

## Life cycle assessment of mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent disposal methods used for the removal of mercury ions from aqueous solutions

Sahel Pakzad-Toochaei<sup>1\*</sup>, Hajar Abyar<sup>2</sup>, Fatemeh Einollahipeer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Natural Ecosystems, Hamoun International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Heavy metals have posed significant threats to aquatic organisms and human health globally. Mercury (Hg (II)) is of particular concern due to its persistence and harmful environmental properties. Different physical and chemical separation approaches have been proposed to remove Hg (II) ions from water and wastewater. Regarding the available adsorbents for the adsorption of toxic metal ions, nano-adsorbents are preferred due to their high adsorption capacity, low waste production, and simplicity in design and operation. Among nano-adsorbents, functionalized graphene oxide (GO) is the most applicable and widely used adsorbent for removing metal ions from aqueous solutions. Meanwhile, the use of GO is an emerging technology and is in the early stages of development and the environmental assessment of its application and disposal requires focused attention. Life cycle assessment (LCA) is an effective method for estimating the environmental impacts associated with the life cycle of a product or process from the early stage of production to its final disposal. Hence, the LCA of mGO-NH<sub>2</sub> disposal, utilized for Hg (II) removal, was investigated in two scenarios including: desorption and landfill.

#### Materials and Methods

The LCA of mGO-NH<sub>2</sub> disposal was evaluated based on ISO 14040:2006 standard, considering a functional unit of one kg of mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent for mercury removal. The system boundary was based on two disposal scenarios including desorption and landfill from gate to grave. HCl, HNO<sub>3</sub>, and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> were utilized for the mercury desorption using mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent to determine the efficient one. On the other hand, the ReCiPe (H) 2016 midpoint and endpoint methods were applied to assess the environmental impacts of mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent disposal using SimaPro 9.5.5.0 and the Ecoinvent 3.4 datasets. The 18 midpoint impact categories were summarized into endpoint indicators such as damage to human health, ecosystem, and resources categories. Meanwhile, the life cycle inventory was provided from experimental studies, and SimaPro databases. Moreover, greenhouse gas (GHG) emissions during the disposal process were evaluated by greenhouse gas protocol (GGP). The GHG release was monitored from fossil fuel, biogenic, and land transformation. The energy flow was assessed in six impact categories including non-renewable fossil fuel, nuclear, biomass as well as renewable biomass, wind solar, and water resources using cumulative energy demand (CED). In addition, the ecological footprint (EF) of the disposal process was appraised in CO<sub>2</sub>, nuclear, and land occupation categories.

#### Results and discussion

Comparing the two disposal scenarios, the environmental impacts of the desorption scenario were significantly higher than the landfill scenario whereas the landfill scenario showed higher non-carcinogenic toxicity (9.29 kg 1,4-DCB) than the desorption process with a value of 6.29 kg 1,4-DCB. Evaluation of contributed parameters and processes in the environmental impact categories for the desorption scenario illustrated the significant role of electricity consumption. Since electricity is produced from diesel and oil fuel in Iran, it intensifies the environmental burdens, especially global warming. Due to the substantial electricity required for nano-adsorbent synthesis and desorption, it increased the considered impacts compared to the landfill scenario. Therefore, the

electricity consumption during desorption process can be optimized by reducing the reaction time without altering the nano-adsorbent characteristics and its performance. The utilization of renewable energy sources in electricity generation can also reduce pollutant emissions. The assessment of endpoint impacts of nano-adsorbent disposal revealed notable effects of the desorption scenario on human health, ecosystems, and resources. The results of CED also indicated the highest share of fossil fuels with 94.29% and 90.50% contributions to desorption and landfill scenarios, respectively. Meanwhile, the GGP index demonstrated a higher contribution of the desorption scenario to global warming potential, which was attributed to fossil fuel combustion. The amount of CO<sub>2</sub> release, land occupation, and nuclear energy derived from the ecological footprint analysis elucidated a much lower ecological footprint of the landfill scenario compared to the desorption scenario.

### Conclusion

The environmental impacts of the mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent disposal used for the removal of Hg (II) ions were investigated to choose the appropriate method within desorption and landfill scenarios using LCA. The comparison of two mGO-NH<sub>2</sub> disposal scenarios indicated that the landfill scenario incurred lower environmental impacts compared to the desorption scenario. Evaluation of the midpoint and endpoint impacts, CED, GGP, and EF highlighted the high environmental burdens of the desorption scenario concerning electricity consumption. Moreover, the application of the landfill process can be restricted due to the lack of available land. On the other hand, due to the high cost of mGO-NH<sub>2</sub> synthesis and also its suitable potential in Hg (II) ions removal, the possibility of mGO-NH<sub>2</sub> desorption and reuse can reduce the environmental burdens compared to re-synthesis. Furthermore, for desorption of mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent on an industrial scale, electricity consumption should be optimized and supplied by renewable energy sources.

**Keywords:** Adsorbent, Desorption, Electricity, Life cycle assessment, Landfill, Mercury

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgment

The authors thank the Research Institute of Zabol and Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. This study was supported by the Research Institute of Zabol, as a research project (No. PR-RIOZ-1402-0621-1).

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### Authors' contribution

**Sahel Pakzad-Toocheai:** Conceptualization and methodology; data analysis; draft review and supervision; **Hajar Abyar:** Formal analysis; methodology; software; validation; **Fatemeh Einollahipeer:** Investigation; methodology; resources.

\*Corresponding Author, E-mail: s.pakzad@uoz.ac.ir

**Citation:** Pakzad-Toocheai, S., Abyar, H., & Einollahipeer, F. (2024). Life cycle assessment of mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent disposal methods used for the removal of mercury ions from aqueous solutions. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(4), 269-282

DOI: 10.22098/mmws.2024.14079.1386

Received: 0 November 2023, Received in revised form: 09 January 2024, Accepted: 10 January 2024,  
Published online: 10 January 2024

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 269-282

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی چرخه حیات روش های دفع نانوجاذب mGO-NH<sub>2</sub> مورد استفاده در حذف یون های جیوه از محلول های آبی

ساحل پاکزاد توچایی\*<sup>۱</sup>، هاجر آبیاری،<sup>۲</sup> فاطمه عین الهی پیر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه پژوهشی اکوسیستم های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

### چکیده

استفاده از نانوجاذب ها، علی رغم اثرات مثبت اقتصادی و محیط زیستی، به دلیل مصرف منابع اولیه طبیعی، مصرف انرژی و تولید دی اکسید کربن می تواند پیامدهای محیط زیستی شدیدی به همراه داشته باشد. در مطالعه اخیر، به بررسی پیامدهای دفع نانوجاذب سنتز شده از اکسید گرافن (mGO-NH<sub>2</sub>) استفاده شده در حذف یون های جیوه از محلول های آبی طی دو سناریوی واجذب و لندفیل به کمک روش ارزیابی چرخه حیات پرداخته شد. تحلیل و ارزیابی پیامدهای محیط زیستی دو سناریو، با استفاده از نرم افزار سیمپرو (نسخه ۹۰۵) و پایگاه داده Ecoinvent (نسخه ۳٫۴) بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ و ایزو ۱۴۰۴۴ انجام شد. از شاخص ReCiPe midpoint H و شاخص ReCiPe endpoint به ترتیب جهت تعیین ۱۸ پیامد میانی و سه دسته پیامد پایانی استفاده شد. همچنین، جهت بررسی پتانسیل گرمایش جهانی، ردپای بوم شناختی و میزان انرژی خواهی تجمعی، به ترتیب شاخص های پروتکل گازهای گلخانه ای، ردپای اکولوژیکی و تقاضای انرژی تجمعی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در تمام پیامدهای مذکور، سناریوی واجذب به دلیل مصرف برق، بیشترین سهم را بر پیامدهای مورد بررسی در مقایسه با سناریوی لندفیل دارا است. همچنین، بر اساس نتایج تقاضای انرژی تجمعی، سوخت های فسیلی با ۹۴/۲۹ و ۹۰/۵۰ درصد مشارکت بالاترین میزان مصرف انرژی را به ترتیب در دو سناریوی واجذب و لندفیل داشتند و سهم سایر منابع ناچیز بود. لذا فرایند لندفیل جهت دفع نهایی نانوجاذب به کار رفته در حذف یون های جیوه پیشنهاد می شود. از سوی دیگر، با توجه به پتانسیل مناسب نانوجاذب در حذف یون های جیوه و امکان استفاده مجدد از آن به کمک فرآیندهای اسیدی، بازجذب نانوجاذب می تواند نقش مؤثری در کاهش پیامدهای محیط زیستی داشته باشد.

**واژه های کلیدی:** ارزیابی چرخه حیات، الکترونیسته، واجذب، جیوه، جاذب، لندفیل

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.pakzad@uoz.ac.ir

**استناد:** پاکزاد توچایی، ساحل، آبیاری، هاجر، و عین الهی پیر، فاطمه (۱۴۰۳). ارزیابی چرخه حیات روش های دفع نانوجاذب mGO-NH<sub>2</sub> مورد استفاده در حذف یون های جیوه از محلول های آبی. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*. ۴(۴)، ۲۶۹-۲۸۲.

DOI: 10.22098/mmws.2024.14079.1386

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۲۶۹ تا ۲۸۲

© نویسنده گان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

امروزه با توجه به بحران کم آبی و افزایش آلاینده‌های محیطی، مسأله حفاظت از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. زیرا منابع محدود آبی، در اثر فعالیت‌های انسانی و ورود آلاینده‌های مختلف، غیرقابل مصرف شده و هزینه‌های اقتصادی و محیط زیستی غیرقابل جبرانی به جوامع وارد می‌سازد. یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده منابع آبی، ورود و افزایش غلظت انواع فلزات سنگین است (Rizk et al., 2022; Meng et al., 2022). بر این اساس، روش‌های مختلفی جهت حذف آلاینده‌ها از منابع آبی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، علم و فناوری استفاده از انواع نانوجاذب‌ها در حذف آلاینده‌ها به سرعت در حال توسعه بوده و راه‌حل‌های جدیدی جهت استفاده از مواد با عملکرد بالا ارائه می‌شود. استفاده از انواع نانوجاذب‌ها در فرآیند جذب سطحی فلزات سنگین از منابع آبی به دلیل نیاز به حجم کم‌تر نانوجاذب، ظرفیت جذب بیش‌تر (افزایش نسبت سطح به حجم)، تولید پسماند کم‌تر و امکان بازیابی یون‌های فلزی پس از جذب توسط نانوجاذب، یکی از روش‌های مؤثر در تصفیه آب و پساب است (Tahoon et al., 2020; Zahmatkesh et al., 2023). در عین حال، تولید و استفاده از نانوجاذب‌ها می‌تواند موجب تشدید پیامدهای محیط زیستی مانند گرم شدن کره زمین، تغییر اقلیم، کاهش منابع طبیعی، دفع زباله، از دست دادن تنوع زیستی، جنگل‌زدایی، اسیدی شدن اقیانوس‌ها، تخریب لایه اوزون، باران اسیدی و آلودگی آب شوند. بر این اساس، علاوه بر بررسی قابلیت استفاده از نانوجاذب‌ها در فرآیندهای مختلف مانند حذف فلزات سنگین، بررسی میزان تأثیر آن بر تشدید هر یک از پیامدهای مذکور، می‌تواند نقش مؤثری بر کاهش تبعات محیط زیستی داشته باشد (Rosa et al., 2023).

یکی از روش‌های مؤثر جهت بررسی اثرات محیط زیستی یک ماده تولیدی، روش ارزیابی چرخه حیات یا LCA (Life Cycle Assessment) است. منظور از LCA، بررسی مراحل متوالی و پیوسته یک سامانه یا تولید محصول از زمان استخراج ماده خام یا تولید تا دفع نهایی آن است. به عبارت دیگر، طی ارزیابی چرخه حیات، گردآوری و ارزیابی شاخص‌های ورودی، خروجی و اثرات بالقوه محیط زیستی یک محصول و یا فرآیند در طول چرخه حیات آن انجام می‌شود (Vieira et al., 2016; Liang et al., 2023).

ارزیابی چرخه حیات بر پایه استاندارد ISO 14044 انجام شده و شامل تعیین هدف و دامنه کاربرد (تعیین اهداف مطالعه، محصول نهایی مورد نظر، مرزهای سامانه مورد مطالعه، واحد کارکردی و پیش فرض‌های مطالعه)، تحلیل سیاهه (جمع‌آوری داده‌ها و رویه‌های محاسباتی جهت کمی‌سازی ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با یک محصول یا خدمت) و ارزیابی پیامد یا اثرات تولید محصول یا انجام خدمت (تعیین پیامدهای محیط زیستی بالقوه با استفاده از نتایج

مرحله تحلیل موجودی) است. آخرین مرحله LCA، تفسیر نتایج بوده که یافته‌های این بخش به صورت نتیجه‌گیری‌ها و توصیه‌هایی مطابق با هدف و دامنه کاربرد قابل استفاده است (Nowrouzi et al., 2019; Sanyé-Mengual et al., 2022). از آنجایی که در طی فرآیند LCA تمامی عملکرد سامانه بررسی شده و دامنه وسیعی از پیامدها بررسی می‌شود، می‌تواند در تعیین پیامدهای محیط زیستی محصولات و فرآیندهای شیمیایی اطلاعات جامع و مفیدی را فراهم سازد. از مهم‌ترین بخش‌های انجام ارزیابی یک محصول به روش چرخه حیات، تهیه LCI (Life Cycle Inventory) است که باید میزان مواد ورودی، پسماندهای تولید شده، نوع و میزان ترکیبات انتشار یافته به محیط و انرژی مصرف شده سیاهه‌برداری شود (Ahmad and Thaheem, 2022).

در سال‌های اخیر، گرافن و مشتقات آن، از قبیل گرافن که با داشتن تک لایه‌ها و بلورهای دوبعدی با ساختار هیبریدی  $SP_2$  شناسایی می‌شود، کاربرد گسترده‌ای دارد. اکسید گرافن نیز یکی از مشتقات گرافن است که از جمله پرکاربردترین نانومواد جهت حذف آلاینده‌های مختلف به ویژه فلزات سنگین محسوب می‌شود. چراکه، وجود گروه‌های عاملی هیدروکسیل، کربونیل، اپوکسی و کربوکسیلیک اسید در سطح آن می‌تواند به اتصال گروه‌های عاملی ویژه جهت حذف فلزات سنگین نقش مؤثری داشته باشد (Einollahipeer et al., 2018; Bychko et al., 2022).

یکی از گروه‌های عاملی مؤثر در بهبود عملکرد اکسیدگرافن جهت حذف فلزات سنگین، گروه عاملی آمین بوده که می‌تواند ظرفیت جذب اکسیدگرافن را در حذف کاتیون‌های فلزی افزایش دهد (Akhter et al., 2023; Kalkal et al., 2023). جیوه یکی از انواع فلزات سمی و بسیار خطرناک بوده که با اتصال به گروه‌های سولفیدریل پروتئین‌ها و آنزیم‌ها موجب اختلال در عملکرد صحیح آن‌ها شده و در غلظت‌های بالا مرگ را به همراه خواهد داشت (Piscopo et al., 2020). بنابراین، حذف یون‌های جیوه از محلول‌های آبی و پساب‌های صنعتی می‌تواند نقش مؤثری بر سلامت بوم‌سازگان‌های طبیعی و موجودات زنده داشته باشد (Dias et al., 2021).

در مطالعات مختلفی قابلیت حذف یون‌های فلزی توسط نانوجاذب‌ها بررسی شده است. در حالی که به پیامدهای محیط زیستی استفاده از آن‌ها به ویژه پیامدهای دفع آن‌ها کم‌تر توجه شده است. از آنجایی که، یکی از فرآیندهای مؤثر در کاهش پیامدهای محیط زیستی استفاده از نانوجاذب‌ها، بازیابی جاذب و استفاده مجدد آن است (Zhao et al., 2022)، لذا در این مطالعه پیامدهای محیط زیستی دفع نهایی نانوجاذب اکسیدگرافن مغناطیسی عامل دار شده با گروه‌های عاملی آمین (aminated magnetic graphene oxide, mGO-NH<sub>2</sub>) سنتز شده از پودر گرافیت که

در فاز مایع اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کم‌ترین جذب در pH کم‌تر از چهار و بالاترین جذب در pH ۶/۵ حاصل می‌شود، که این نتیجه با مطالعه Emenike et al., (2023) هم‌خوانی داشت. بنابراین، با توجه به کم‌ترین جذب در شرایط اسیدی، بررسی واجذب با محلول‌های اسیدی دنبال شد. در فرآیند بازجذب نانوجاذب، غلظت ۰/۱ نرمال از اسیدهای HCl، H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> و HNO<sub>3</sub> ساخته شد و به مدت ۹۰ دقیقه توسط هم‌زن مغناطیسی با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شد تا این‌که یون‌های فلزی جذب شده روی سطح نانو جاذب آزاد شوند. سپس جاذب مورد نظر سه بار با آب مقطر شسته شده تا pH اولیه خود را داشته باشد. پس از شست و شو با آب مقطر نانو جاذب برای دومین بار به محلول فلزی اضافه و میزان جذب اندازه‌گیری شد. این فرآیند به‌منظور بررسی قابلیت استفاده از نانوجاذب جهت استفاده مجدد در فرآیند جذب، انجام شد و نتیجه حاکی از عملکرد مناسب نانوجاذب در حذف یون‌های جیوه بود. بدین ترتیب، کارآمدترین اسید برای واجذب یون جیوه از سطح نانوجاذب mGO-NH<sub>2</sub> به کمک ۳۰ میلی‌لیتر اسید بر اساس رابطه (۱) مشخص شد (Wang et al., 2020). نتایج حاکی از تأثیر بالاتر اسید HCl بر بازجذب عنصر جیوه بود (شکل ۱).

$$(1) \quad 100 \times \frac{\text{میزان یون‌های واجذب شده}}{\text{میزان یون‌های جذب شده}} = \text{درصد بازیابی}$$

## ۲-۲- برآورد پیامدها

جهت برآورد پیامدهای دفع نانوجاذب طی دو سناریوی واجذب و لندفیل، از نرم‌افزار سیمپرو نسخه ۹،۵ و پایگاه داده Ecoinvent نسخه ۳،۴ استفاده شد. فرآیند برآورد پیامدها طی چهار مرحله انجام شد. در مرحله اول دامنه و هدف به کمک ایجاد مرز سامانه مورد مطالعه و واحد عملکردی (FU) تعیین شد (Samani, 2023). بدین ترتیب که در این پژوهش مرز سامانه از دروازه تا گور (gate to grave) یعنی مرحله اتمام استفاده از نانوجاذب در فرآیند جذب تا دفع آن و واحد عملکردی نیز یک کیلوگرم نانوجاذب استفاده شده در فرآیند جذب یون‌های جیوه در نظر گرفته شد. شکل ۲ مرز سامانه را نشان می‌دهد. در مرحله دوم، لیست سیاهه که شامل مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی و انرژی استفاده شده در دو سناریوی واجذب و لندفیل است، تعیین شد (جدول ۱). لیست سیاهه سناریوی واجذب بر اساس فرآیند آزمایش تهیه شد. در حالی‌که سناریوی لندفیل بر اساس داده‌های موجود در پایگاه داده نرم‌افزار (Ecoinvent v.3) سازمان‌دهی شد. به‌منظور ورود داده‌ها به نرم‌افزار در ابتدای کار با توجه به واحد عملکردی، مقادیر داده‌ها همسان‌سازی شد. در مرحله سوم، ارزیابی پیامدهای چرخه حیات با استفاده از

در حذف یون‌های جیوه از محلول‌های آبی استفاده شده است، بررسی شد. بدین‌منظور، روش مناسب دفع نهایی نانوجاذب استفاده شده در حذف یون‌های جیوه با کم‌ترین پیامدهای محیط زیستی، با دو سناریوی بازجذب و دفن یا لندفیل (Landfill) نانوجاذب به کمک بررسی اثرات میانی و پایانی فرآیند به کمک تحلیل ReCiPe H 2016، انرژی مورد نیاز تجمعی<sup>۱</sup> (CED)، ردپای بوم‌شناختی<sup>۲</sup> (EF) و پتانسیل گرمایش گلخانه‌ای<sup>۳</sup> (GGP) تعیین شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- انتخاب اسید جهت انجام فرآیند واجذب

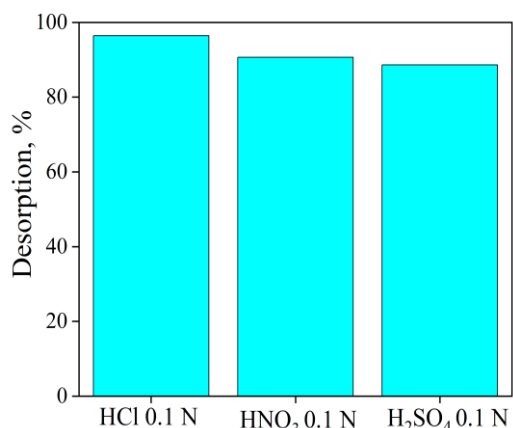
در مطالعه اخیر، جهت تعیین لیست سیاهه اولین سناریو (واجذب)، فرآیند بازجذب نانوجاذب به کار رفته در حذف یون‌های جیوه بررسی شد. بدین‌منظور، در ابتدا بر اساس مطالعه Einollahipeer et al. (2018) سنتز نانوجاذب انجام شد. بدین ترتیب که اکسیدگرافن به روش هامر از پودر گرافیت و به کمک اسید سولفوریک (۹۵ درصد) و سدیم‌نیترات و پتاسیم‌پرمنگنات سنتز شد. جهت شست و شو و جداسازی ترکیبات اضافی، محصول تهیه شده سانتیفیوژ شده و سطح رویی جدا شد. سپس بخش جامد باقی‌مانده (گرافن اکسید سنتز شده) توسط ۲۵۰ میلی‌لیتر آب فاقد یون، ۲۰۰ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۳۰ درصد و ۲۰۰ میلی‌لیتر اتانول دو درصد شست و شو داده شده و توسط آن خشک شد (Awad et al., 2020). اکسیدگرافن سنتز شده از مرحله قبل با روش Solvo-thermal مغناطیسی شد. ۵۰۰ میلی‌گرم از Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GO سنتز شده در مرحله قبل در ۲۰ میلی‌لیتر اتیلن‌دی‌آمین تحت حرارت روی هم‌زن مغناطیسی به حالت معلق در آمد. سپس ۰/۷ گرم DCC به آن اضافه شد و مخلوط در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت در شرایط رفلاکس قرار گرفت. محصول نهایی با استفاده از یک آهن‌ربا جدا و با استفاده از اتانول شسته و در شرایط خلاء در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت هشت ساعت خشک شد (Einollahipeer et al., 2018).

پس از سنتز نانوجاذب، جهت تعیین مناسب‌ترین pH در جذب یون‌های جیوه، دامنه pH از دو تا هشت به همراه غلظت ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر جیوه و ۳۰ میلی‌گرم جاذب در دمای محیط و در مدت ۴۰ دقیقه، بررسی شد. برای تنظیم pH نیز از سدیم هیدروکسید (NaOH) و یا هیدروکلریداسید (HCl) استفاده شد. سپس هر یک از تیمارهای مورد بررسی آماده‌سازی و انجام شد. در پایان فرآیند جذب، پس از اتمام آزمایش، ابتدا دو فاز مایع و جامد به کمک آهن‌ربا از یک‌دیگر جدا شده و سپس غلظت جیوه

<sup>3</sup> Greenhouse Gas Protocol, GGP

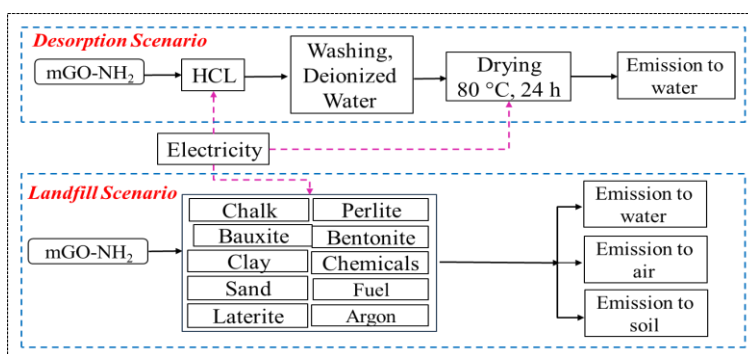
<sup>1</sup> Cumulative Energy Demand, CED

<sup>2</sup> Ecological Footprint, EF



شکل ۱- تعیین اسید مناسب جهت واجذب یون‌های جیوه  
Figure 1- Determining suitable acid for desorption of Hg (II) ions

نرم‌افزار سیماپرو (۲۰۰۶، ISO۱۴۰۴۰) انجام شد (Abyar, 2022). بدین ترتیب که پیامدهای محیط زیستی در ۱۸ گروه پیامد در سطح میانی به کمک ReCiPe midpoint 2016 H و سپس سه دسته پیامد در سطح پایانی به کمک ReCiPe endpoint 2016 H بررسی شد (Nowrouzi et al., 2019; Lamnatou et al., 2022; Shahraki et al., 2023). میزان انرژی مصرفی، به کمک آزمون CED محاسبه شد. آزمون CED به‌منظور تعیین انرژی استفاده شده در طول چرخه حیات یک محصول یا خدمت به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم به‌کار رفته و واحد آن نیز مگاژول است (Piotrowska et al., 2019; Ijuin et al., 2022). ردهای بوم‌شناختی به کمک EF و پتانسیل گرمایش جهانی نیز به کمک پروتکل گازهای گلخانه‌ای یا GGP محاسبه شد. در مرحله چهارم نیز تفسیر نتایج حاصل از نرم‌افزار انجام شد.



شکل ۲- مرز سیستم دفع نانوآجاذب mGO-NH<sub>2</sub>  
Figure 2- System boundary of mGO-NH<sub>2</sub> nano-adsorbent disposal

جدول ۱- سبانه ارزیابی چرخه حیات جهت باز جذب و لندفیل یک کیلوگرم mGO-NH<sub>2</sub> استفاده شده در جذب یون‌های جیوه

Table 1- Inventory of life cycle assessment of desorption and landfill per 1 kg mGO-NH<sub>2</sub> used in the adsorption of mercury ions

مقدار	واحد	خروجی به محیط	مقدار	واحد	مواد مصرفی
21	لیتر	پساب	9.72	کیلووات ساعت	مصرف برق
0.0037	کیلوگرم	پسماند خشک	21	لیتر	آب
			0.027	لیتر	اسید HCl
مقدار	واحد	خروجی به هوا	مقدار	واحد	مواد مصرفی
3.22×10 <sup>-5</sup>	کیلوگرم	آمونیاک	1.20	مترمکعب	آب
4.40×10 <sup>-8</sup>	کیلوگرم	بنزن	2.62×10 <sup>-5</sup>	مترمکعب	گاز طبیعی
1.52×10 <sup>-1</sup>	کیلوگرم	هیدروکربن‌های کلره	7.59×10 <sup>-4</sup>	کیلوگرم	شن
9.34×10 <sup>-1</sup>	کیلوگرم	منوکسیدنیتروژن	6.94×10 <sup>-1</sup>	کیلوگرم	پرلیت
2.45×10 <sup>-9</sup>	کیلوگرم	دی اکسیدگوگرد	4.09×10 <sup>-6</sup>	کیلوگرم	زغال
1.91×10 <sup>-5</sup>	کیلوگرم	دی اکسیدکربن	2.19×10 <sup>-5</sup>	کیلوگرم	گچ
3.40×10 <sup>-6</sup>	کیلوگرم	ذرات معلق (< ۱۰ میکرومتر)	4.75×10 <sup>-3</sup>	کیلوگرم	نفت خام
مقدار	واحد	خروجی به آب	مقدار	واحد	مواد مصرفی
1.35×10 <sup>-9</sup>	کیلوگرم	نیترات	5.24×10 <sup>-6</sup>	کیلوگرم	خاک رس
9.67×10 <sup>-1</sup>	کیلوگرم	فسفات	4.45×10 <sup>-6</sup>	کیلوگرم	بنتونیت
2.11×10 <sup>-7</sup>	کیلوگرم	BOD	1.01×10 <sup>-7</sup>	کیلوگرم	سدیم سولفات
4.46×10 <sup>-7</sup>	کیلوگرم	COD	5.62×10 <sup>-5</sup>	کیلوگرم	سدیم نیترات
			5.62×10 <sup>-5</sup>	کیلوگرم	بوکسیت
مقدار	واحد	خروجی به خاک	مقدار	واحد	مواد مصرفی
5.25×10 <sup>-1</sup>	کیلوگرم	کلرین	3.47×10 <sup>-6</sup>	کیلوگرم	لاتریت
1.51×10 <sup>-9</sup>	کیلوگرم	نیترات	1.12×10 <sup>-6</sup>	کیلوگرم	آرگون
3.00×10 <sup>-9</sup>	کیلوگرم	فلونورید			

آمونیاک ۱.۱۲×۱۰<sup>-۱</sup> کیلوگرم

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج ReCiPe midpoint

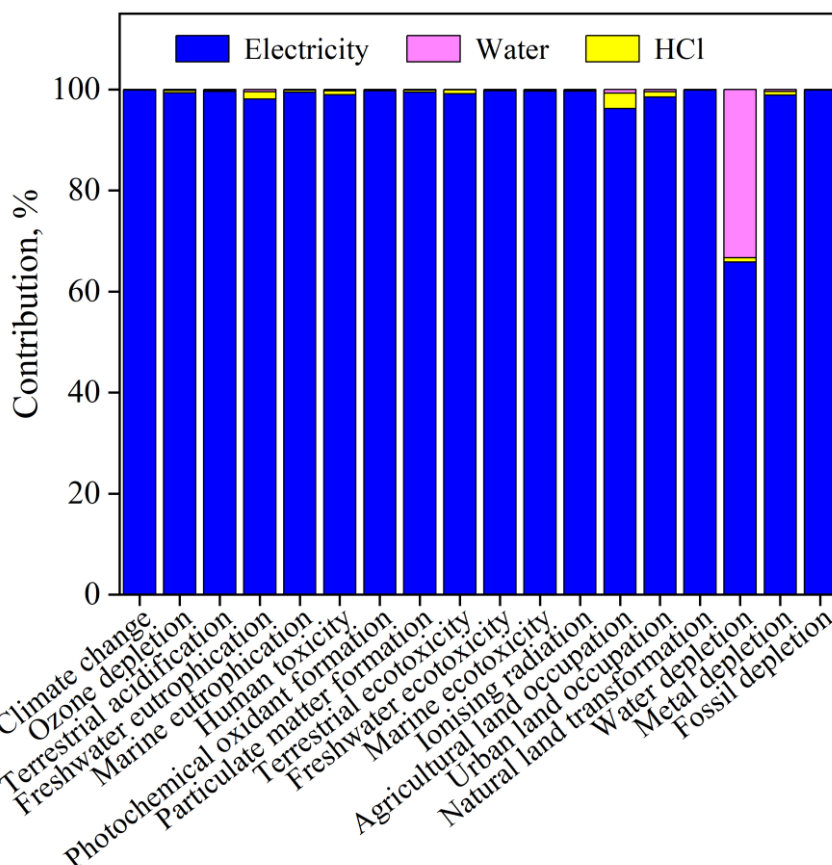
نتایج حاصل از مقایسه اثرات سطح میانی دو سناریوی دفع در جدول ۲ آورده شده است. در مقایسه دو سناریوی دفع، پیامدهای محیط زیستی در سناریوی واجذب به‌طور معناداری بالاتر از سناریوی لندفیل به‌دست آمد. در حالی که، در سناریوی لندفیل تنها پیامد سمیت غیرسرطانی ۱/۴۸ برابر پیامد حاصل از فرآیند واجذب محاسبه شد. با بررسی عوامل و فرآیندهای مؤثر بر پیامدهای محیط زیستی ناشی از سناریوی واجذب، مهم‌ترین عامل مؤثر بر مصرفی شناخته شد (شکل ۳). افزایش پیامدهای محیط زیستی ناشی از مصرف برق، مربوط به نوع سوخت مصرفی جهت تولید برق است. از آنجایی که درصد بالایی از برق کشور به کمک سوخت گازوئیل و مازوت تولید می‌شود (Iran Statistical Year Book, 2013)، در نتیجه می‌تواند تأثیر معناداری بر افزایش پیامدهای محیط زیستی به‌ویژه پدیده گرمایش جهانی داشته باشد. مصرف این سوخت‌ها می‌تواند موجب

تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن (CO<sub>2</sub>)، دی‌اکسید نیتروژن (NO<sub>2</sub>) و متان شود (Paraschiv and Paraschiv, 2020; Masson-Delmotte et al., 2022). استفاده از انرژی تجدیدپذیر در تولید برق نیز می‌تواند نقش مؤثری بر کاهش گازهای منتشره داشته باشد. در پژوهشی، Marashli et al. (2022) نشان دادند با تولید یک کیلووات ساعت برق با استفاده از زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی به ترتیب ۹۳۶، ۷۳۰ و ۵۰۲ گرم گاز CO<sub>2</sub> تولید می‌شود. در حالی که تولید یک کیلووات ساعت برق توسط توربین‌های بادی تنها موجب انتشار ۱۲/۷ گرم CO<sub>2</sub> خواهد شد. لذا با جایگزین کردن انرژی باد جهت تولید یک کیلووات ساعت برق در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، تولید CO<sub>2</sub>، ۷۱۶ تا ۹۲۳ گرم کاهش می‌یابد. از آنجایی که برق، از ملزومات فرآیند سنتز نانو جاذب و واجذب آن است، بهینه کردن مصرف برق را می‌توان با کاهش زمان واکنش به‌دست آورد. در عین حال، این کاهش بایستی به گونه‌ای انجام شود که ویژگی ساختاری و عملکرد نانوجاذب تغییر نیابد.

جدول ۲- اثرات میانی محیط زیستی دفع نانوجاذب mGO-NH<sub>2</sub> طی دو سناریوی واجذب و لندفیل

Table 2- Midpoint impacts of mGO-NH<sub>2</sub> disposal in two landfill and desorption scenarios

پیامدها	واحد	لندفیل	واجذب
گرمایش جهانی	کیلوگرم CO <sub>2</sub> اکی‌والان	0.75	26.74
سمیت بوم‌سازگان‌های خشکی	کیلوگرم C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> اکی‌والان	0.051	51.85
تخلیه منابع فسیلی	کیلوگرم oil اکی‌والان	0.007	9.39
سمیت غیرسرطانی انسانی	کیلوگرم 1,4-DCB اکی‌والان	9.29	6.96
مصرف زمین	m <sup>2</sup> a crop اکی‌والان	0.001	0.16
تشکیل تشعشعات	کیلوبکرل Co-60 اکی‌والان	0.001	0.827
تخریب منابع معدنی	کیلوگرم Cu اکی‌والان	4.42×10 <sup>-5</sup>	0.023
سمیت سرطان‌زایی انسانی	کیلوگرم 1,4-DCB اکی‌والان	0.016	0.33
سمیت محیطی بوم‌سازگان‌های دریایی	کیلوگرم 1,4-DCB اکی‌والان	0.57	1.51
تشکیل ذرات معلق	کیلوگرم PM <sub>2.5</sub> اکی‌والان	5.27×10 <sup>-5</sup>	0.018
سمیت بوم‌سازگان‌های آب شیرین	کیلوگرم 1,4-DCB اکی‌والان	0.43	1.22
مصرف آب	مترمکعب	0.0003	0.0067
تشکیل ازون، بوم‌سازگان‌های خشکی	کیلوگرم NO <sub>x</sub> اکی‌والان	0.0001	0.037
تشکیل ازون، سلامت انسان	کیلوگرم NO <sub>x</sub> اکی‌والان	0.0001	0.036
اسیدی شدن خشکی	کیلوگرم SO <sub>2</sub> اکی‌والان	0.0001	0.054
پرغذایی بوم‌سازگان آب شیرین	کیلوگرم PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> اکی‌والان	0.0016	0.002
تخریب لایه اوزون استراتوسفر	کیلوگرم CFC-11 اکی‌والان	5.20×10 <sup>-8</sup>	1.16×10 <sup>-5</sup>
پرغذایی بوم‌سازگان‌های دریایی	کیلوگرم N اکی‌والان	4.49×10 <sup>-5</sup>	0.0008



شکل ۳- عوامل مؤثر بر پیامدهای محیط زیستی در سناریوی واجذب  
Figure 3- Materials contribution to impact categories in the desorption scenario

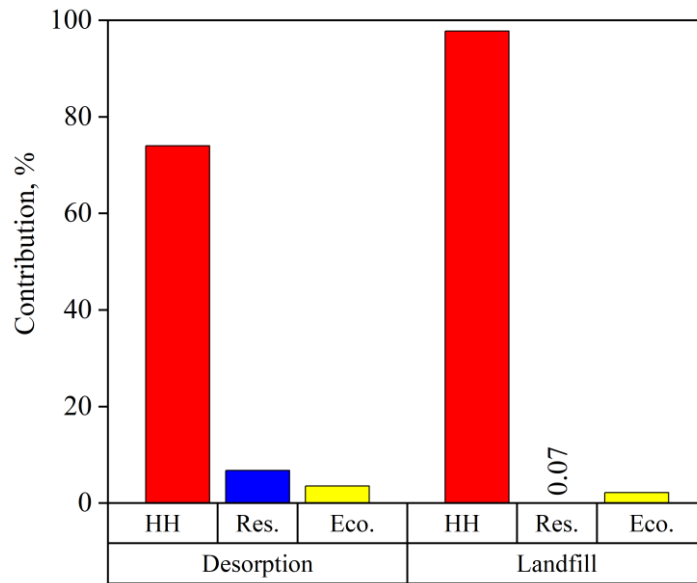
سیانات از پساب حاصل از باطله معدن توسط نانوجاذب فتوکاتالیست  $\text{TiO}_2/\text{FeCl}_3$  به روش IMPACT 2002+ نشان دادند که مصرف اتانول و برق مهم‌ترین نهادهای مؤثر بر پیامدهای مورد بررسی بودند.

### ۳-۲- نتایج حاصل از ReCiPe Endpoint

مطابق شکل ۴، اثرات پایانی دفع نانوجاذب در آسیب به سلامت انسان در دو سناریوی واجذب و لندفیل به ترتیب  $10^{-1}$  DALY و  $3/97 \times 10^{-5}$  DALY و  $2/91 \times 10^{-6}$  به دست آمد. اثر بر بوم‌سازگان با مقدار  $10^{-9} \times 4/00$  species.yr و  $10^{-8} \times 9/60$  species.yr به ترتیب برای دو سناریوی واجذب و لندفیل محاسبه شد. هم‌چنین، در دو سناریوی واجذب و لندفیل، اثر بر منابع به ترتیب  $3/47$  و  $0/003$  دلار آمریکا به دست آمد. لذا، بر اساس نتایج حاصل، میزان پیامدهای پایانی ناشی از واجذب شدیدتر از پیامدهای حاصل از لندفیل بودند. هم‌چنین، با مقایسه پیامدهای پایانی اثر بر سلامت انسان با مقادیر  $74/89$  و  $74$  درصد ۹۷ به ترتیب در فرآیند واجذب و لندفیل نسبت به دو پیامد دیگر، بیش‌ترین اثر را به خود اختصاص داد.

مطالعات مختلفی جهت بررسی پیامدهای محیط زیستی استفاده از نانوجاذبها در حذف فلزات سنگین انجام شده است. در حالی که، در هیچ یک از مطالعات پیامدهای محیط زیستی بازیافت و سرنوشت نانوجاذبها بررسی نشده است. بنابراین، نتایج و اطلاعات قابل مقایسه در دسترس نیست. بر این اساس، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با مطالعات انجام شده بر پیامدهای استفاده از نانوجاذبها مقایسه شد. به‌عنوان مثال، Kazemi et al. (2019) نشان دادند که برای سنتز یک کیلوگرم نانوجاذب اکسیدگرافن مغناطیسی عامل‌دار با تیول (mGO-NH-SH) و سوپرپارامغناطیس  $\text{Fe}_3\text{O}_4@-\text{SiO}_2$  ( $\text{Fe}_3\text{O}_4@-\text{SiO}_2\text{-NH-SH}$ ) در مقیاس آزمایشگاهی، حداقل چهار تا پنج مگاوات ساعت برق لازم است که در نتیجه می‌تواند تأثیر معناداری بر گرمایش جهانی داشته باشد. در این راستا، Gonzalez et al. (2022) نیز در بررسی پیامدهای محیط زیستی استفاده از نانولوله‌های سیلیکات تیتانات متصل شده بر ذرات کیتوزان (STNTs-Ch beads) به کار رفته در حذف یون‌های کادمیوم از فاضلاب نشان دادند که بخش سنتز نانوجاذب، بالاترین سهم را در تولید پیامدهای محیط زیستی داشته است که عمدتاً به دلیل مصرف برق بود. هم‌چنین، Dubsok et al. (2022) در بررسی پیامدهای محیط‌زیستی حذف

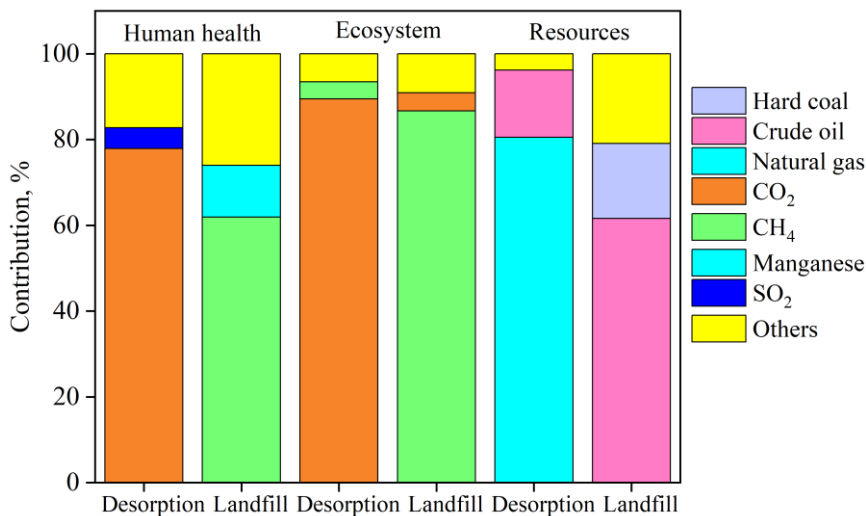




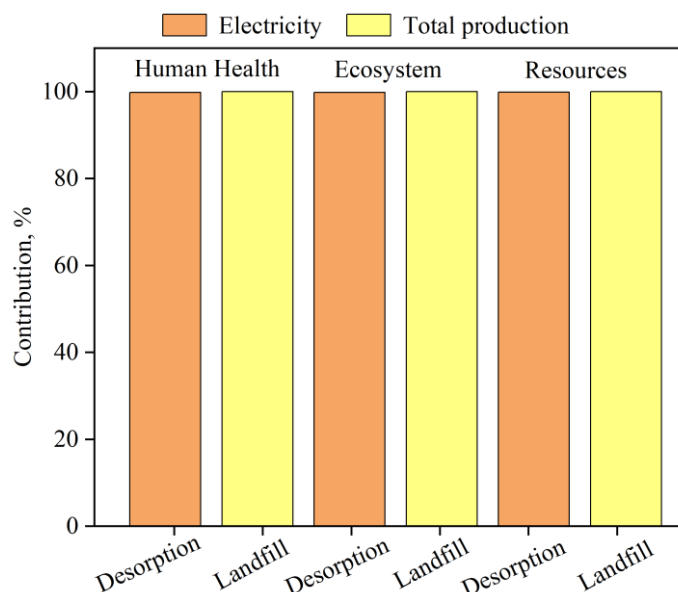
شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از ReCiPe endpoint برای دو سناریوی دفع نانوجاذب (HH.: Human health, Res.: Resources, Eco.: Ecosystem)  
 Figure 4- Comparison of ReCiPe endpoint results for two disposal scenarios (HH.: Human health, Res.: Resources, Eco.: Ecosystem)

جهت تأمین انرژی مورد نیاز فرآیند تاثیر محیط زیستی قابل توجهی را نشان داد. در حالی که در سناریوی لندفیل، کل فرآیند ساخت لندفیل با مشارکت ۱۰۰ درصد، عامل مؤثر بر پیامدهای مذکور بود. طی این سناریو مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پیامدهای سلامت انسان، بوم‌سازگان و منابع به‌ترتیب عنصر روی (۶۹/۸ درصد) و  $CH_4$  (۲۲/۴ درصد)، گاز  $CH_4$  (۴۹ درصد) و  $COD$  (۲۹/۲ درصد)، و نفت خام (۸۱/۲ درصد) و گاز طبیعی (۱۴/۳ درصد) بودند. نتایج پیامدهای سطح پایانی، با نتایج حاصل از پیامدهای میانی هم‌خوانی داشت و بر اساس آن، سناریوی لندفیل پیامدهای کم‌تری را به همراه داشت.

شکل‌های ۵ و ۶ به‌ترتیب عوامل و فرآیندهای مؤثر بر پیامدهای پایانی ناشی از دفع نانوجاذب را طی دو سناریوی واجذب و لندفیل نشان می‌دهد. در طی سناریوی واجذب، گازهای  $CO_2$ ،  $SO_2$  و  $NO$  با مشارکت ۵۷/۴، ۱۸/۸ و ۶/۰۷ درصد عوامل مؤثر بر پیامد سلامت انسانی شناخته شدند. انتشار گازهای فوق ناشی از مصرف برق در طی فرآیند واجذب و لندفیل با میزان مشارکت ۹۹/۸ درصد و سپس مصرف اسید  $HCl$  با میزان ۰/۱۶ درصد در سناریوی واجذب بود. علاوه بر این، در دسته اثر سلامت بوم‌سازگان در سناریوی واجذب، مصرف برق با مشارکت ۹۹/۷ درصد نقش مؤثری در انتشار گاز  $CO_2$  داشت. در ارتباط با تأثیر فرآیند واجذب بر منابع نیز مصرف گاز طبیعی با میزان ۸۰/۸ و نفت خام با ۱۸/۹ درصد



شکل ۵- عوامل مؤثر بر پیامدهای پایانی ناشی از سناریوهای دفع نانوجاذب  
 Figure 5- Effective factors on the endpoint impacts of nano-adsorbent disposal scenarios

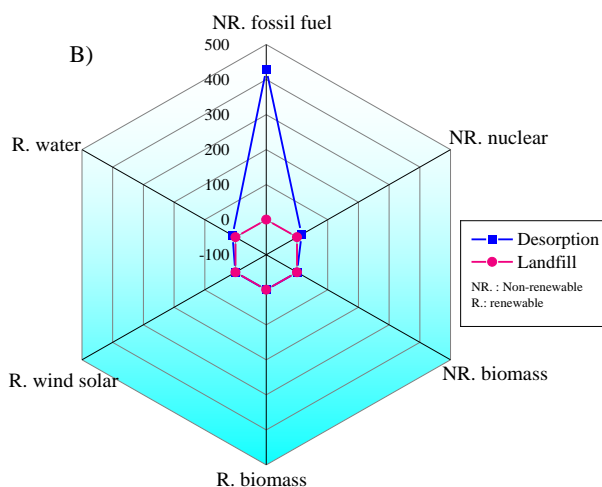


شکل ۶ - فرآیندهای مؤثر بر پیامدهای پایانی ناشی از سناریوهای دفع نانوجاذب  
Figure 6- Effective processes on the endpoint impacts of nano-adsorbent disposal scenarios

مقادیر ۶۴/۳۰ و ۱۸/۳ درصد بالاترین سهم را دارا بودند. در مطالعه‌ای، Middlemas et al. (2015) به بررسی روش سنتز دی‌اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) به روش ARTS<sup>۱</sup> جهت کاهش اثرات محیط زیستی در مقایسه با روش‌های مرسوم سنتز با استفاده از سولفات یا کلرید در دمای بالا به کمک ارزیابی چرخه حیات پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که تقاضای انرژی تجمعی و انتشار کل CO<sub>2</sub> برای فرآیند ARTS به ترتیب ۹۲/۶ مگاژول و ۷/۴۷ کیلوگرم CO<sub>2</sub> به ازای تولید یک کیلوگرم TiO<sub>2</sub> بوده که در مقایسه با فرآیندهای مرسوم مطلوب‌تر بود.

### ۳-۳- انرژی خواهی تجمعی (CED)

شکل ۷ مقایسه میزان و نوع انرژی مصرفی برای دو فرآیند واجذب و لندفیل را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان داد که سوخت‌های فسیلی به ترتیب با ۹۴/۲۹ و ۹۰/۵۰ درصد بالاترین میزان مصرف انرژی را در دو سناریوی واجذب و لندفیل داشتند. در حالی که سهم سایر منابع از قبیل انرژی هسته‌ای، انرژی باد و زیست‌توده بسیار ناچیز بود. با بررسی عوامل مؤثر بر مصرف منابع تجدیدناپذیر در فرآیند واجذب، گاز طبیعی و نفت خام با میزان ۸۳/۳۰ درصد و ۱۵/۳ درصد بیش‌ترین سهم را داشتند. در حالی که در سناریوی لندفیل مصرف نفت خام و زغال سنگ به ترتیب با



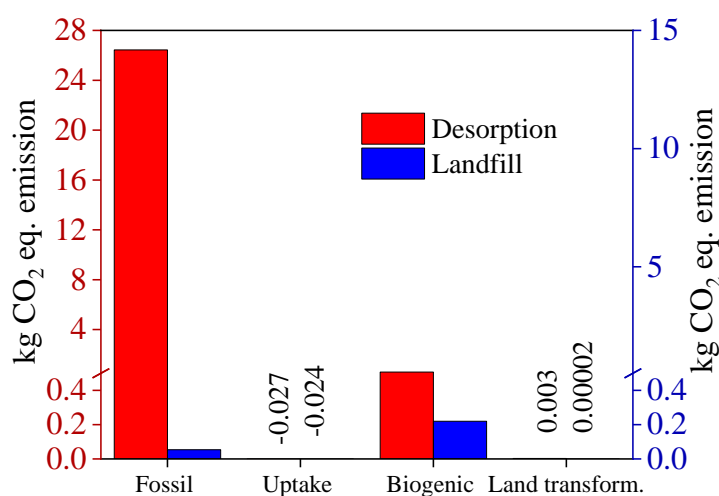
شکل ۷ - مقایسه نتایج CED در بین دو سناریوی دفع نانوجاذب  
Figure 7- Comparison of CED results between two disposal scenarios

<sup>1</sup> Alkaline Roasting of Titania Slag

آن جایی که تأمین انرژی فرآیند واجذب نانوجاذب وابسته به احتراق سوخت‌های فسیلی است، لذا این عامل تقریباً تمام سهم پتانسیل گرمایش جهانی را به خود اختصاص داده است. Cossutta et al. (2020) عنوان کردند که استفاده از کربن فعال و گرافن در ابرخان‌ها به دلیل نیاز به مواد فعال کم‌تر، پیامدهای محیط زیستی کم‌تری دارد. بر این اساس دستگاه مبتنی بر گرافن، موجب کاهش ۳۶ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای و به‌طور کلی موجب کاهش ۱۴ درصد مصرف مواد معدنی، فسیلی و ۴۳ درصد منابع تجدیدپذیر شد. آن‌ها نشان دادند که استفاده از گرافن به‌عنوان یک ماده جایگزین کربن فعال در ابرخان‌ها امکان‌پذیر است، مشروط بر این که تولید گرافن بهینه شده و بازیافت آن توسعه یابد.

### ۳-۴- شاخص پروتکل گرمایش جهانی

در شاخص GGP گازهای منتشره تأثیرگذار بر گرمایش جهانی، معادل انتشار کیلوگرم CO<sub>2</sub> برای چهار فرآیند اصلی مصرف سوخت فسیلی، تولید بیوژنیک، تغییر کاربری زمین و جذب CO<sub>2</sub> گزارش می‌شود (Oblitas-Romero et al., 2023). بر اساس شکل ۸، فرآیند واجذب تأثیر معناداری در مقایسه با فرآیند لندفیل بر پدیده گرمایش جهانی دارد. شاخص GGP برای سناریوی واجذب با مقادیر CO<sub>2</sub> ۰/۰۴۵۹ و CO<sub>2</sub> ۰/۰۰۲۹ به ترتیب برای شاخص‌های سوخت فسیلی، تولید بیوژنیک و تغییر کاربری زمین به‌دست آمد. در حالی که مقادیر هر یک از متغیرهای مذکور با کاهش معناداری در سناریوی لندفیل به‌دست آمد. از



شکل ۸- مقایسه نتایج GGP در بین دو سناریوی دفع نانوجاذب

Figure 8- Comparison of GGP results between two disposal scenarios

برق به‌کار گرفته شده بود، عامل اصلی این نتیجه بود. نتیجه پژوهش حاضر با نتایج حاصل از مطالعه Dos Santos et al. (2022) که به بررسی پیامد ردپای بوم‌شناختی حذف ترکیبات فعال دارویی توسط فرآیندهای بیولوژیکی پیشرفته پرداخته بودند، مطابقت داشت. همچنین مطالعات متعددی در تحلیل رویکرد ردپای بوم‌شناختی نشان داده‌اند که CO<sub>2</sub> ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بوده و عامل این فرآیند سرعت پیشرفت صنعت متکی به سوخت‌های فسیلی عنوان شده است (Volodya et al., 2018; Gao et al., 2021). همچنین، Zhang et al. (2023) نیز در بررسی پیامدهای محیط زیستی ناشی از مصرف اتانول تخمیری در صنعت فولاد چین و جایگزینی آن با گاز Linz-Donawitz نشان دادند که این فناوری از طریق کاهش مصرف برق به‌عنوان کلیدی‌ترین عامل تعیین‌کننده میزان پیامدها و معرفی آن به‌عنوان انرژی سبز، پیامد ردپای بوم‌شناختی صنعت فولاد را ۱۵ تا ۶۸ درصد کاهش می‌دهد.

### ۳-۵- ردپای بوم‌شناختی (EF)

جهت تعیین ردپای بوم‌شناختی، اثرات محیط‌زیستی یک فرآیند یا یک محصول از طریق سه عامل میزان CO<sub>2</sub> منتشر شده، اشغال زمین و انرژی هسته‌ای سنجیده می‌شود (Lamnatou et al., 2022; Wenlong et al., 2023). در مطالعه اخیر، میزان هر یک از عوامل CO<sub>2</sub>، اشغال زمین و انرژی هسته‌ای در سناریوی واجذب به‌ترتیب ۵۶/۶، ۲/۹۵ و ۰/۱۷۱ پوینت به‌دست آمد. در حالی که با کاهش معناداری، مقدار سه عامل مذکور در سناریوی لندفیل به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۹ پوینت محاسبه شد (شکل ۹). در نتیجه، فرآیند لندفیل جهت دفع نهایی نانوجاذب دارای پیامد ردپای بوم‌شناختی به مراتب کم‌تری نسبت به واجذب خواهد بود. در شاخص EF طی سناریوی واجذب، گاز CO<sub>2</sub> با مشارکت ۹۵/۴۵ درصد تقریباً تمامی سهم را به‌خود اختصاص داد. بر اساس بررسی عوامل و فرآیندهای مؤثر بر انتشار CO<sub>2</sub> نیز مصرف سوخت‌های فسیلی که با میزان ۹۹ درصد در فرآیند تولید

آن در حذف یون‌های فلزی، در نتیجه امکان واجذب و استفاده مجدد آن می‌تواند به‌نوعی پیامدهای محیط زیستی را در مقایسه با سنتز مجدد آن کاهش دهد. بنابراین، در صورت استفاده از روش واجذب نانوجاذب در مقیاس صنعتی، بایستی مصرف برق بهینه شود. از طرفی دیگر با جایگزین کردن انرژی‌های تجدیدپذیر، جهت تولید برق، نیز می‌توان پیامدهای حاصل از مصرف برق را کاهش داد.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از پژوهشگاه زابل و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان کمال تشکر را دارند. این مقاله با حمایت پژوهشگاه زابل انجام شده و حاصل از طرح پژوهشی با شماره PR-RIOZ، 1402.0621.1 است.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

### دسترسی به داده‌ها

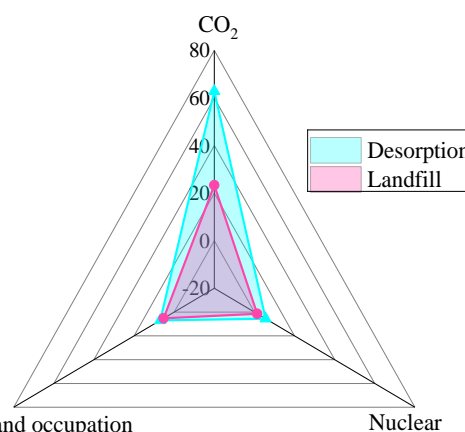
همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

ساحل پاکزاد توچایی: انجام بخش آزمایش، مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ هاجر آبیاری: تحلیل، کنترل نتایج، نرم‌افزار؛ فاطمه عین‌الهی پیر: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله و منابع.

### References

- Abyar, H. (2022). Life cycle assessment of wastewater treatment systems: Challenges and approaches. *Environmental Resources Research*, 10(1), 41-50. doi:10.22069/IJERR.2022.6030
- Ahmad, T., & Thaheem, M.J. (2022). LCIA parameters and the role of BIM towards sustainability. *Regional and Temporal Trends Buildings*, 12(5), 700. doi:10.3390/buildings12050700
- Akhter, F., Zoppas, F.M., Soomro, M., Jatoti, A.S., Noureen, F., Akhtar, M.N., & Mehreen, F. (2023). Carbon-based sorbets for heavy metal removal from aqueous solution, discrepancies, and future prospects: A state-of-the-art review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(12), 10343-10359. doi:10.1007/s13399-021-01866-3
- Awad, F.S., AbouZied, K.M., Abou El-Maaty, W.M., El-Wakil, A.M., & El-Shall, M.S. (2020). Effective removal of mercury (II) from aqueous



شکل ۹ - مقایسه نتایج EF در بین دو سناریوی دفع نانوجاذب  
Figure 9- Comparison of EF results between two disposal scenarios

### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه اخیر به کمک روش ارزیابی چرخه حیات به بررسی پیامدهای محیط زیستی فرآیند دفع نانوجاذب mGO-NH<sub>2</sub> استفاده شده در حذف یون‌های جیوه به‌منظور انتخاب روش مناسب طی دو سناریوی واجذب و لندفیل در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته شد. نتایج حاصل از مقایسه دو سناریو نشان داد که فرآیند لندفیل به‌مراتب دارای پیامدهای محیط زیستی کمتری در مقایسه با سناریوی واجذب است. بررسی پیامدهای میانی و پایانی، شاخص CED، شاخص GGP و EP، حاکی از نقش مؤثر مصرف برق بر ایجاد پیامدهای مذکور در سناریوی واجذب بود. در نتیجه سناریوی لندفیل به‌مراتب تبعات کمتری را به همراه خواهد داشت. در عین حال با توجه به کمبود زمین در دسترس، استفاده از فرآیند لندفیل می‌تواند محدودکننده باشد. از سوی دیگر، با توجه به هزینه‌بر بودن فرآیند سنتز نانوجاذب mGO-NH<sub>2</sub> و پتانسیل مناسب

solutions by chemically modified graphene oxide nanosheets. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 2659-70. doi:10.1016/j.arabj.2018.06.018

- Bychko, I., Abakumov, A., Didenko, O., Chen, M., Tang, J., & Strizhak, P. (2022). Differences in the structure and functionalities of graphene oxide and reduced graphene oxide obtained from graphite with various degrees of graphitization. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 164, 110614. doi:10.1016/j.jpics.2022.110614
- Cossutta, M., Vretenar, V., Centeno, T.A., Kotrusz, P., McKechnie, J., & Pickering, S.J. (2020). A comparative life cycle assessment of graphene and activated carbon in a supercapacitor application. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118468. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118468
- Dias, M., Pinto, J., Henriques, B., Figueira, P., Fabre, E., Tavares, D., & Pereira, E. (2021). Nutshells as efficient biosorbents to remove cadmium,

- lead, and mercury from contaminated solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1580. doi:10.3390/ijerph18041580
- Dos Santos, C.R., Lebron, Y.A.R., Moreira, V.R., Koch, K., & Amaral, M.C.S. (2022). Biodegradability, environmental risk assessment and ecological footprint in wastewater technologies for pharmaceutically active compounds removal. *Bioresource Technology*, 343, 126150. doi:10.1016/j.biortech.2021.126150
- Dubsok, A., Khamdahsag, P., & Kittipongvises, S. (2022). Life cycle environmental impact assessment of cyanate removal in mine tailing's wastewater by nano-TiO<sub>2</sub>/FeCl<sub>3</sub> photocatalysis. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132928. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132928
- Einollahipeer, F., Bahramifar, N., & Younesi, H. (2018). Removal of Cd (II), Pb (II) and Cu (II) ions from aqueous solution by polyamidoamine dendrimer grafted magnetic graphene oxide nanosheets. *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 87, 225-240. doi:10.1016/j.jtice.2018.03.039
- Emenike, E.C., Adeniyi, A.G., Iwuozor, K.O., Okorie, C.J., Egbemhenghe, A.U., Omuku, P. E., & Saliu, O.D. (2023). A critical review on the removal of mercury (Hg<sup>2+</sup>) from aqueous solution using nanoadsorbents. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100806. doi:10.1016/j.enmm.2023.100816
- Gao, C., Zhu, S., An, N., Na, H., You, H., & Gao, C. (2021). Comprehensive comparison of multiple renewable power generation methods: A combination analysis of life cycle assessment and ecological footprint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111255. doi:10.1016/j.rser.2021.111255
- Gonzalez, M.N.G., Quiroga-Flores, R., & Börjesson, P. (2022). Life cycle assessment of a nanomaterial-based adsorbent developed on lab scale for cadmium removal: Comparison of the impacts of production, use and recycling. *Cleaner Environmental Systems*, 4, 100071. doi:10.1016/j.cesys.2022.100071
- Ijuin, H., Yamada, S., Yamada, T., Takanokura, M., & Matsui, M. (2022). Solar energy demand-to-supply management by the on-demand cumulative-control method: Case of a childcare facility in Tokyo. *Energies*, 15(13), 4608. doi:10.3390/en15134608
- Iran Statistical Year Book, Statistical Center of Iran, Tehran, Iran 583 (2013) 19.
- Kalkal, A., Pradhan, R., & Packirisamy, G. (2023). Gold nanoparticles modified reduced graphene oxide nanosheets based dual-quencher for highly sensitive detection of carcinoembryonic antigen. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125157. doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.125157
- Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A., & Olsen, S.I. (2019). Synthesis and sustainable assessment of thiol-functionalization of magnetic graphene oxide and superparamagnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub> for Hg (II) removal from aqueous solution and petrochemical wastewater. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 95, 78-93. doi:10.1016/j.jtice.2018.10.002
- Lamnatou, C., Ezcurra-Ciaurritz, X., Chemisana, D., & Plà-Aragónés, L.M. (2022). Life cycle assessment (LCA) of a food-production system in Spain: Iberian ham based on an extensive system. *Science of The Total Environment*, 808, 151900. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151900
- Liang, X., Dang, W., Yang, G., & Zhang, Y. (2023). Environmental feasibility evaluation of cement co-production using classified domestic waste as alternative raw material and fuel: A life cycle perspective. *Journal of Environmental Management*, 326, 116726. doi:10.1016/j.jenvman.2022.116726
- Marashli, A., Gasaymeh, A., & Shalby, M. (2022). Comparing the global warming impact from wind, solar energy and other electricity generating systems through life cycle assessment methods (a survey). *International Journal of Renewable Energy Research*, 12(2), 899-920.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., & Shukla, P.R. (2022). *Global Warming of 1.5 C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change. Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Cambridge University Press. 632 pages. doi:10.1017/9781009157940
- Meng, Z., Bai, X., & Tang, X. (2022). Short-term assessment of heavy metals in surface water from xiaohu river irrigation area, China: levels, sources and distribution. *Water*, 14(8), 1273. doi:10.3390/w14081273
- Middlemas, S., Fang, Z.Z., & Fan, P. (2015). Life cycle assessment comparison of emerging and traditional Titanium dioxide manufacturing processes. *Journal of Cleaner Production*, 89, 137147. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.019
- Nowrouzi, M., Abyar, H., Younesi, H., & Khaki, E. (2019). Life cycle environmental and economic assessment of highly efficient carbon-based CO<sub>2</sub> adsorbents: A comparative study. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 47, 101491. doi:10.1016/j.jcou.2021.101491
- Oblitas-Romero, A.M., Pérez-Díaz, A.N., & Ocaña-Zúñiga, C.L. (2023). Application of the Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) and the ISO 14064-1: 2006 standard for the estimation of the carbon footprint at the National

- University of Jaen in 2021. *Dyna*, 90(226), 90-97. doi:10.15446/dyna.v90n226.106038
- Paraschiv, S., & Paraschiv, L.S. (2020). Trends of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from fossil fuels combustion (coal, gas and oil) in the EU member states from 1960 to 2018. *Energy Reports*, 6, 237-242. doi:10.1016/j.egy.2020.11.116
- Piotrowska, K., Kruszelnika, W., Baldowska, P., Kansner, P., Rudeniski, J., Tomporowski, A., Filzikowski, J., & Opielak, M. (2019). Assessment of the environmental impact of a car tire throughout its lifecycle using the LCA method. *Materials*, 12 (24), 4177. doi:10.3390/ma12244177
- Piscopo, M., Notariale, R., Tortora, F., Lettieri, G., Palumbo, G., & Manna, C. (2020). Novel insights into mercury effects on hemoglobin and membrane proteins in human erythrocytes. *Molecules*, 25(14), 3278. doi:10.3390/molecules25143278
- Rizk, R., Juzsakova, T., Ali, M.B., Rawash, M.A., Domokos, E., Hedfi, A., & Rédey, Á. (2022). Comprehensive environmental assessment of heavy metal contamination of surface water, sediments and Nile Tilapia in Lake Nasser, Egypt. *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), 101748. doi:10.1016/j.jksus.2021.101748
- Rosa, R., Paradisi, E., Lassinanti Gualtieri, M., Mugoni, C., Cappucci, G.M., Ruini, C., Paolo, N., & Ferrari, A.M. (2023). Life cycle impact assessment of solution combustion synthesis of titanium dioxide nanoparticles and its comparison with more conventional strategies. *Chemistry Sustainability Chemistry*, 16(8), e202202196. doi:10.1002/cssc.202202196
- Samani, P. (2023). Synergies and gaps between circularity assessment and life cycle assessment (LCA). *Science of the Total Environment*, 166611. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.166611
- Sanyé-Mengual, E., Valente, A., Biganzoli, F., Dorber, M., Verones, F., Marques, A., & Sala, S. (2022). Linking inventories and impact assessment models for addressing biodiversity impacts: mapping rules and challenges. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(6), 813-833. doi:10.1007/s11367-022-02049-6
- Shahraki, H., Einollahipeer, F., Abyar, H., & Erfani, M. (2023). Assessing environmental impacts of copper cathode production based on life cycle assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 20(4), 1180-1190. doi:10.1002/ieam.4857
- Tahoon, M.A., Siddeeg, S.M., Salem Alsaiari, N., Mnif, W., & Ben Rebah, F. (2020). Effective heavy metals removal from water using nanomaterials: A review. *Processes*, 8(6), 645. doi:10.3390/pr8060645
- Vieira, D.R., Calmon, J.L., & Coelho, F.Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 124, 656-666. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125
- Volodya, E., Yeo, M.J., & Kim, Y.P. (2018). Trends of ecological footprints and policy direction for sustainable development in Mongolia: a case study. *Sustainability*, 10(11), 4026. doi:10.3390/su10114026
- Wang, Y., Zhou, R., Wang, C., Zhou, G., Hua, C., Cao, Y., & Song, Z. (2020). Novel environmental-friendly nano-composite magnetic attapulgite functionalized by chitosan and EDTA for cadmium (II) removal. *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 153286. doi:10.1016/j.jallcom.2019.153286
- Wenlong, Z., Nawaz, M.A., Sibghatullah, A., Ullah, S.E., Chupradit, S., & Minh Hieu, V. (2023). Impact of coal rents, transportation, electricity consumption, and economic globalization on ecological footprint in the USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43040-43055. doi:10.1007/s11356-022-20431-7
- Zahmatkesh, S., Hajiaghahi-Keshteli, M., Bokhari, A., Sundaramurthy, S., Panneerselvam, B., & Rezakhani, Y. (2023). Wastewater treatment with nanomaterials for the future: A state-of-the-art review. *Environmental Research*, 216(3), 114652. doi:10.1016/j.envres.2022.114652
- Zhang, L., Shen, Q., Pang, C.H., Chao, W., Tong, S., Kow, K.W., & Wei, W. (2023). Life cycle assessment of bio-fermentation ethanol production and its influence in China's steeling industry. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136492. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136492
- Zhao, H., Zhang, D., Sun, H., Zhao, Y., & Xie, M. (2022). Adsorption and detection of heavy metals from aqueous water by PVDF/ATP-CDs composite membrane. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 641, 128573. doi:10.1016/j.colsurfa.2022.128573