



## Original Research Paper

## Evaluation of synthesized organic and inorganic based nanoadsorbents to lead removal with Life cycle assessment approach

Zahra Javanmir pour shirzadi, Fariba Zamani Hargalani\*, Maryam Robati, Lobat Taghavi

Department of Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Key Words

Nanoadsorbents  
Life cycle assessment (LCA)  
Lead adsorption  
Human toxicity  
Environmental toxicity

### Abstract

**Introduction:** Nanoadsorbents, as an emerging product, play a key role in the control and removal of environmental contaminants. Moreover, the enhancement of environmental pressure due to the human activities reveals the necessity for the utilization of novel approaches to identify the environmental impacts of new products. Therefore, this study was conducted to evaluate the cradle to grave Life Cycle (LCA) of synthesized nanoadsorbents including MGO@ $\beta$ -CD and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ $\beta$ -CD in term of determination of the environmental indicators involving global warming, energy consumption, water use, human toxicity and ecotoxicity, in order to removal of one kilogram of pb (II) from contaminated water.

**Materials and Methods:** In the present study after the synthesis of MGO@ $\beta$ -CD and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ $\beta$ -CD nanoadsorbents through Sima pro 9.2, CED, ReCiPe, IPCC (GWP 100year) and USEtox methods were used to assess the energy use, water use, global warming, environmental and human toxicity, respectively.

**Results:** By utilizing one-way ANOVA analysis in order to compare the environmental effects of the study through removing one kilogram of lead from the synthesized adsorbents, it is shown that the carbon-based adsorbent has less environmental effects than the synthesized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-based adsorbent. The results showed that the amounts of global warming, water use, energy consumption, human toxicity and ecotoxicity for the synthesized nanoadsorbents including MGO@ $\beta$ -CD and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ $\beta$ -CD in order to removal of pb (II) are 539403588 and 772235968 kg CO<sub>2</sub> eq, 6856670 and 9816204 m<sup>3</sup>, 8043724501 and 11515811540 MJ, 1365 and 1954 CTUh, 43889257263 and 62833049032 CTUe.

**Conclusion:** The nanoadsorbents that are synthesized using eco-friendly material and eco-friendly processes could improve the environmental indicator such as human toxicity and eco-toxicity.

\* Corresponding Author's email: [f.zamani@srbiau.ac.ir](mailto:f.zamani@srbiau.ac.ir)

Received: 11 November 2021; Reviewed: 12 December 2021; Revised: 11 February 2022; Accepted: 14 March 2022

(DOI): [10.22034/AEJ.2022.329416.2756](https://doi.org/10.22034/AEJ.2022.329416.2756)

## مقاله پژوهشی

## بررسی نانوجاذب‌های سنتز شده بر پایه آلی و معدنی جهت حذف سرب با رویکرد ارزیابی چرخه حیات

زهرا جوانمیرپور شیرزادی، فریبا زمانی هرگلانی\*، مریم رباطی، لعبت تقوی

گروه محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

## چکیده

## کلمات کلیدی

**مقدمه:** نانوجاذب‌ها به‌عنوان محصولی نوظهور نقش مهمی در حذف آلودگی‌های محیطی دارند. فعالیت‌های انسانی و افزایش فشار به محیط‌زیست، استفاده از رویکردهای جدید برای تعیین تأثیرات محیط‌زیستی یک محصول قبل از توسعه را ضروری می‌کند. لذا در این مطالعه به ارزیابی چرخه حیات با رویکرد گهواره تا مرحله استفاده برای تعیین شاخص‌های محیط‌زیستی شامل گرمایش جهانی، انرژی مصرفی، آب مصرفی، سمیت انسانی و سمیت محیطی براساس دو سناریو مورد مطالعه جاذب‌های سنتز شده بر پایه کربن (نانو صفحات اکسید گرافن مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترین) و پایه  $Fe_3O_4$  (نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترین) برای حذف یک کیلوگرم سرب از آب‌های آلوده پرداخته شده است.

**مواد و روش:** در مطالعه حاضر پس از سنتز نانو جاذب‌های  $Fe_3O_4@β-CD$  و  $MGO@β-CD$ ، از نرم‌افزار Sima Pro ورژن ۹،۲ برای محاسبه میزان شاخص‌های مصرف انرژی، مصرف آب، گرمایش جهانی، سمیت محیطی و انسانی به‌ترتیب از روش‌های CED، ReCiPe و IPCC (۱۰۰ ساله) و USEtox استفاده گردید.

**نتایج:** آنالیز واریانس یک‌طرفه جهت مقایسه اثرات محیط‌زیستی برای حذف یک کیلوگرم سرب بین جاذب‌های سنتز شده نشان داد جاذب سنتز شده بر پایه کربن دارای اثرات محیط‌زیستی کم‌تری نسبت به جاذب بر پایه  $Fe_3O_4$  است. این نتایج نشان داد که میانگین مقادیر گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت محیطی برای جاذب‌های نانو صفحات اکسید گرافن مغناطیسی و نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترین به‌منظور حذف سرب به‌ترتیب  $۵۳۹۴۰۳۵۸۸$  و  $۷۷۲۲۳۰۹۶۶۸$   $kg\ CO_2\ eq$  و  $۶۸۵۶۶۷۰$  و  $۹۸۱۶۲۰۴$  مترمکعب،  $۸۰۴۳۷۲۴۵۰۱$  و  $۱۱۵۱۵۸۱۱۵۴۰$  مگاژول (MJ)،  $۴۳۸۸۹۲۵۰۷۲۶۳$  و  $۶۲۸۳۳۰۴۹۰۳۲$  CTUe و  $۱۳۶۵$  و  $۱۹۵۴$  CTUh می‌باشد.

**نتیجه‌گیری و بحث:** نانو جاذب‌هایی که با استفاده از مواد دوست‌دار محیط‌زیست و فرآیندهای سازگار با محیط زیست سنتز می‌شوند می‌توانند شاخص محیط‌زیستی نظیر سمیت انسانی و سمیت محیطی را بهبود بخشند.

## مقدمه

به دو روش هم‌رسوبی و سبز پرداختند. نتایج حاصل نشان داد نانو ذرات مغناطیسی سنتز شده به‌روش سنتز سبز دارای اثرات و پیامدهای محیط‌زیستی بسیار کم‌تری نسبت به‌روش هم‌رسوبی می‌باشد (۷). Vukelic و همکاران، به ارزیابی و مقایسه چرخه حیات سنتز یک کیلوگرم کربن فعال حاصل از پسماند گیاهی هسته گیلان و کربن فعال تجاری به‌منظور حذف فلزات سنگین سرب و کادمیوم از پساب پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که کربن فعال سنتز شده از پسماند هسته گیلان ظرفیت جذب و حذف بالاتر داشته و همچنین اثرات محیط‌زیستی کم‌تری نسبت به کربن فعال تجاری دارد. محققان بیان کردند جذب با پایه کربن به‌میزان بیش‌تری دوستدار محیط زیست است (۸). در مطالعه دیگری توسط Yami و همکاران، اثرات محیط‌زیستی چهار جاذب کم هزینه به‌منظور حذف فلوراید از آب بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که جاذب اکسید آلومینیوم اصلاح شده با زغال چوب دارای بیش‌ترین پیامدهای محیط‌زیستی و کم‌ترین میزان حذف فلوراید است. از طرفی دو جاذب زغال تهیه شده از شاخ گاو و پسماند آلوم اصلاح شده، کم‌ترین اثرات و پیامدهای محیط‌زیستی را دارند (۹). Arvidsson و همکاران، در تحقیقی به مطالعه چرخه حیات نانوفیبرهای سلولزی پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که در مرحله سنتز نانوسلولزها از انرژی بسیار بالایی استفاده می‌شود که این موضوع می‌تواند مانع مهمی در برابر استفاده و توسعه این مواد در آینده باشد (۴). در تحقیق دیگری Kazemi و همکاران، به بررسی و مقایسه ارزیابی چرخه حیات جاذب‌های با پایه گرافن و نانوذرات مغناطیسی برای حذف جیوه پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که جاذب با پایه گرافن اثرات و پیامدهای محیط‌زیستی کم‌تری نسبت به جاذب با پایه نانوذرات مغناطیسی دارند (۳). از این رو در این مطالعه به بررسی اثرات و شاخص‌های محیط‌زیستی شامل گرمایش جهانی، مصرف آب، تقاضای انرژی تجمعی، سمیت انسانی و سمیت محیطی در مراحل تولید و استفاده از نانوجاذب‌های مبتنی بر پایه کربن (نانو صفحات اکسیدگرافن مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین) و نانوذرات  $Fe_3O_4$  (نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین) برای حذف یک کیلوگرم یون سرب از محلول آبی پرداخته شده است.

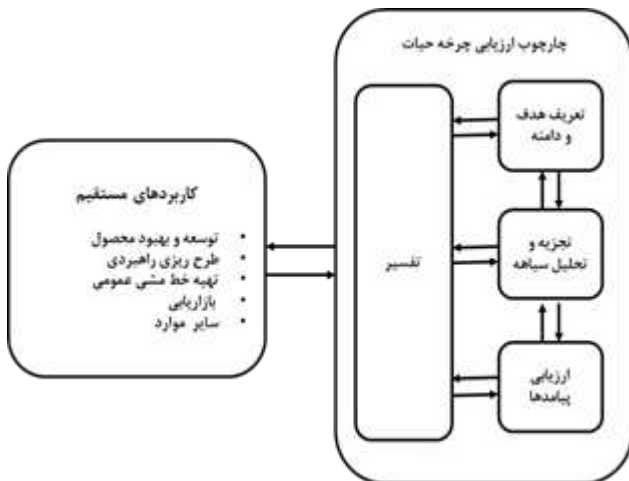
## مواد و روش‌ها

### سنتز نانوجاذب‌های مورد مطالعه

**نانو صفحات اکسیدگرافن مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین:** اکسید گرافیت از پودر گرافیت اکسید شده به همراه اسیدسولفوریک، پرمنگنات پتاسیم و سدیم نیترات تحت روش اصلاح شده‌ی هامر سنتز و تولید شد (۱۰). نانو صفحات مغناطیسی

آلودگی فلزات سنگین به‌دلیل فعالیت‌های صنعتی و توسعه فناوری منشا می‌شوند. این ترکیبات سمی به‌علت سمیت، غیرقابل تجزیه بودن و انباشت زیستی، تهدیدهای جدی برای محیط‌زیست و بهداشت محیط و سلامت جامعه ایجاد کرده‌اند. زمانی که فلزات سنگین در حالت عنصری یا مواد آلی فلزی درمی‌آیند، می‌توانند تأثیرات قابل توجه‌ای بر سلامت جوامع انسانی داشته باشند. تماس با فلزات سنگین می‌تواند سبب اختلالات عصبی، پیری سلولی، نارسایی کبدی، کلیوی و سرطان‌زایی شود (۱). یکی از مهم‌ترین ارکان توسعه پایدار در کشورهای توسعه یافته، کنترل آثار سوء محیط‌زیستی فعالیت‌های صنعتی و تولیدی است. از جمله این تعهدات حفظ منابع آبی، کنترل و شناسایی عناصر خطرناک و آلوده در پساب‌های صنعتی است (۲). ارزیابی چرخه حیات یک تکنیک برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی همه‌ورودی‌ها و خروجی‌های محصول، فرآیند یا خدمات است. به‌طور کلی بر طبق استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ۱۴۰۴۴ (نسخه ۲۰۰۶)، ارزیابی چرخه حیات روشی مناسب برای ارزیابی همه اثرات محیط‌زیستی مربوط به یک محصول، فرآیند یا فعالیت است که با شناسایی، کمی‌سازی و ارزیابی منابع مصرف شده، انتشارات و پسماندهای آزاد شده به محیط‌زیست، ارزیابی جامعی را ارائه می‌دهد و در کنار آن، فرصت بهبودهای محیط‌زیستی را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. ارزیابی اثرات محیط‌زیستی در مراحل اولیه توسعه هر محصول یا فرآیند جدید می‌تواند به شناسایی منافع بالقوه و احتمالاً منجر به توسعه پایدارتر این محصولات یا فرآیندهای نوظهور با اثرات منفی محیط‌زیستی کم‌تری شود و در پی آن باعث کاهش هزینه اقتصادی کم‌تری در فرآیند تولید، استفاده و دفع این محصولات یا فرآیندها می‌شود (۳). از این رو، ارزیابی چرخه حیات نانومواد (مانند نانوجاذب‌ها و کاربرد آن‌ها در تصفیه پساب و آب‌های آلوده) یک رویکرد آینده‌نگر برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی این محصولات و کاربردها آن‌ها در مراحل اولیه توسعه تکنولوژی را امکان‌پذیر می‌سازد (۴). امروزه استفاده از مواد نانو ساختار روز به روز در حال افزایش است. با این حال هنوز مطالعات جامعی در مورد ارزیابی محیط‌زیستی نانو ساختارها در مراحل تولید، استفاده و دفع آن‌ها به‌عمل نیامده است. البته در سال‌های اخیر محققان توجه بیش‌تری به ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان یک مطالعه جامع محیط‌زیستی در حوزه نانو ساختارها شامل نانوذرات  $Fe_3O_4$ ، جاذب‌های سنتز شده از پسماند لیگنو سلولزی، جاذب‌های معدنی برای حذف فلوراید، اکسیدگرافن، نانولوله‌های کربنی و نانو ذرات نقره داشته‌اند (۵، ۶). González و Marimón-Bolívar به مطالعه و ارزیابی چرخه حیات سنتز و تولید نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن

**روش ارزیابی چرخه حیات LCA:** روش LCA به دلیل دارا بودن رویکردی جامع، به‌طور فزاینده‌ای به یک ابزار مهم تصمیم‌سازی در مدیریت محیط‌زیست بدل شده است (۱۳، ۱۴). در شکل ۱ مطالعات ارزیابی چرخه حیات شامل مراحل: ۱- تعریف هدف و دامنه (Goal and scope definition)، ۲- تجزیه و تحلیل سیاهه (Inventory analysis)، ۳- ارزیابی پیامدها (Impact assessment) و ۴- تفسیر (Interpretation) آمده است (۳).



شکل ۱: مراحل ارزیابی چرخه حیات (ایزو ۱۴۰۴۰ (۱۳، ۱۴)

**مرحله اول - تعریف هدف و دامنه مطالعاتی:** هدف از این مطالعه بررسی اثرات و پیامدهای زیست‌محیطی عملکرد نانوجاذب‌های سنتز شده مبتنی بر پایه کربن (نانوصفحات اکسیدگرافن مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترتین) و بر پایه  $Fe_3O_4$  (نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترتین) جهت حذف یک کیلوگرم یون سرب از آب آلوده می‌باشد. در مطالعه حاضر سنتز نانوجاذب‌های مبتنی بر پایه کربن به‌عنوان سناریو اول و سنتز نانوجاذب‌های مبتنی بر پایه  $Fe_3O_4$  به‌عنوان سناریو دوم در نظر گرفته شد. در این گام از مطالعه، تفسیر و مقایسه ارزیابی چرخه حیات (با رویکرد از گهواره تا مرحله استفاده) نانوجاذب‌های مورد مطالعه با ظرفیت جذب و قابلیت بازیابی مجدد برای حذف یک کیلوگرم سرب به‌عنوان واحد کارکردی (functional unit) از آب‌های آلوده پرداخته شده است. هم‌چنین شاخص‌های محیط‌زیستی پتانسیل گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت اکولوژیکی با دیدگاه چرخه حیات مورد بررسی قرار گرفت. رویکرد این مطالعه LCA، تجزیه و تحلیل وضعیت موجود آن‌هاست. برخی مطالعات مشابه انجام شده در این تحقیق توسط Walser و همکاران (۱۷) و Kazemi و همکاران (۳)، Healy و همکاران (۱۶) و Arvidsson و همکاران (۱۴، ۱۵)، البته با مرزهای سیستم مختلف قبلاً انجام

اکسیدگرافن با استفاده از کلرید آهن (III) شش‌آبه و کلرید آهن (II) چهار‌آبه در محیط آمونیاک (۲۵ درصد) سنتز شد (۱۱). در ادامه جهت عامل‌دار کردن نانوصفحات مغناطیسی اکسیدگرافن، نیاز به آمین‌دار شدن سطح نانوصفحات مذکور با اتیلندی آمین بود. لذا اکسیدگرافن مغناطیسی در دی‌کلرومتان به‌مدت ۱۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک پراکنده و سپس آن‌دی‌سیکلو هگزیل کربودی ایمید (N, N dicyclohexyl carbodiimide) DCC و آن‌هیدروکسی سوسپانسیومید (N-Hydroxysuccinimide) NHS به سوسپانسیون اضافه گردید. پس از آن اتیلن دی آمین (Ethylenediamine) EDA به شکل قطره‌ای به مخلوط اضافه و واکنش به‌مدت ۱۲ ساعت تحت گاز نیتروژن هم‌زده شد. در ادامه محصول این مرحله می‌بایست با بتاسیکلودکسترتین عامل‌دار گردد، که بدین منظور در ابتدا بتاسیکلودکسترتین به حلال دی‌متیل فرم‌امید (DMF: Dimethylformamide) اضافه شد. پس از اضافه کردن آن، آن‌دی‌سیکلو هگزیل کربودی ایمید (N, N dicyclohexyl carbodiimide) DCC و آن‌هیدروکسی سوسپانسیومید (N-Hydroxysuccinimide) NHS به فرآیند سنتز، نانو کامپوزیت اکسیدگرافن مغناطیسی آمین‌دار شده مرحله قبل به سوسپانسیون فوق اضافه شد. برای شاخه‌دار کردن بیش‌تر نانوجاذب سنتز شده مرحله آمین‌دار کردن و عامل‌دار کردن نهایی با بتاسیکلودکسترتین یک‌بار دیگر نیز انجام گردید (۱۲).

#### نانوذرات مغناطیسی $Fe_3O_4$ عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترتین:

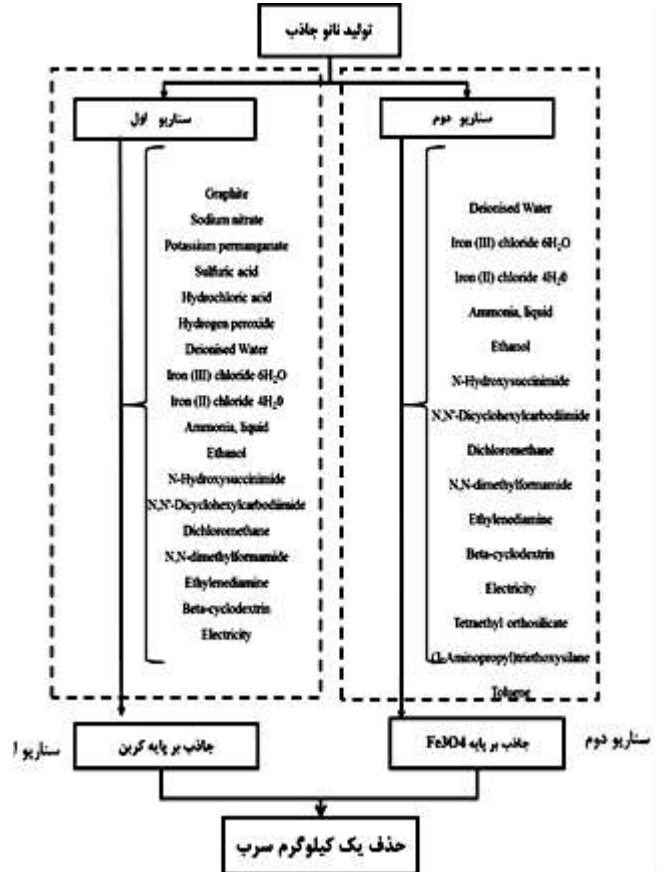
ابتدا نانو ذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  با استفاده از کلرید آهن (III) شش‌آبه و کلرید آهن (II) چهار‌آبه در محیط آمونیاک (۲۵ درصد) تحت روش هم‌رسوبی سنتز شد (۳). سپس نانوذرات  $Fe_3O_4$  جهت پوشش‌دار شدن با سیلیکا، به محلول تترا اتیل اورتو سیلیکات (TEOS: Tetraethyl orthosilicate) حل شده در اتانول افزوده شد. در ادامه به‌منظور آمین‌دار کردن سطح نانوذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  پوشش یافته با سیلیکا، به محصول مرحله قبل ۳-آمینو پروپیل تری متوکسی سیلان (APTMS: (3-aminopropyl)-trimethoxysilane) در محیط تولوئن خشک اضافه گردید. سپس محصول به‌دست آمده از این مرحله، با گروه عاملی بتاسیکلودکسترتین در حضور DCC و NHS در فضای حلال دی‌متیل فرم‌امید (DMF) عامل‌دار شد. ماده حاصل از این مرحله نیز برای شاخه‌دار شدن بیش‌تر، مطابق مراحل قبل مجدداً با اتیلن دی آمین و بتاسیکلودکسترتین عامل‌دار شد. جهت آمین‌دار کردن با EDA، محصول مرحله قبل در محیط حلال دی کلرومتان پراکنده گردید. سپس DCC و NHS به سوسپانسیون اضافه و در ادامه EDA به شکل قطره‌ای به مخلوط اضافه و واکنش به‌مدت ۱۲ ساعت انجام شد (۶).

(MJ) استفاده می‌شود. هم‌چنین به منظور اندازه‌گیری میزان سمیت محیطی و انسانی از روش USEtox استفاده شد و واحد آن CTU (Comparative Toxic Unit) است. USEtox یک مدل محیط‌زیستی برای ویژه‌سازی پیامدهای سمیت اکوسیستمی و انسانی در مرحله LCI است که توسط مؤسسه UNEP-SETAC (United Nations Environment Programme-Society of Environmental Toxicology & Chemistry) جهت توصیف اثرات استفاده از مواد شیمیایی و سرنوشت آن‌ها توسعه داده شده است. میزان مصرف آب و گرمایش جهانی نیز طبق روش ReCiPe و IPCC (۱۰۰ ساله) به ترتیب انجام گرفت. واحد میزان مصرف آب و گرمایش جهانی به ترتیب مترمکعب و کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن است (۳، ۱۵). در مجموع فرآیند ارزیابی چرخه حیات نانوجاذب‌های سنتز شده به کمک نرم‌افزار Sima Pro انجام شد. در جدول ۱ ورودی‌های مواد و انرژی لازم برای سنتز نانو صفحات اکسید گرافن عامل دار شده با بتاسیکلودکسترین و حذف یک کیلوگرم سرب قابل مشاهده است. سیاهه موجودی تهیه شده به ازای حذف یک کیلوگرم سرب توسط جاذب‌های مورد مطالعه جهت ارزیابی پیامدها و شاخص‌های محیط زیستی مورد مطالعه استاندارد شده است. برای ارزیابی چرخه حیات از نرم‌افزار Sima Pro و پایگاه داده v.۲.۳ ecoinvent استفاده شده است.

جدول ۱: سیاهه موجودی تهیه شده به ازای حذف یک کیلوگرم سرب به وسیله نانو صفحات اکسیدگرافن عامل دار شده با بتاسیکلودکسترین

واحد	میزان	مواد مورد استفاده جاذب بر پایه کربن	مواد
kg	۰/۶۵	Graphite	
kg	۰/۴۳	Sodium nitrate	
kg	۳/۲۵	Potassium permanganate	
kg	۲۳/۸۱	Sulfuric acid	
kg	۴۳/۶۹	Hydrochloric acid	
kg	۹/۴۳	Hydrogen peroxide	
kg	۳۳۰۱/۹۰	Deionised Water	
kg	۱/۳۴	Iron (III) chloride 6H <sub>2</sub> O	مواد
kg	۰/۶۱	Iron (II) chloride 4H <sub>2</sub> O	
kg	۲۲/۷۸	Ammonia, liquid	ورودی
kg	۵۲۴/۹۹	Ethanol	
kg	۰/۴۶۸	N-Hydroxysuccinimide	
kg	۰/۹۴	N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide	
kg	۴۳۰/۹۶	Dichloromethane	
kg	۲۰۵/۶۱	N,N-dimethylformamide	
kg	۴/۸۶	Ethylenediamine	
kg	۰/۵۹	Beta-cyclodextrin	
kWh	۳۴۴۶۷/۸۲	Electricity	انرژی ورودی
		یک کیلوگرم حذف سرب	خروجی

شده است. فلوجارت LCA استفاده از نانوجاذب‌های مورد مطالعه بر اساس حذف یک کیلوگرم سرب در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲: فلوجارت LCA استفاده از نانوجاذب‌های مورد مطالعه بر اساس حذف یک کیلوگرم سرب

مرحله دوم - تجزیه و تحلیل فهرست موجودی (سیاهه موجودی): تجزیه و تحلیل موجودی یا سیاهه موجودی چرخه عمر (LCI) مرحله دوم در مطالعات LCA است. LCI در این مطالعه مربوط به بخش جمع‌آوری داده‌ها از تمام ورودی‌های و خروجی در مرز سیستم می‌باشد (۱۸). بر این اساس، آزمایش‌های آزمایشگاهی ما داده‌های فرآیندی را برای ارزیابی تأثیرات چرخه زندگی جاذب‌های تولید شده از گهواره تا مرحله استفاده در حذف سرب ارائه می‌کند.

مرحله سوم - ارزیابی شاخص‌های محیط‌زیستی و تفسیر: در این مطالعه ۵ شاخص مهم گرمایش جهانی، مصرف آب، تقاضای انرژی تجمعی، سمیت انسانی و سمیت محیطی مشابه سایر مطالعات مورد بررسی قرار گرفتند (۱۹). برای محاسبه میزان مصرف انرژی در پژوهش حاضر از روش CED (Cumulative Energy Demand) استفاده شد. از این روش جهت محاسبه مصرف مستقیم یا غیرمستقیم انرژی در طول چرخه حیات یک محصول یا خدمات بر حسب مگا ژول

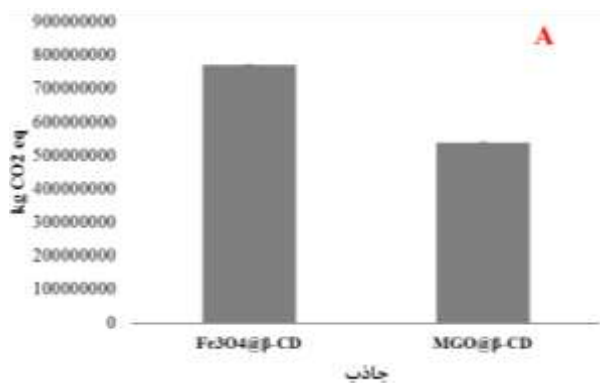
## نتایج

در این بخش نتایج دو سناریو مورد مقایسه قرار گرفته است. به منظور مقایسه شاخص‌های محیط‌زیستی گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت محیطی برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده نانوصفحات اکسیدگرافن مغناطیسی (سناریو ۱) و نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین (سناریو ۲) از آزمون آنالیز واریانس یک‌طرفه استفاده شد و نتایج آن در شکل ۳ (A تا E) آورده شده است. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت محیطی برای جاذب‌های نانو صفحات اکسیدگرافن مغناطیسی و نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین به منظور حذف سرب به ترتیب  $539403588$  و  $772235968$  kg CO<sub>2</sub> eq،  $6856670$  و  $9816204$  مترمکعب،  $8043724501$  و  $62833049032$  و  $43889257263$  (MJ)،  $11515811540$  و  $1365$  و  $1954$  CTUe می‌باشد. همان‌طور که نتایج ANOVA نشان می‌دهد بین تمام شاخص محیط‌زیستی مورد مطالعه اختلاف معنی‌دار وجود دارد، و میزان شاخص‌ها محاسبه شده در جاذب نانو ذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین (سناریو ۲) به ازای سرب حذف شده بیش‌تر از جاذب نانو صفحات اکسیدگرافن مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین (سناریو ۱) می‌باشد (شکل ۳: A تا E).

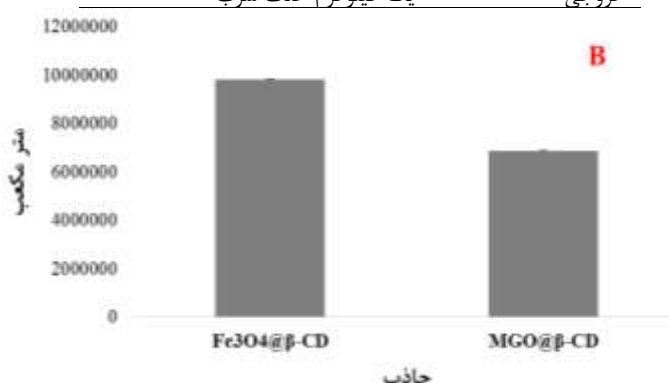
در جدول ۲ ورودی‌های مواد و انرژی لازم برای سنتز نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین و حذف یک کیلوگرم سرب قابل مشاهده است. سیاهه موجودی تهیه شده به‌ازای حذف یک کیلوگرم سرب توسط جاذب‌های مورد مطالعه جهت ارزیابی پیامدها و شاخص‌های محیط‌زیستی مورد مطالعه استاندارد شده است. برای ارزیابی چرخه حیات از نرم‌افزار Sima Pro و پایگاه داده ecoinvent v.3.2 استفاده شده است.

جدول ۲: سیاهه موجودی تهیه شده به‌ازای حذف یک کیلوگرم سرب به‌وسیله نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکستین

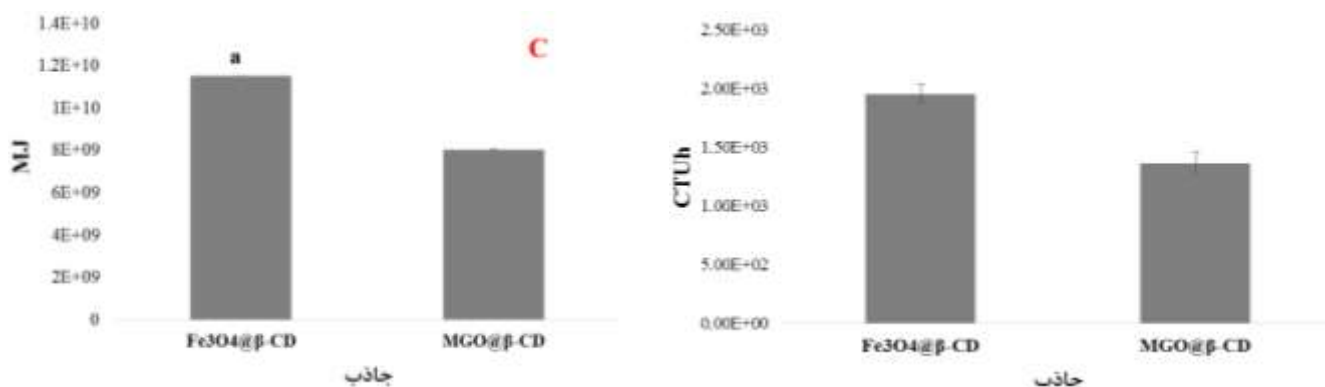
واحد	میزان	مواد مورد استفاده جاذب بر پایه Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	
kg	240/31	Deionised Water	
kg	0/74	Iron (III) chloride 6H <sub>2</sub> O	
kg	0/23	Iron (II) chloride 4H <sub>2</sub> O	
kg	5/15	Ammonia, liquid	
kg	2156/15	Ethanol	
kg	1/34	N-Hydroxysuccinimide	
kg	0/67	N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide	مواد ورودی
kg	389/42	Dichloromethane	
kg	443/58	N,N-dimethylformamide	
kg	4/39	Ethylenediamine	
kg	1/28	Beta-cyclodextrin	
kg	2/15	Tetraethyl orthosilicate	
kg	0/952	(3-Aminopropyl)triethoxysilane	
kg	131	Toluene	
kWh	63637/35	Electricity	انرژی ورودی
			خروجی



A: مقایسه بین شاخص محیط‌زیستی گرمایش جهانی برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده

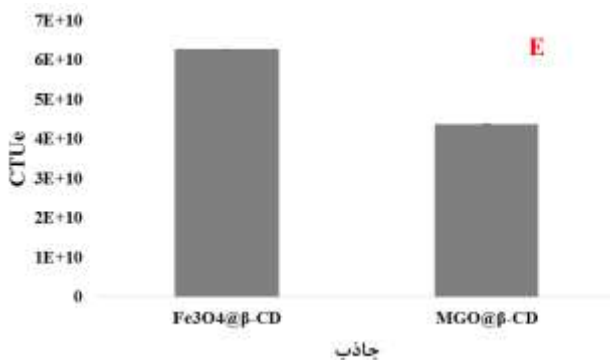


B: مقایسه بین شاخص محیط‌زیستی آب مصرفی برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده



C: مقایسه بین شاخص محیط زیستی انرژی مصرفی برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده

D: مقایسه بین شاخص محیط زیستی سمیت انسانی برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده



E: مقایسه بین شاخص محیط زیستی سمیت محیطی برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده

شکل ۳: مقایسه بین شاخص محیط زیستی گرمایش جهانی (A)، آب مصرفی (B)، انرژی مصرفی (C)، سمیت انسانی (D) و سمیت محیطی (E) برای حذف یک کیلوگرم سرب با جاذب‌های سنتز شده

نکته: حروف متضاد (a, b): نشان دهنده اختلاف معنی دار و حروف مشابه (a, a): نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار بین جاذب‌های سنتز شده برای حذف یک سرب

جدول ۳: درصد تأثیر ورودی‌های مختلف از مراحل تولید نانو صفحات اکسیدگرافن مغناطیسی عامل دار شده با بتاسیکلودکستین بر اساس حذف یک کیلوگرم سرب بر پایه شاخص‌های محیط زیستی گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت اکولوژیکی

ورودی‌ها	انرژی مصرفی بر حسب %	گرمایش جهانی بر حسب %	آب مصرفی بر حسب %	سمیت انسانی بر حسب %	سمیت اکولوژیکی بر حسب %
Graphite	۹/۲E-۰۹	۸/۹۷۳E-۰۹	۴/۱۵۴E-۰۹	۹/۵E-۱۰	۶/۷E-۱۰
Sodium nitrate	۲/۲E-۰۷	۳/۸۳E-۰۷	۴/۰۱۳E-۰۷	۳/۱E-۰۸	۲/۹E-۰۸
Potassium permanganate	۹/۳E-۰۷	۸/۷۳۲E-۰۷	۲/۷۸۱E-۰۶	۱/۳E-۰۷	۱/۲E-۰۷
Sulfuric acid	۴/۲E-۰۷	۳/۹E-۰۷	۳/۸۴۶E-۰۷	۹/۹E-۰۶	۷/۱E-۰۶
Hydrochloric acid	۱/۳E-۰۶	۵/۰۴۹E-۰۷	۱/۵۷۲E-۰۶	۲E-۰۷	۱/۱E-۰۷
Hydrogen peroxide	۲/۴E-۰۶	۱/۹۷۸E-۰۶	۱/۲۷۷E-۰۵	۳/۸E-۰۷	۳E-۰۷
Deionised Water	۹/۴E-۰۷	۹/۰۹۴E-۰۷	۵/۰۲۱E-۰۵	۱/۹E-۰۷	۲/۴E-۰۷
Iron (III) chloride 6H <sub>2</sub> O	۲/۶E-۰۷	۲/۵۸۷E-۰۷	۶/۲۷۱E-۰۷	۷/۵E-۰۸	۷E-۰۸
Iron(II) chloride 4H <sub>2</sub> O	۳/۲E-۰۸	۳/۲۳E-۰۸	۲E-۰۸	۹/۲E-۰۹	۸/۷E-۰۹
Ammonia, liquid	۱/۱E-۰۵	۸/۶۴۷E-۰۶	۱/۹۳۲E-۰۵	۴۴/۸E-۰۷	۴/۴E-۰۷
Ethanol	۰/۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۳۵۲۱	۰/۰۰۰۲۴۴۵	۱/۹E-۰۵	۱/۶E-۰۵
N-Hydroxysuccinimide	۳۳/۵۹۹۶	۳۳/۵۹۹۵۱	۳۳/۶۰۱۶۵۵	۳۳/۶۰۲۱	۳۳/۶۰۱۹
N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide	۶۶/۳۹۲۷	۶۶/۳۹۳۴۰۴	۶۶/۳۹۶۷۴۸	۶۶/۳۹۷۷	۶۶/۳۹۷۳
Dichloromethane	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۲۷۷۶	۶/۷۴۸E-۰۵	۲/۱E-۰۵	۳/۹E-۰۶
N,N-dimethylformamide	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱۰۴۷	۰/۰۰۰۱۴۲۴	۱/۳E-۰۵	۱/۱E-۰۵
Ethylenediamine	۷/۳E-۰۶	۵/۴۴E-۰۶	۱/۲۰۹E-۰۵	۸/۱E-۰۷	۶/۳E-۰۷
Electricity	۰/۰۰۶۴۶	۰/۰۰۵۸۹۱۲	۰/۰۰۱۰۴۲۲	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۷۷

جدول ۴: درصد تأثیر ورودی‌های مختلف از مراحل تولید نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترین براساس حذف یک کیلوگرم سرب بر پایه شاخص‌های محیط زیستی گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت اکولوژیکی

ورودی‌ها	انرژی مصرفی بر حسب %	گرمایش جهانی بر حسب %	آب مصرفی بر حسب %	سمیت انسانی بر حسب %	سمیت اکولوژیکی بر حسب %
Iron (II) chloride 4H <sub>2</sub> O	۶/۸۴E-۰۹	۶/۹۵E-۰۹	۴/۷۴E-۰۹	۲/۲۶E-۰۹	۲/۲E-۰۹
Iron (III) chloride 6H <sub>2</sub> O	۹/۹۶E-۰۸	۱/۰۱E-۰۷	۲/۴۴E-۰۷	۲/۹۱E-۰۸	۲/۷۱E-۰۸
Ammonia, liquid	۲/۳E-۰۶	۱/۹۵E-۰۶	۳/۲۶E-۰۶	۹/۷۱E-۰۸	۹/۵۳E-۰۸
Tetraethyl orthosilicate	۲E-۰۶	۱/۳۸E-۰۶	۱/۰۱E-۰۷	۱/۵۱E-۰۷	۱/۱۹E-۰۷
APTMS	۸/۲۴E-۰۷	۶/۸۸E-۰۷	۱/۹۸E-۰۶	۶/۸۹E-۰۸	۵/۳۶E-۰۸
N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide	۶۶/۳۹۱۳۷	۶۶/۳۹۲۳	۶۶/۳۹۶۵۴	۶۶/۳۹۷۶۴	۶۶/۳۹۷۱۴
N-Hydroxysuccinimide	۳۳/۵۹۸۹۲	۳۳/۵۹۹۳۹	۳۳/۶۰۱۵۵	۳۳/۶۰۲۰۸	۳۳/۶۰۱۸۳
Ethanol	۰/۰۰۰۸۵۹	۰/۰۰۰۳۴۸	۰/۰۰۰۲۴۱	۱/۸۸E-۰۵	۱/۵۶E-۰۵
Toluene	۷/۳E-۰۵	۲/۷۴E-۰۵	۴/۶۵E-۰۵	۳/۱۶E-۰۷	۱/۷۳E-۰۷
Deionised water	۴/۷۶E-۰۸	۴/۶۲E-۰۸	۲/۵۵E-۰۶	۹/۴۸E-۰۹	۱/۲۳E-۰۸
Dichloromethane	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۱۷۵	۴/۲۶E-۰۵	۱/۳۳E-۰۵	۲/۴۶E-۰۶
N,N-dimethylformamide	۰/۰۰۰۳۰۳	۰/۰۰۰۱۵۸	۰/۰۰۰۲۱۵	۱/۸۹E-۰۵	۱/۶۵E-۰۵
Ethylenediamine	۴/۵۹E-۰۶	۳/۴۳E-۰۶	۷/۶۳E-۰۶	۵/۰۸E-۰۷	۳/۹۹E-۰۷
Electricity	۰/۰۰۸۳۲۵	۰/۰۰۷۵۹۷	۰/۰۰۱۳۴۴	۰/۰۰۰۲۳۳	۰/۰۰۰۹۹۷

تولید هر دو جاذب مورد مطالعه باشد (۳). در بررسی شاخص سمیت اکولوژیکی، پارامتر اصلی مربوط به استفاده از رودیوم در سنتز سیکلو هگزیل آمین و در ادامه استفاده از سیکلو هگزیل آمین در تولید n-سیکلو هگزیل فرمامید و هم‌چنین استفاده از پیریدین در سنتز سیکلو هگزیل ایزوسیانید و سپس بکارگیری از این مواد در سنتز N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide است. به هم‌بین دلیل جایگزینی N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide که به منظور یک فاکتور جفت‌کننده در فرآیند سنتز جاذب‌ها در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته می‌تواند نقش مهم و به‌سزایی در کاهش هر دو شاخص سمیت انسانی و اکولوژیکی داشته باشد (۳). سومین عامل تأثیرگذار در فرآیند تولید نانوجاذب‌های مورد مطالعه روی شاخص‌های مورد مطالعه گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت اکولوژیکی الکتریسیته مصرفی در فرآیند سنتز می‌باشد، که این یافته با نتایج مطالعه Arvidsson و همکاران (۴، ۱۵) مطابقت داشت. نتایج مطالعه Gavankar و همکاران، از مقدار مصرف انرژی در سنتز نانولوله‌های کربنی در مقیاس صنعتی و بالا نشان داد که مقیاس و میزان سنتز و تولید بالا در فرآیند صنعتی سنتز این نانومواد بین ۸۴ تا ۹۴ درصد مقدار مصرف انرژی را نسبت به مقیاس آزمایشگاهی کاهش می‌دهد (۲۱). لذا کاهش یا جایگزینی این ورودی‌ها مثل استفاده از نیروی برق تولید شده از انرژی‌های تجدیدپذیر که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی هستند، پتانسیل شاخص‌های مورد بررسی به خصوص گرمایش جهانی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. ورودی اتانول شیمیایی که عمدتاً جهت شستشو در فرآیند سنتز نانوجاذب‌های نانوصفحات اکسیدگرافن مغناطیسی و نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار

نتایج بررسی اثرات محیط‌زیستی جاذب‌های سنتز شده نشان داد که جاذب بر پایه کربن (سناریو ۱) دارای اثرات محیط‌زیستی کم‌تری نسبت به جاذب بر پایه Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (سناریو ۲) می‌باشد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ارزیابی اثرات محیط‌زیستی نانوساختارهای سنتز شده در مراحل اولیه توسعه، نیاز به مطالعه بیشتری دارد تا اثرات و پیامدهای آن‌ها در هنگام توسعه و صنعتی شدن کاهش یابد. نتایج شاخص‌ها و پیامدهای محیط‌زیستی بررسی شده هر ورودی از مراحل تولید و استفاده نانوجاذب‌های سنتز شده به‌منظور حذف و جذب یک کیلوگرم سرب در جداول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که در مجموع تأثیر ورودی‌ها برای شاخص‌های مختلف مورد بررسی جاذب‌های مورد نظر روند مشابهی دارند. براساس این نتایج، ورودی‌های DCC، NHS، انرژی الکتریسیته و اتانول را در مراحل تولید جاذب‌های مورد مطالعه می‌توان به‌ترتیب به‌عنوان پارامترهای اصلی در فاکتورهای مختلف گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت اکولوژیکی در دو جاذب مورد مطالعه نانو صفحات اکسید گرافن مغناطیسی و نانوذرات مغناطیسی عامل‌دار شده با بتاسیکلودکسترین بیان کرد. نتایج به‌دست آمده در این مطالعه با نتایج ۸، ۱۶ و ۲۰ مطابقت داشت. در شاخص‌های محیط‌زیستی سمیت انسانی، حضور پیریدین که در تولید سیکلو هگزیل ایزوسیانید و در ادامه استفاده از سیکلو هگزیل ایزوسیانید در تولید N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide، به‌عنوان فاکتور اصلی سمیت انسانی بالای N,N'-Dicyclohexylcarbodiimide در فرآیند



5. **Kim, H.C. and Fthenakis, V., 2013.** Life cycle energy and climate change implications of nanotechnologies. *Journal of industrial ecology*. 17(4): 528-541.
6. **Mahdavi, M., Ahmad, M.B., Haron, M.J., Gharayebi, Y., Shamel, K. and Nadi, B., 2013.** Fabrication and characterization of SiO<sub>2</sub>/(3-aminopropyl) triethoxysilane coated magnetite nanoparticles for lead (II) removal from aqueous solution. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 23(3): 599-607.
7. **Marimón-Bolívar, W. and González, E.E., 2018.** Green synthesis with enhanced magnetization and life cycle assessment of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 9: 58-66.
8. **Vukelic, D., Boskovic, N., Agarski, B., Radonic, J., Budak, I. and Pap, S., 2018.** Eco-design of a low-cost adsorbent produced from waste cherry kernels. *Journal of Cleaner Production*. 174: 1620-1628.
9. **Yami, T.L., Du, J., Brunson, L.R., Chamberlain, J.F., Sabatini, D.A. and Butler, E.C., 2015.** Life cycle assessment of adsorbents for fluoride removal from drinking water in East Africa. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 20(9): 1277-1286.
10. **William, S., Hummers, J. and Offeman, R.E., 1958.** Preparation of graphitic oxide. *J Am Chem Soc*. 80(6): 1339.
11. **Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A. and 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.
12. **Zheng, H., Gao, Y., Zhu, K., Wang, Q., Wakeel, M. and Wahid, A., 2018.** Investigation of the adsorption mechanisms of Pb (II) and 1-naphthol by  $\beta$ -cyclodextrin modified graphene oxide nanosheets from aqueous solution. *Journal of colloid and interface science*. 530: 154-162.
13. **Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E. and Blanco, J., 2009.** Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable energy*. 34(3): 667-673.
14. **Arvanitoyannis, L.S., 2008.** ISO 14040: life cycle assessment (LCA)-principles and guidelines. *Waste management for the food industries*. 97-132.
15. **Arvidsson, R., Kushnir, D., Sandén, Br A. and Molander, S., 2014.** Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction. *Environmental science & technology*. 48(8): 4529-4536.
16. **Healy, M.L., Dahlben, L.J. and Isaacs, J.A., 2008.** Environmental assessment of single-walled carbon nanotube processes. *Journal of Industrial Ecology*. 12(3): 376-393.
17. **Walser, T., Demou, E., Lang, D.J. and Hellweg, S., 2011.** Prospective environmental life cycle assessment of nanosilver T-shirts. *Environmental science & technology*. 45(10): 4570-4578.
18. **Rajaeifar, M.A., Akram, A., Ghobadian, B., Rafiee, S., Heijungs, R. and Tabatabaei, M., 2016.** Environmental impact assessment of olive pomace oil biodiesel production and consumption: A comparative lifecycle assessment. *Energy*. 106: 87-102.
19. **Azizi, K., Karimi, M., Nikbakht, F. and Heydari, A., 2014.** Direct oxidative amidation of benzyl alcohols using EDTA@ Cu (II) functionalized superparamagnetic nanoparticles. *Applied Catalysis A: General*. 482: 336-343.
20. **Pini, M., Rosa, R., Neri, P., Bondioli, F. and Ferrari, A.M., 2015.** Environmental assessment of a bottom-up hydrolytic synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Green Chemistry*. 17(1): 518-531.
21. **Gavankar, S., Suh, S. and Keller, A.A., 2015.** The role of scale and technology maturity in life cycle assessment of emerging technologies: a case study on carbon nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*. 19(1): 51-60.

شده با بتاسیکلودکسترتین استفاده می‌شود چهارمین عامل در شاخص‌های محیط زیستی مورد مطالعه است. سهم مواد دیگر در شاخص‌های مورد مطالعه برای جاذب‌های مورد بررسی در مجموع کم‌تر از ۵ درصد است (۳، ۴). نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد با توجه به اختلاف قابل توجه به‌دست آمده میان شاخص‌های محیط زیستی گرمایش جهانی، آب مصرفی، انرژی مصرفی، سمیت انسانی و سمیت محیطی، نانو صفحات اکسید گرافن مغناطیسی عامل‌دار شده دارای پیامدهای محیط‌زیستی کم‌تری می‌باشد. به‌طور کلی ورودی‌های DCC، NHS، انرژی الکتریسیته و اتانول که در تولید جاذب‌های مذکور استفاده شده‌اند، به‌ترتیب بیش‌ترین سهم را در افزایش شاخص‌های محیط‌زیستی مورد مطالعه داشته‌اند. لذا باید توجه داشت که در تولید صنعتی نانوجاذب‌ها، بازیابی و استفاده مجدد آن‌ها به شرط معقول بودن، نقش بزرگی در کاهش اثرات محیط زیستی دارد. در مجموع می‌توان گفت که در تولید نانوجاذب‌ها با کاربردهای تخصصی، استفاده از مواد و فرآیندهای سازگار با محیط زیست و هم‌چنین ارزیابی چرخه حیات آن‌ها می‌تواند شاخص‌های محیط زیستی را به‌میزان چشمگیری بهبود بخشد.

## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل از پایان‌نامه تحت عنوان "سنتز جاذب‌هایی با پایه معدنی و آلی جهت حذف آلایندة سرب از محیط‌های آبی و ارزیابی چرخه حیات جاذب‌های سنتز شده" مصوب دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات می‌باشد. بدین وسیله از مسئولین محترم آزمایشگاه آروین زیست پویا به‌دلیل همکاری لازم در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی به‌عمل می‌آید.

## منابع

1. **Shahri, E., Sayadi, M.H., Yousefi, E., 2020.** Evaluation of heavy metal pollution of Zinc, Nickel, Chromium, Lead, Cadmium, Copper and Iron in water, surface sediments and algae of the northern shores of Makran Sea in summer 2020. *Journal of Animal Environment*. 12(4): 593-603. (In Persian)
2. **Baharvand, F., Varvanii, J., Torajzar, H., Hedayati, A.A. and Ahamadi, A., 2020.** Evaluation of total concentration of petroleum hydrocarbons and heavy metals (lead, cadmium) in petroleum effluents. *Journal of Animal Environment*. 12(3): 389-394. (In Persian)
3. **Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A. and Olsen, S.I., 2018.** Life cycle assessment of nano-adsorbents at early stage technological development. *Journal of Cleaner Production*. 174: 527-537.
4. **Arvidsson, R., Nguyen, D. and Svanström, M., 2015.** Life cycle assessment of cellulose nanofibrils production by mechanical treatment and two different pretreatment processes. *Environmental science & technology*. 49(11): 6881-6890.