویج استفاده از جاذب‌های غیرمتعارف در مقیاس بزرگ، پژوهش‌های بیشتری لازم است. بااین‌حال، نانوتکنولوژی شامل جذب آلاینده‌ها با استفاده از نانومواد است که یکی از بهترین رویکردها برای تصفیه پساب‌های شهری و صنعتی می‌باشد. تاکنون، تصفیه بسیاری از پساب‌های شهری با استفاده از نانومواد متعدد با موفقیت انجام شده است. در میان این مواد، نانو جاذب‌ها (بر اساس اکسیدهای CNT، MgO، ZnO، MnO، Fe)، فوتوکاتالیست‌ها و الکتروکاتالیست‌ها قابل بررسی هستند.

هر فناوری مزایا و کارایی خود را در حذف آلاینده‌ها دارد. مطالعه حاضر نشان داد که نانوجاذب‌ها می‌توانند فلزات سنگین مانند کروم، جیوه، روی، مس، نیکل و سرب را از پساب‌های شهری و صنعتی حذف نمایند. علاوه‌براین، نانوذرات فتوکاتالیستی نیز می‌توانند برای تصفیه آلاینده‌های سمی مانند فلزات سنگین استفاده شوند. باتوجه‌به اینکه نانومواد در مقایسه با مواد سنتی (مانند کربن فعال) هنوز ارزان نیستند، پژوهش‌های آینده باید روی فرآیندهای موثری متمرکز شود که فقط به غلظت‌های اندکی از نانومواد نیاز دارند. علاوه‌براین، پژوهش‌ها و فعالیت‌های بیشتری برای توسعه روش‌های مقرون‌به‌صرفه به‌منظور سنتز نانومواد و افزایش بازده آزمایش در مقیاس بزرگ مورد نیاز است. به‌طورکلی، خلأهای پژوهش‌های زیر باید در طی پژوهش‌های آینده برطرف شوند:

الف) کارایی جاذب‌های مورد بحث، به‌ویژه جاذب‌های مبتنی بر کربن، باید در ترکیب با سایر روش‌های تصفیه بررسی شود.

ب) انجام پژوهش‌های در سطح سلولی و مولکولی برای درک بهتر سازوکارهای جاذب در تصفیه پساب‌های شهری لازم است.

پ) به غیر از پژوهش‌های آزمایشگاهی، باید فعالیت‌های بیشتری روی مطالعات میدانی انجام شود.

ت) پژوهش‌ها و فعالیت‌های بیشتری برای توسعه روش‌های مقرون‌به‌صرفه به‌منظور سنتز نانومواد و افزایش بازده آزمایش در مقیاس بزرگ مورد نیاز است.

ث) واکنش‌های میکروبی در محیط‌های آبی باید بررسی شود تا درک جامعی نسبت به اثرات محیط‌زیستی جاذب‌ها حاصل شود.

پی‌نوشت‌ها

1-Potential toxic elements (PTEs)
2-Nanoparticles
3-Carbon nanotubes
4-Plant-based nanocomposites
5-Biochar
6-Chitosan-doped coals
7-Redox condition
8-Red mud-modified biochar

منابع

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰الف). تجمع فلزات سنگین در ماهیان: تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و سلامت جامعه. مجله طب دریا، ۳(۴)، ۲۳۶-۲۴۵. doi: 10.30491/3.4.236

رادخواه، علیرضا، ایگدری، سهیل، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰ ب). مروری بر فیلتراسیون غشایی و بررسی کارایی آن در بهبود کیفیت آب در سیستم‌های آبزی‌پروری مداربسته (RAS). آب و توسعه پایدار، ۸(۳)، ۸۱-۸۸. doi: 10.22067/jwsd.v8i3.2105.1050

رادخواه، علیرضا، و صادقی‌نژاد ماسوله، اسماعیل. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر عوامل فیزیکوشیمیایی آب بر زیست‌فراهمی، میزان سمیت و سطح اثرگذاری نانو ذرات فلزی در اکوسیستم‌های آبزی. آب و توسعه پایدار، ۸(۲)، ۷۱-۹۰. doi: 10.22067/jwsd.v8i2.1019

رادخواه، علیرضا، و ایگدری، سهیل. (۱۴۰۲). کاربرد نانوذرات نقره (Ag-NPs) در میکروب‌زدایی آب در سیستم‌های پرورش آبزیان و اثرات ناشی از رهایش آن در محیط. آب و توسعه پایدار، ۱۰(۲)، ۱۰۹-۱۲۶. doi: 10.22067/jwsd.v10i2.2301-1209

Abdollahi, S., Raissi, H., & Zaboli, A. (2023). Adsorption Efficiency of Carbon Materials for the Removal of Organic Pollutants: DDT from Aqueous Solution. Journal of Physical Chemistry B, 127(49), 10518-10528. doi: 10.1021/acs.jpcb.3c04825

Aftab, K., Akhtar, K., Kausar, A., Khaliq, S., Nisar, N., Umbreen, H., & Iqbal, M. (2017). Fungal strains isolation, identification and application for the recovery of Zn(II) ions. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 175, 282-290. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2017.08.028

Agasti, N., Gautam, V., Manju, P., Pandey, N., Genwa, M., Meena, P.L., Tandon, S., & Samantaray, R. (2022). Carbon nanotube based magnetic composites for decontamination of organic chemical pollutants in water: A review. Applied Surface Science Advances, 10, 100270. doi: 10.1016/j.apsadv.2022.100270

Aghababaei, A., Ncibi, M.C., & Sillanpää, M. (2017). Optimized removal of oxytetracycline and cadmium from contaminated waters using chemically-activated and pyrolyzed biochars from forest and wood-processing residues. Bioresource Technology, 239, 28-36. doi: 10.1016/j.biortech.2017.04.119

Ahmadi, A., Foroutan, R., Esmaeili, H., & Tamjidi, S. (2020). The role of bentonite clay and bentonite clay@ MnFe2O4 composite and their physico-chemical properties on the removal of Cr(III) and Cr(VI) from aqueous media. Environmental Science and Pollution Research, 27(4), 1-14. doi: 10.1007/s11356-020-07756-x

Ahmed, M.B., Zhou, J.L., Ngo, H.H., & Guo, W. (2015). Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater: Progress and challenges. Science of The Total Environment, 532, 112–126. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.130

Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. Advances in Colloid and Interface Science, 166(1–2), 36-59. doi: 10.1016/j.cis.2011.04.005

Alam, M.M., Hossain, M.A., Hossain, M.D., Johir, M.A.H., Hossen, J., Rahman, M.S., Zhou, J.L, Hasan, ATMK., Karmakar, A.K., & Ahmed, M.B. (2020). The Potentiality of Rice Husk-Derived Activated Carbon: From Synthesis to Application. Processes, 8(2), 203. doi: 10.3390/pr8020203

Alazaiza, M.Y.D., Albahnasawi, A., Ali, G.A.M., Bashir, M.J.K., Copty, N.K., Amr, S.S.A., Abushammala, M.F.M., & Al Maskari, T. (2021). Recent Advances of Nanoremediation Technologies for Soil and Groundwater Remediation: A Review. Water, 13(16), 2186. doi: 10.3390/w13162186

Al-Enezi, G., Hamoda, M.F., & Fawzi, N. (2004). Ion exchange extraction of heavy metals from wastewater sludges. Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 39(2), 455-464. doi: 10.1081/ese-120027536

Altammar, K.A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. Front Microbiol., 14, 1155622. doi: 10.3389/fmicb.2023.1155622

Anjum, M., Miandad, R., Waqas, M., Gehany, F., & Barakat, M.A. (2016). Remediation of wastewater using various nano-materials. Arabian Journal of Chemistry, 22, 1-15. doi: 10.1016/j.arabjc.2016.10.004

environmental applications. Science of the Total Environment, 886, 163968. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163968

Bożym, M., Gendek, A., Siemiątkowski, G., Aniszewska, M., & Malaťák, J. (2021). Assessment of the Composition of Forest Waste in Terms of Its Further Use. Materials (Basel), 14(4), 973. doi: 10.3390/ma14040973

Bustin, R.M., Mastalerz, M., & Wilks, K.R. (1993). Direct determination of carbon, oxygen and nitrogen content in coal using the electron microprobe. Fuel, 72(2), 181-185. doi: 10.1016/0016-2361(93)90395-I

Chen, H., Li, J., Shao, D., Ren, X., & Wang, X. (2012). Poly (acrylic acid) grafted multiwall carbon nanotubes by plasma techniques for Co (II) removal from aqueous solution. Chemical Engineering Journal, 210, 475-481. doi: 10.1016/j.cej.2012.08.082

Cheng, J., Zhang, S., Fang, C., Ma, L., Duan, J., Fang, X., & Li, R. (2023). Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution Using Biotransformed Lignite. Molecules, 28(13), 5031. doi: 10.3390/molecules28135031

Çigdem, A., Emel, B., BektaŞ, S., Genç, O., & Yürüm, Y. (2000). Cation exchange properties of low rank Turkish coals: removal of Hg, Cd and Pb from waste water. Fuel Processing Technology, 68(2), 111-120. doi: 10.1016/S0378-3820(00)00126-0

Czelej, K.C., & Kurzydlowski, K.J. (2016). CO2 stability on the Ni low-index surfaces: van der Waals corrected DFT analysis. Catal Commun, 80, 33-38. doi: 10.1016/j.catcom.2016.03.017

Da browski, A. (2001). Adsorption - from theory to practice. Adv Colloid Interface Science, 93, 135-224.

Das, T.K., & Poater, A. (2021). Review on the Use of Heavy Metal Deposits from Water Treatment Waste towards Catalytic Chemical Syntheses. International Journal of Molecular Sciences, 22(24), 13383. doi: 10.3390/ijms222413383

Dehghani, M.H., Ahmadi, S., Ghosh, S., Othmani, A., Osagie, C., Meskini, M., Sami, AlKafaas S., Malloum, A., Ahmad Khanday, W., Oluwaseun Jacob, A., GökkuŞ, Ö., Oroke, A., Martins Chineme, O., Rao Karri, R., & Lima, E.C. (2023). Recent advances on sustainable adsorbents for the remediation of noxious pollutants from water and wastewater: A critical review.

Anwar, J., Shafique, U., Salman, M., Zaman, W., Anwar, S., & Anzano, J.M. (2009). Removal of chromium (III) by using coal as adsorbent. Journal of Hazardous Materials, 171(1-3), 797-801. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.076

Ardakani, M.N., & Gholikandi, G.B. (2020). Microbial fuel cells (MFCs) in integration with anaerobic treatment processes (AnTPs) and membrane bioreactors (MBRs) for simultaneous efficient wastewater/sludge treatment and energy recovery -A state-of-the-art review. Biomass and Bioenergy, 141, 5-23.

Aziz, M., & Kasongo, G. (2021). The Removal of Selected Inorganics from Municipal Membrane Bioreactor Wastewater Using UF/NF/RO Membranes for Water Reuse Application: A Pilot-Scale Study. Membranes (Basel), 11(2), 117. doi: 10.3390/membranes11020117

Baskar, A.V., Bolan, N, Son, A.H, Sooriyakumar, P., Kumar M., & Kadambot, H.M. (2022). Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. Science of the Total Environment, 822, 153555. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153555

Bassareh, H., Karamzadeh, M., & Movahedirad, S. (2023). Synthesis and characterization of cost-effective and high-efficiency biochar for the adsorption of Pb2+ from wastewater. Scientific Reports, 13, 15608. doi: 10.1038/s41598-023-42918-0

Birniwa, A.H., Habibu, S., Sa'ad Abdullahi, S., Edrees Adam Mohammad, R., & Jagaba, A.H. (2024). Membrane technologies for heavy metals removal from water and wastewater: A mini review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9, 100538. doi: 10.1016/j.cscee.2023.100538

Blasi, A., Verardi, A., Lopresto, C.G., Siciliano, S., & Sangiorgio, P. (2023). Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview. Recycling, 8(4), 61. doi: 10.3390/recycling8040061

Bolan, S., Hou, D., Wang, L., Hale, L., Egamberdieva, D., Tammeorg, P., Li, R., Wang, B., Xu, J., Wang, T., Sun, H., Padhye, L.P., Wang, H., Siddique, K.H.M., Rinklebe, J., Kirkham, M.B. & Bolan, N. (2023). The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and

Hasnain, M., Munir, N., Abideen, Z., Zulfiqar, F., Werner, Koyro, H., El-Naggar, A., Caçador, I., Duarte, B., Rinklebe, J., & Hong Yong, J.W. (2023). Biochar-plant interaction and detoxification strategies under abiotic stresses for achieving agricultural resilience: A critical review. Ecotoxicology and Environmental Safety, 249, 114408. doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114408

Hussain, A., Madan, S., & Madan, R. (2021). Removal of Heavy Metals from Wastewater by Adsorption. IntechOpen, 1, 2-22. doi: 10.5772/intechopen.95841

Ingrosso, C., Panniello, A., Comparelli, R., Curri, M.L., & Striccoli, M. (2010). Colloidal Inorganic Nanocrystal Based Nanocomposites: Functional Materials for Micro and Nanofabrication. Materials, 3(2), 1316–1352. doi: 10.3390/ma3021316

Jagadeesh, N., & Sundaram, B. (2023). Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. Journal of Hazardous Materials Advances, 9, 100226. doi: 10.1016/j.hazadv.2022.100226

Jin, H., Capareda, S., Chang, Z., Gao, J., Xu, Y., & Zhang, J. (2014). Biochar pyrolytically produced from municipal solid wastes for aqueous As (V) removal: Adsorption property and its improvement with KOH activation. Bioresource Technology, 169, 622–629. doi: 10.1016/j.biortech.2014.06.103

Kannan, N., & Meenakshisundaram, M. (2002). Adsorption of Congo Red on Various Activated Carbons. A Comparative Study. Water, Air, and Soil Pollution, 138, 289-305. doi: 10.1023/A:1015551413378

Karić, N., Alexandra, S., Maia, Teodorović, A., Atanasova, N., Langergraber, G., Crini, G., Ribeiro, A.R.L., & Dolić v. (2022). Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. Chemical Engineering Journal Advances, 9, 100239. doi: 10.1016/j.ceja.2021.100239

Khalfaoui, A., Mahfouf Bouchareb, E., Derbal, K., Boukhaloua, S., Chahbouni, B., & Bouchareb, R. (2022). Uptake of Methyl Red dye from aqueous solution using activated carbons prepared from Moringa Oleifera shells. Cleaner Chemical Engineering, 4, 100069. doi: 10.1016/j.clce.2022.100069

Arabian Journal of Chemistry, 16(12), 105303. doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105303

Elgarahy, A.M., Elwakeel, K.Z., Mohammad, S.H., & Elshoubaky, G.A. (2021). A critical review of biosorption of dyes, heavy metals and metalloids from wastewater as an efficient and green process. Cleaner Engineering and Technology, 4, 100209. doi: 10.1016/j.clet.2021.100209

Fatima, S.S., Borhan, A., Ayoub, M., & Ghani, N.A. (2021). Development and progress of functionalized silica-based adsorbents for CO2 capture. Journal of Molecular Liquids, 338, 116913. doi: 10.1016/j.molliq.2021.116913

Feng, N., Guo, X., & Liang, S. (2009). Adsorption study of copper (II) by chemically modified orange peel. Journal of Hazard Materials, 164, 1286-1292. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.096

Freitas, J.V., Nogueira, F.G.E., & Farinas, C.S. (2019). Coconut shell activated carbon as an alternative adsorbent of inhibitors from lignocellulosic biomass pretreatment. Industrial Crops and Products, 137, 16-23. doi: 10.1016/j.indcrop.2019.05.018

Garcia, M., Knuutila, H.K., Edwin Aronu, U., & Gu, S. (2018). Influence of substitution of water by organic solvents in amine solutions on absorption of CO2. International Journal of Greenhouse Gas Control, 78, 286-305. doi: 10.1016/j.ijggc.2018.07.029

Gil, A., Santamaría, L., Korili, S.A., Vicente, M.A., Barbosa, L.V., de Souza, S.D., Marçal, L., de Faria, E.H., & Ciuffi, K.J. (2021). A review of organic-inorganic hybrid clay based adsorbents for contaminants removal: Synthesis, perspectives and applications. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(5), 105808. doi: 10.1016/j.jece.2021.105808

Gkika, D.A., Mitropoulos, A.C., & Kyzas, G.Z. (2022). Why reuse spent adsorbents? The latest challenges and limitations. Science of The Total Environment, 822, 153612. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153612

Gupta, V.K., Agarwal, S., & Saleh, T.A. (2011). Synthesis and characterization of alumina-coated carbon nanotubes and their application for lead removal. Journal of Hazardous Materials, 185, 17–23. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.053

Maleki, F., Razmi, H., Rashidi, M.R., Yousefi, M., & Ghorbani, M. (2024). Recent advances in developing electrochemical (bio) sensing assays by applying natural polymer-based electrospun nanofibers: A comprehensive review. Microchemical Journal, 197, 109799. doi: 10.1016/j.microc.2023.109799

Maslova, M., Mudruk, N., Ivanets, A., Shashkova, I., & Kitikova, N. (2021). The effect of pH on removal of toxic metal ions from aqueous solutions using composite sorbent based on Ti-Ca-Mg phosphates. Journal of Water Process Engineering, 40, 101830. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101830

Mahamuni, N.N., & Adewuyi, Y.G. (2010). Advanced oxidation processes (AOPs) involving ultrasound for waste water treatment: A review with emphasis on cost estimation. Ultrasonics Sonochemistry, 17(6), 990-1003. doi: 10.1016/j.ultsonch.2009.09.005

Martínez-Carmona, M., & Vallet-Regí, M. (2020). Advances in Laser Ablation Synthesized Silicon-Based Nanomaterials for the Prevention of Bacterial Infection. Nanomaterials (Basel), 10(8), 1443. doi: 10.3390/nano10081443

Matei, E., Râpă, M., Predescu, A.M., Țurcanu, A.A., Vidu, R., Predescu, C., Bobirica, C., Bobirica, L., & Orbeci, C. (2021). Valorization of Agri-Food Wastes as Sustainable Eco-Materials for Wastewater Treatment: Current State and New Perspectives. Materials, 14(16), 4581. doi: 10.3390/ma14164581

Mbarek, W.B., Escoda, L., Saurina, J., Pineda, E., Alminderej, F.M., Khitouni, M., & Suñol, J.J. (2022). Nanomaterials as a Sustainable Choice for Treating Wastewater: A Review. Materials (Basel), 15(23), 8576. doi: 10.3390/ma15238576

Mortada, W., Moustafa, A., Ismail, A., Hassanien, M., & Aboud, A. (2015). Microwave assisted decoration of titanium oxide nanotubes with CuFe2O4 quantum dots for solid phase extraction of uranium. RSC Advances, 5, 62414-62423. doi: 10.1039/C5RA10304E

Mulay, M.R., & Martsinovich, N. (2022). Water Pollution and Advanced Water Treatment Technologies. In: Brears, R.C. (Eds) The Palgrave Encyclopedia of Urban and Regional Futures. Palgrave Macmillan,

Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y.M., Huang, Y.Z., & Zhu, Y.G. (2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. Environmental Pollution, 152(3), 686-692. doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.056

Khan, U., Ogbaga, C.C., Omolabake Abiodun, O.A., Adeleke, A.A., Ikubanni, P.P., Okoye, P.U., & Okolie, J.A. (2023). Assessing absorption-based CO2 capture: Research progress and techno-economic assessment overview. Carbon Capture Science and Technology, 8, 100125. doi: 10.1016/j.ccst.2023.100125

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. Arabian Journal of Chemistry, 12(7), 908-931. doi: 10.1016/j.arabjc.2017.05.011

Kolesnikov, S., Minnikova, T., & Kazeev, K. (2022). Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region). Water, Air, and Soil Pollution, 233, 18. doi: 10.1007/s11270-021-05496-3

Kuma, N.S. (2023). Smart and innovative nanotechnology applications for water purification. Hybrid Advances, 3, 100044. doi: 10.1016/j.hybadv.2023.100044

Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., & Naidu, R. (2015). Bioremediation potential of natural polyphenol rich green wastes: A review of current research and recommendations for future directions. Environmental Technology and Innovation, 4, 17-28. doi: 10.1016/j.eti.2015.04.001

Kwame Nti, E., Jerry Cobbina, S., Efua Attafuah, E., Dziedzorm Senanu, L., Amenyeku, G., Amoah Gyan, M., Forson, D., & Safo, A.R. (2023). Water pollution control and revitalization using advanced technologies: Uncovering artificial intelligence options towards environmental health protection, sustainability and water security. Heliyon, 9(7), e18170. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18170

Le Ba, T., Mahian, O., & Wongwises, S. (2020). Review on the recent progress in the preparation and stability of graphene-based nanofluids. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 142, 1145–1172. doi: 10.1007/s10973-020-09365-9

da, C. & Ngila, J.C. (2023). Potentially Toxic Elements in Pharmaceutical Industrial Effluents: A Review on Risk Assessment, Treatment, and Management for Human Health. Sustainability, 15(8), 6974. doi: 10.3390/su15086974

Pastor-Villegas, J., Durán-Valle, C., Valenzuela-Calahorro, C., & Gómez-Serrano, V. (1998). Organic chemical structure and structural shrinkage of chars prepared from rockrose. Carbon, 36, 1251-1256. doi: 10.1016/S0008-6223(97)00200-5

Priya, A.K., Gnanasekaran, L., Dutta, K., Rajendran, S., Balakrishnan, D., & Soto-Moscoso, M. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. Chemosphere, 307(Pt 4), 135957. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135957

Qiu, C., Jiang, L., Gao, Y., & Sheng, L. (2023). Effects of oxygen-containing functional groups on carbon materials in supercapacitors: A review. Materials and Design, 230, 111952. doi: 10.1016/j.matdes.2023.111952

Rashid, A., Bhatti, H.N., Iqbal, M., & Noreen S. (2016). Fungal biomass composite with bentonite efficiency for nickel and zinc adsorption: a mechanistic study. Ecological Engineering, 91, 459-471. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.014

Rudi, N.N., Suliza Muhamad, N., Te Chuan, L., Alipal, J., Omar, S., Hamidon, N., Hazren Abdul Hamid, N., Mohamed Sunar, N., Ali, R., & Harun, H. (2020). Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. Heliyon, 6(9), e05049. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05049

Saberi Riseh, R., Gholizadeh Vazvani, M., Hassanisaadi, M., & Kumar Thakur, V. (2023). Agricultural wastes: A practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. Industrial Crops and Products, 208, 117904. doi: 10.1016/j.indcrop.2023.117904

Sahu, P., & Verma, S. (2021). Removal efficiency assessment of adsoebent based on banana peel for methylene blue. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 3(9), 1-9. https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume_3/issue_9_september_2021/16402/final/fin_irjmets1632755481.pdf

Cham. 220 p. doi: 10.1007/978-3-030-87745-3_189

Mulder, M. (2002). Basic Principles of Membrane Technology. Kluwer Academic Publishers, Second edition. New York, USA. 1-21.

Neha, R., Adithya, S., Sai Jayaraman, R., Panchamoorthy Gopinath, K., Pandimadevi, M., Praburaman, L., & Jayaseelan, A. (2021). Nano-adsorbents an effective candidate for removal of toxic pharmaceutical compounds from aqueous environment: A critical review on emerging trends. Chemosphere, 27, 129852. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129852

Neisan, R.S., Saady, N.M.C., Bazan, C., Zendehboudi, S., & Albayati, T.M. (2023). Adsorption of copper from water using TiO2-modified activated carbon derived from orange peels and date seeds: Response surface methodology optimization. Heliyon, 9(11), e21420. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e21420

Ngeno, E.C., Kinyua, E.M., Chaker Necibi, M., Abushaban, A., & Sillanpää, M. (2022). Sustainable re-utilization of waste materials as adsorbents for water and wastewater treatment in Africa: Recent studies, research gaps, and way forward for emerging economies. Environmental Advances, 9, 100282. doi: 10.1016/j.envadv.2022.100282

Nieto-Márquez, A., Pinedo-Flores, A., Picasso, G., Atanes, E., & Kou, R.S. (2017). Selective adsorption of Pb2+, Cr3+ and Cd2+ mixtures on activated carbons prepared from waste tires. Journal of Environmental Chemical Engineering, 5, 1060-1067. doi: 10.1016/j.jece.2017.01.034

Nishat, A., Yusuf, M., Qadir, A., Ezaier, Y., Vambol, V., Ijaz Khan, M., Ben Moussa, S., Kamyab, H., Sehgal, S.S., Prakash, C., Yang, H.H., Ibrahim, H., & Eldin, S.M. (2023). Wastewater treatment: A short assessment on available techniques. Alexandria Engineering Journal, 76, 505-516. doi: 10.1016/j.aej.2023.06.054

Ogbu, C., Twumasi, Y., Ning, Z., Attamah, G., Ezeaku, V., & Oladigbolu, O. (2022). Analysis of Forest Waste Management and Recycling Potential in Nigeria. Natural Resources, 13, 191-205. doi: 10.4236/nr.2022.1310013

Okoro, H.K., Orosun, M.M., Oriade, F.A., Momoh-Salami, T.M., Ogunkunle, C.O., Adeniyi, A.G., Zvinowan-

id waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review. Journal of Materials Research and Technology, 9(5), 10235-10253. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.045

Srivatsav, P., Bhargav, B.S., Shanmugasundaram, V., Arun, J., Gopinath, K.P., & Bhatnagar, A. (2020). Biochar as an Eco-Friendly and Economical Adsorbent for the Removal of Colorants (Dyes) from Aqueous Environment: A Review. Water, 12(12), 3561. doi: 10.3390/w12123561

Tamjidi, S., Moghadas, B.K., Esmaeili, H., Khoo, F.S., Gholami, G., & Ghasemi, M. (2021). Improving the surface properties of adsorbents by surfactants and their role in the removal of toxic metals from wastewater: A review study. Process Safety and Environmental Protection, 148, 775-795. doi: 10.1016/j.psep.2021.02.003

Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., & Sutton, D.J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. Experientia Supplementum, 101, 133-164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6

Ungureanu, E.L., Mocanu, A.L., Stroe, C.A., Panciu, C.M., Berca, L., Sionel, R.M., & Mustatea, G. (2023). Agricultural Byproducts Used as Low-Cost Adsorbents for Removal of Potentially Toxic Elements from Wastewater: A Comprehensive Review. Sustainability, 15(7), 5999. doi: 10.3390/su15075999

Unuabonah, E.I., & Taubert, A. (2014). Clay–polymer nanocomposites (CPNs): Adsorbents of the future for water treatment. Applied Clay Science, 99, 83–92. doi: 10.1016/j.clay.2014.06.016

Vecino, X., Devesa-Rey, R., & Cruz, J.M. (2013). Entrapped Peat in Alginate Beads as Green Adsorbent for the Elimination of Dye Compounds from Vinasses. Water, Air, and Soil Pollution, 224, 1448. doi: 10.1007/s11270-013-1448-x

Vijayaraghavan, K., & Balasubramanian, R. (2015). Is biosorption suitable for decontamination of metal-bearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. Journal of Environmental Management, 160, 283-296.

Wang, S., Zhang, H., Wang, J., & Hou, H. (2021). Application of Biochar for Wastewater Treatment. In:

Sarkar, M., Acharya, P.K., & Bhattacharya, B. (2003). Modeling the adsorption kinetics of some priority organic pollutants in water from diffusion and activation energy parameters. Journal of Colloid and Interface Science, 266, 28-32. doi: 10.1016/s0021-9797(03)00551-4

Santhi, T., & Manonmani, S. (2011). Malachite green removal from aqueous solution by the peel of Cucumis sativa fruit. Clean–SoilAirWater, 39, 162–170. doi: 10.1002/clen.201000077

Sen, T.K. (2023). Agricultural Solid Wastes Based Adsorbent Materials in the Remediation of Heavy Metal Ions from Water and Wastewater by Adsorption: A Review. Molecules, 28(14), 5575. doi: 10.3390/molecules28145575

Schweinfurth, S.P. (2022). Coal—A Complex Natural Resource. An overview of of factors affecting coal quality and use in the United States. Available at: https://pubs.usgs.gov/circ/c1143/html/text.html (visited 31 May 2022)

Sharma, M., Usmani, Z., Kumar Gupta, V., & Bhat, R. (2021). Valorization of fruits and vegetable wastes and by-products to produce natural pigments. Critical Reviews in Biotechnology, 22, 1-20. doi: 10.1080/07388551.2021.1873240

Silva, J.A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. Sustainability, 15(14), 10940. doi: 10.3390/su151410940

SME. (2023). Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Coal's Importance to the World. Available at: https://www.smenet.org (visited 22 May 2023)

Solangi, N.H., Kumar, J., Mazari, S.A., Ahmed, S., Fatima, N., & Mujawar Mubarak, N. (2021). Development of fruit waste derived bio-adsorbents for wastewater treatment: A review. Journal of Hazardous Materials, 416, 125848. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125848

Soliman, N., Mohamed, H.S., Elsayed, R.H., Elmedny, N.M., Elghandour, A.H., & Ahmed, S.A. (2019). Removal of chromium and cadmium ions from aqueous solution using residue of Rumex dentatus L. Plant waste. Desalination and Water Treatment, 149, 181-193. doi: 10.5004/dwt.2019.23862

Soliman, N.K., & Moustafa, A.F. (2020). Industrial sol-

Thapar Kapoor, R., Treichel, H., Shah, M.P. (eds) Biochar and its Application in Bioremediation. Springer, Singapor,: 5-50. doi: 10.1007/978-981-16-4059-9_4

Wysocka, I. (2023). Absorption processes in reducing the odor nuisance of wastewater, MethodsX, 10, 101996. doi: 10.1016/j.mex.2023.101996

Xiang, H., Min, X., Tang, C.J., Sillanpää, M., & Zhao, F. (2022). Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review. Journal of Water Process Engineering, 49, 103023. doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103023

Yeo, K.F.H., Li, C., Zhang, H., Chen, J., Wang, W., & Dong, Y. (2021). Arsenic Removal from Contaminated Water Using Natural Adsorbents: A Review. Coatings, 11(11), 1407. doi: 10.3390/coatings11111407

Yin, G., Lin, Z., Jiang, X., Qiu, M., & Sun, J. (2020). How do the industrial land use intensity and dominant industries guide the urban land use? Evidences from 19 industrial land categories in ten cities of China. Sustainable Cities and Society, 53, 101978. doi: 10.1016/j.scs.2019.101978

Younas, F., Mustafa, A., Farooqi, Z.U.R., Wang, X., Younas, S., Mohy-Ud-Din, W., Ashir Hameed, M., Mohsin Abrar, M., Maitlo, A.A., & Noreen, S. (2021). Current and Emerging Adsorbent Technologies for Wastewater Treatment: Trends, Limitations, and Environmental Implications. Water, 13(2), 215. doi: 10.3390/w13020215

Zhang, Q.W., Lin, L.G., & Ye, W.C. (2018). Techniques for extraction and isolation of natural products: a comprehensive review. Chinese Medicine, 13, 20. doi: 10.1186/s13020-018-0177-x

Zhu, Y., Luan, Y., Zhao, Y., Liu, J., Duan, Z., & Ruan, R. (2023). Current Technologies and Uses for Fruit and Vegetable Wastes in a Sustainable System: A Review. Foods., 12(10), 1949. doi: 10.3390/foods12101949

Zimmermann, B., Gardian, H., & Rohrig, K. (2018). Cost-Optimal Flexibilization of Drinking Water Pumping and Treatment Plants. Water, 10(7), 857. doi: 10.3390/w10070857