



Investigating the environmental impacts of the Zabol wastewater treatment plant using a life cycle approach

Fatemeh Sargolzaei¹ | Fatemeh Einollahipeer^{2✉} | Reza Dahmardeh Behrooz³ |
Narjes Okati⁴

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: fatemehsargolzaei959@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: fatemeheinollahi@uoz.ac.ir

3. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir

4. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Sistan and Baluchestan, Iran. E-mail: narjesokati@uoz.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 10 August 2025

Received in revised form 11 October 2025

Accepted 20 October 2025

Published online 21 September 2025

Keywords:

Endpoint parameters,

Global warming,

Heavy metals,

Midpoint parameters,

Physicochemical factors of

Water.

ABSTRACT

This study was conducted to comprehensively evaluate the environmental impacts associated with the wastewater treatment plant (WWTP) in Zabol city, with the objectives of identifying the system's critical and weak points and proposing corrective strategies to mitigate these impacts. The midpoint and endpoint environmental effects of the WWTP were quantified per functional unit (1 m³ of treated wastewater) using the ReCiPe 2016 H methodology. Climatic impacts were assessed following the approach recommended by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Additionally, the cumulative energy demand (CED) and ecological footprint (EF) indicators were calculated to provide a broader perspective on the plant's environmental performance. The life cycle assessment (LCA) results, based on the ReCiPe method, indicated that electricity and sulphate were the most influential contributors, exerting the highest impacts on terrestrial ecosystem toxicity (0.509 kg 1,4-DCB eq), freshwater ecosystem toxicity (0.251 kg 1,4-DCB eq), human non-carcinogenic toxicity (27.7 kg 1,4-DCB eq), and marine ecotoxicity (0.259 kg 1,4-DCB eq). The total carbon emissions of the plant were estimated at 3.969 kg CO₂. In terms of energy profile, fossil fuels were identified as the predominant source of energy consumption. The ecological footprint analysis revealed that human health impacts represented the largest contribution among all assessed categories. Overall, electricity consumption and sulphate were identified as the main environmental hotspots of the WWTP. Consequently, replacing fossil fuels with renewable energy sources, such as wind and solar power, could significantly reduce the energy-related impacts. Furthermore, improving the performance of the aerobic treatment process and consequently reducing the sulfate concentration in the influent wastewater can have a significant effect on mitigating the overall environmental impacts.

Cite this article: Sargolzaei, F., Einollahipeer, F., Dahmardeh Behrooz, R., & Okati, N. (2025). Investigating the environmental impacts of the Zabol wastewater treatment plant using a life cycle approach. *Journal of Natural Environment*, 78 (2), 315-328. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.402134.2840>



بررسی پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل با رویکرد چرخه حیات

فاطمه سرگلزائی^۱ | فاطمه عین‌الهی پیر^۲ | رضا دهمرده بهروز^۳ | نرجس اکاتی^۴

۱. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: fatemehsargolzaei959@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: fatemeheinollahi@uoz.ac.ir
۳. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: dahmardehbehrooz@uoz.ac.ir
۴. گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: narjesokati@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ کلیدواژه‌ها: پیامدهای پایانی، پیامدهای میانی، فاکتورهای فیزیکی-شیمیایی آب، فلزات سنگین، گرمایش جهانی.	این مطالعه با هدف شناسایی پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل و تعیین نقاط بحرانی یا نقاط ضعف سیستم تصفیه‌خانه و ارائه راهکار اصلاحی جهت کاهش شدت اثرات به روش ارزیابی چرخه حیات انجام شد. بدین منظور، فاکتورهای کیفی و برخی فلزات سنگین در نمونه فاضلاب ورودی و پساب خروجی تصفیه‌خانه اندازه‌گیری شد. سپس، پیامدهای میانی و پایانی محیط‌زیستی تصفیه‌خانه به‌ازای واحد کارکردی (۱ مترمکعب تصفیه فاضلاب) توسط ReCiPi 2016 H برآورد شد. اثرات اقلیمی تصفیه‌خانه نیز به کمک روش ارائه شده توسط هیأت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC) تعیین گردید. هریک از پارامترهای انرژی‌خواهی تجمعی (CED) و ردپای اکولوژیک (EF) نیز محاسبه شد. براساس آزمون ReCiPe، مهم‌ترین عوامل مؤثر، برق مصرفی و سولفات موجود در پساب بود که بیشترین تأثیر را بر سمیت اکوسیستم‌های خشکی (۰/۵۰۹ Kg 1,4-DCB eq)، سمیت اکوسیستم‌های آب شیرین (۰/۲۵۱ kg 1,4-DCB eq)، سمیت غیر سرطانزایی انسانی (۲۷/۷ kg 1,4-DCB eq) و سمیت اکوسیستم‌های دریایی (۰/۲۵۹ Kg 1,4-DCB eq) داشتند. کربن منتشره نیز برابر ۳/۹۶۹ کیلوگرم CO₂ برآورد شد. همچنین مهم‌ترین شکل انرژی مصرفی نیز سوخت‌های فسیلی تعیین شدند. در بخش ردپای اکولوژیک، نیز بیشترین تأثیر بر سلامت انسان به‌دست آمد. به‌طور کلی مصرف برق و سولفات نقطه بحرانی تأثیرگذار بر پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه بودند. با جایگزین کردن انرژی‌های پاک مانند بادی و خورشیدی، می‌توان تأثیر استفاده از سوخت‌های فسیلی را کاهش داد. همچنین بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌های پساب ورودی و به‌دنبال آن کاهش غلظت آلاینده‌های مختلف مثل سولفات، می‌تواند تأثیر معنی‌داری در کاهش میزان پیامدها داشته باشد.

استناد: سرگلزائی، فاطمه؛ عین‌الهی پیر، فاطمه؛ دهمرده بهروز، رضا؛ و اکاتی، نرجس (۱۴۰۴). بررسی پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل با رویکرد چرخه حیات. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۲)، ۳۲۸-۳۱۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.402134.2840>



مقدمه

به آب‌های مصرف شده در واحدهای مسکونی، تجاری، صنعتی و کشاورزی که دارای مواد آلاینده، تغییر رنگ و بو بوده و شاخص‌های کیفی آن به واسطه تغییر فاکتورهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کاهش یافته است، اصطلاحاً پساب یا فاضلاب گفته می‌شود (Tariq et al., 2023). ۹۹ درصد حجم فاضلاب از آب تشکیل شده و مواد خارجی تنها ۱ درصد فاضلاب را شامل می‌شوند. بنابراین عملکرد صحیح تصفیه فاضلاب، می‌تواند نقش مؤثری در بازگشت آب به چرخه استفاده و تأمین آب جهت برخی از کاربری‌های ممکن، در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته باشد (Aziz et al., 2019; Capodaglio, 2023). به‌طور معمول، فاضلاب شهری دارای غلظت‌های متفاوتی از انواع ترکیبات آلی، معدنی و فلزات سنگین است. بنابراین، اگر تصفیه فاضلاب به‌درستی انجام نشود، به‌واسطه وجود این آلاینده‌ها در پساب تصفیه نشده و افزوده شدن آن به محیط، می‌تواند آسیب‌های محیط‌زیستی و بهداشتی را به‌همراه داشته باشد (Saravanan et al., 2023; Thanigaivel, 2023). به‌طور کلی هدف از تصفیه فاضلاب افزایش کیفیت آن به‌منظور توجه به مسائل محیط‌زیستی و حفاظت از منابع مختلف به‌ویژه آب و خاک است. در عین حال علی‌رغم مزایای مذکور، فرآیندهای تصفیه نه تنها به‌دلیل تقاضای انرژی بالا و استفاده از برخی مواد شیمیایی در تصفیه فاضلاب، بلکه به‌دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای (نظیر CO_2 ، CH_4 و N_2O)، تولید لجن مازاد و اثرات ثانویه بر محیط‌زیست، می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی به‌همراه داشته باشند (Szulc et al., 2021). بنابراین بررسی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از فعالیت این واحدها می‌تواند اطلاعات مفیدی را فراهم سازد.

یکی از فرآیندهای مؤثر در بررسی عملکرد تصفیه‌خانه، ارزیابی ابعاد محیط‌زیستی آن به کمک روش ارزیابی چرخه حیات یا LCA^۱ است (Karolinczak et al., 2024; Mainardis et al., 2024). ارزیابی چرخه حیات به‌عنوان یک ابزار جامع برای تحلیل تأثیرات محیط‌زیستی محصولات و فرآیندها در تمام مراحل زندگی آنها، از استخراج مواد اولیه تا تولید، حمل‌ونقل، مصرف مواد خام و دفع نهایی پسماند (مدیریت زباله یا بازیافت)، شناخته می‌شود. استانداردهای بین‌المللی ISO 14040 و ISO 14044 چارچوب نظری و روش‌شناختی این ارزیابی را طی چهار مرحله تعیین هدف و دامنه مطالعه، تحلیل موجودی چرخه حیات (LCI)، ارزیابی اثرات چرخه حیات (LCIA) و تفسیر نتایج فراهم می‌کند (Finkbeiner, 2014). با توجه به افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی، آلودگی محیط‌زیست و مصرف منابع طبیعی، استفاده از LCA این امکان را فراهم می‌سازد تا نقاط بحرانی یک صنعت در زنجیره فعالیت آن شناسایی شده و راهکارهای بهینه‌سازی منابع و کاهش اثرات محیطی آن قابل طراحی باشد (Goglio et al., 2020). مهم‌ترین عامل در ارزیابی چرخه حیات یک فعالیت یا خدمات، تعیین مرز محدوده ارزیابی بوده که این مرز ارزیابی LCA به‌صورت "گهواره تا دروازه و یا تا گور" انجام می‌شود (Kazemi et al., 2018).

ارزیابی چرخه حیات، نه تنها به‌عنوان یک روش علمی برای ارزیابی جامع اثرات محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شناخته می‌شود، بلکه ابزاری راهبردی برای طراحی سیاست‌های مدیریت آب و فاضلاب در سطوح محلی و ملی به‌شمار می‌رود (Kamble et al., 2019; Gomez et al., 2025). به‌کارگیری LCA در مورد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به محققان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا نقاط پرمصرف و آلاینده را شناسایی کرده، کارایی فرآیندها را ارتقا دهند و گزینه‌های پایدارتر برای مدیریت فاضلاب را انتخاب کنند. از این طریق، می‌توان علاوه بر حفاظت از محیط‌زیست، به بهینه‌سازی اقتصادی و اجتماعی نیز دست یافت. این روش ارزیابی، موجب می‌گردد تا دستیابی به نتایج منسجم مربوط به پیامدهای محیط‌زیستی فرآیند تصفیه در اثر استفاده از مواد اولیه و خروجی آن به طبیعت، فراهم شود (Karolinczak et al., 2024).

تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل، در سال ۱۳۷۵ احداث شد. در ابتدای کار، این تصفیه‌خانه با ۹ ایستگاه پمپاژ به بهره‌برداری رسید. در این تصفیه‌خانه، نوع تصفیه از نوع برکه تثبیت بوده که دارای شش برکه هواده به‌همراه حوضچه‌های جمع‌کننده و کانال تخلیه نهایی پساب تصفیه شده طراحی شده است. در حال حاضر، این تصفیه‌خانه با ۶ برکه فعال، عمل تصفیه فاضلاب را انجام می‌دهد. از آنجا که اطلاعاتی در خصوص تأثیرات محیط‌زیستی عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل در دسترس نیست، تحقیق حاضر، با هدف بررسی وضعیت تصفیه‌خانه فاضلاب زابل از منظر محیط‌زیستی انجام شد. بدین ترتیب

^۱Life cycle assessment

جهت تعیین بیشترین سهم پیامدهای محیط‌زیستی و در بخش‌های میانی و پایانی از آنالیز ReCiPe و ReCiPe midpoint endpoint از مرحله ورود فاضلاب به تصفیه‌خانه تا مرحله خروج، براساس واحد عملکردی (۱ مترمکعب تصفیه فاضلاب (گهواره تا دروازه) انجام شد. همچنین ردپای اکولوژیک، پیامد تغییر اقلیم، پتانسیل انتشار گازهای گلخانه‌ای و انرژی‌خواهی تجمعی به کمک آزمون‌های ردپای اکولوژیک EF^۲، پروتکل گرمایش جهانی هیأت بین دولتی تغییر اقلیم IPCC^۳، پتانسیل گرمایش جهانی GWP^۴ و انرژی‌خواهی تجمعی CED^۵ سنجش گردید. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پیامدهای مذکور نیز به کمک آنالیز حساسیت، تعیین گردید.

روش‌شناسی پژوهش

مواد مصرفی و تجهیزات دستگاهی: در تحقیق حاضر مواد مصرفی از محصول Merck کشور آلمان استفاده شد. کاغذ صافی واتمن ۴۲ میکرومتر، آب فاقد یون و آب مقطر نیز مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه‌های مورد استفاده نیز شامل ICP-Aptima 2000DV Perkin elmer، دستگاه اسپکتروفتومتر شرکت Hack مدل ۲۸۰۰ ساخت آمریکا، دستگاه فتومتر مدل ۸۰۰۰ Palintest ساخت کشور انگلستان، آون شرکت Memert ساخت کشور آلمان، دستگاه BOD متر دیجیتالی و انکوباتور مدل Lovibond ساخت کشور آلمان و ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۰۱ مدل L250AAA ساخت کشور انگلستان بودند.

نمونه‌برداری و آنالیز آزمایشگاهی: در سال ۱۳۷۵ تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل، احداث شد و با تعداد ۹ ایستگاه پمپاژ به بهره‌برداری رسید. سپس در سال ۱۳۸۷، به ظرفیت دریافت میزان فاضلاب ۲۰۰ هزار مشترک ارتقاء داده شد. روش تصفیه فاضلاب در این تصفیه‌خانه از نوع برکه تثبیت است. پساب تصفیه شده حاصل نیز توسط کانال به بیرون تصفیه‌خانه هدایت می‌شود. پس از لایروبی استخرها نیز، لجن حاصل دپو شده و در برخی از مواقع به‌عنوان کود استفاده می‌شود. همچنین زمین‌های اطراف تصفیه‌خانه از پساب حاصله در آبیاری استفاده می‌کنند (Einollahopeer et al., 2020). در این مطالعه نمونه‌برداری از تصفیه‌خانه در بهار ۱۴۰۳ انجام شد. جهت انجام کار، از روش استاندارد APHA استفاده گردید (Federation and Association, 2005). بدین‌ترتیب که نمونه فاضلاب ورودی و پساب تصفیه شده خروجی طبق شرایط استاندارد ۳۰۱۰ و طبق روش‌های استاندارد آب و پساب از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل برداشت و در ظروف مخصوص نمونه‌برداری قرار داده شد. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها در ظروف پلی‌اتیلنی به حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر قرار داده شد. سپس pH بخشی از نمونه‌ها جهت سنجش فلزات سنگین، توسط اسیدنیتریک رقیق، به زیر ۲ رسانده شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فاضلاب ورودی و پساب خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل شامل سولفات، سولفید، آمونیاک، اکسیژن‌خواهی زیستی BOD₅^۶، نیترات-NO₃⁻ و فسفات-PO₄⁻³ با استفاده از روش‌های استاندارد آب و پساب اندازه‌گیری شد. سپس غلظت عناصر مورد بررسی توسط دستگاه ICP مدل Pekin Elmer Optima DV2000 (ساخت ایالات متحده آمریکا) بر حسب میکروگرم بر لیتر (μg/l) سنجش شد (Adhikari et al., 2014; Kazemi et al., 2022).

ارزیابی چرخه حیات: ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل، با استفاده از نرم‌افزار SimaPro (نسخه ۹/۶) و پایگاه داده Ecoinvent 3 براساس استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 (ISO, 2006) انجام شد. لیست سیاهه برای انجام ارزیابی چرخه عمر تصفیه فاضلاب، از طریق جمع‌آوری مقادیر مواد و انرژی مصرفی و همچنین ترکیبات ورودی به هوا، آب و خاک به‌دست آمد (Olagunju et al., 2023). مقادیر فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در پساب ورودی و خروجی تصفیه‌خانه، نشان‌دهنده بار آلودگی وارد شده و خارج شده از سیستم به‌ازای هر مترمکعب فاضلاب هستند. بار آلودگی ورودی شامل تمامی فلزات سنگین و فاکتورهای فیزیکی‌وشیمیایی است که همراه با پساب خام وارد فرآیند تصفیه می‌شوند و فشار

^۲Ecological footprint

^۳Intergovernmental Panel on Climate Change

^۴Global warming potential

^۵Cumulative energy demand

^۶Biological oxygen demand

آلودگی اولیه بر سیستم و محیط‌زیست را نشان می‌دهند. بار آلودگی خروجی نیز مقدار فلزات سنگین باقیمانده و فاکتورهای فیزیکوشیمیایی در پساب تصفیه‌شده است که پس از عبور از مراحل مختلف تصفیه به محیط طبیعی وارد شده و می‌تواند اثرات سمی و محیط‌زیستی بر آب‌ها و خاک‌های منطقه داشته باشد (Dessie et al., 2022). این مقادیر برحسب واحد عملکردی (۱ مترمکعب فاضلاب تصفیه‌شده) محاسبه شده و برای انجام ارزیابی چرخه عمر به نرم‌افزار تعریف شدند. این فرآیند، امکان تعیین سهم هر فلز و سایر پارامترهای مؤثر در بار آلودگی کل سیستم را فراهم می‌کند. برای انجام کار، مواد و انرژی مصرفی و خروجی‌های محیطی تصفیه‌خانه شهرستان زابل طی یک سال از اداره آب و فاضلاب و نتایج آزمایشگاهی استخراج شد. انرژی مصرفی، مواد اولیه، میزان انتشار به محیط و پساب تولید شده محاسبه و جدول سیاهه تهیه شد (جدول ۱).

پیامدهای میانی شامل ۱۸ دسته پیامد و پایانی در ۳ دسته پیامد کلی به روش ReCiPe H 2016 بررسی شد. اهمیت نسبی هر دسته اثر با استفاده از روش نرمال‌سازی تعیین شد تا مقیاسی قابل‌مقایسه برای دسته‌های اثر فراهم شود. همچنین میزان انرژی مصرف شده به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، به‌وسیله روش انرژی‌خواهی تجمعی یا CED^۷ محاسبه شد. پتانسیل گرمایش جهانی (GWP^۸) و تغییر اقلیم نیز تعیین گردید. بدین‌ترتیب که جهت محاسبه پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) از روش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) برحسب کیلوگرم CO₂ در بازه زمانی ۵۰۰ سال استفاده شد. همچنین ردپای اکولوژیک تصفیه‌خانه نیز به روش EF^۹ بررسی گردید (Nowrouzi and Abyar, 2021; Charpentier et al., 2022).

آنالیز حساسیت: جهت انجام آنالیز حساسیت مهم‌ترین عامل ایجاد کننده پیامدهای محیط‌زیستی حاصل از آزمون ReCiPe midpoint در نظر گرفته شد. از آنجا که در اکثر پیامدهای محیط‌زیستی، برق مصرفی و سولفات بیشترین میزان تأثیر را داشتند، به‌عنوان عامل مؤثر مدنظر قرار گرفت. بر این اساس، با کاهش مصرف احتمالی ۱۰٪ برق و ۱۰٪ کاهش غلظت سولفات در پساب، تغییرات ۱۸ دسته پیامد، به کمک آزمون ReCiPe midpoint بررسی گردید.

جدول ۱- سیاهه ارزیابی چرخه حیات جهت تصفیه ۱ مترمکعب فاضلاب توسط تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل

ورودی‌ها			خروجی‌ها		
نوع	واحد	میزان	انتشار به آب	واحد	میزان
برق	کیلووات ساعت	۳/۳۳	کلسیم	کیلوگرم	۰/۰۰۲۸۰
کلسیم	کیلوگرم	۰/۰۲۱	نیتрат	کیلوگرم	۰/۰۰۰۷۹۰
سدیم	کیلوگرم	۰/۰۰۲۲۹	فسفات	کیلوگرم	۰/۰۰۲۹۰
کلرین (مایع)	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۳۳۳	آمونیاک	کیلوگرم	۰/۰۰۰۲۴
پتاسیم	کیلوگرم	۰/۰۵۱	سولفات	کیلوگرم	۰/۳۳
منیزیم	کیلوگرم	۰/۴۷۰	سولفید	کیلوگرم	۰/۰۵۲
فسفات	کیلوگرم	۰/۰۸۲۱	کربنات	کیلوگرم	۰/۲۳۰
نیکل	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۱	آهن	کیلوگرم	۰
کبالت	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲	مس	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲۴
BOD ₅	کیلوگرم	۰/۰۰۶۸۵	کروم	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۱۹
مولیبدن	کیلوگرم		کادمیم	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲۵
آرسنیک	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۳	روی	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۵
آمونیاک	کیلوگرم	۰/۰۰۶۵	سرب	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۲۹
سولفات	کیلوگرم	۰/۳۲۰	جیوه	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۴
سولفید	کیلوگرم	۰/۰۷۳	کبالت	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۳۶
کبالت	کیلوگرم	۰/۰۱۹	نیکل	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۱۶
کروم	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۲	آرسنیک	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۱۹
جیوه	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۵	منگنز	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲۰۹
کادمیم	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲۸	مولیبدن	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۴۹

^۷Cumulative energy demand

^۸Global warming potential

^۹Ecological footprint

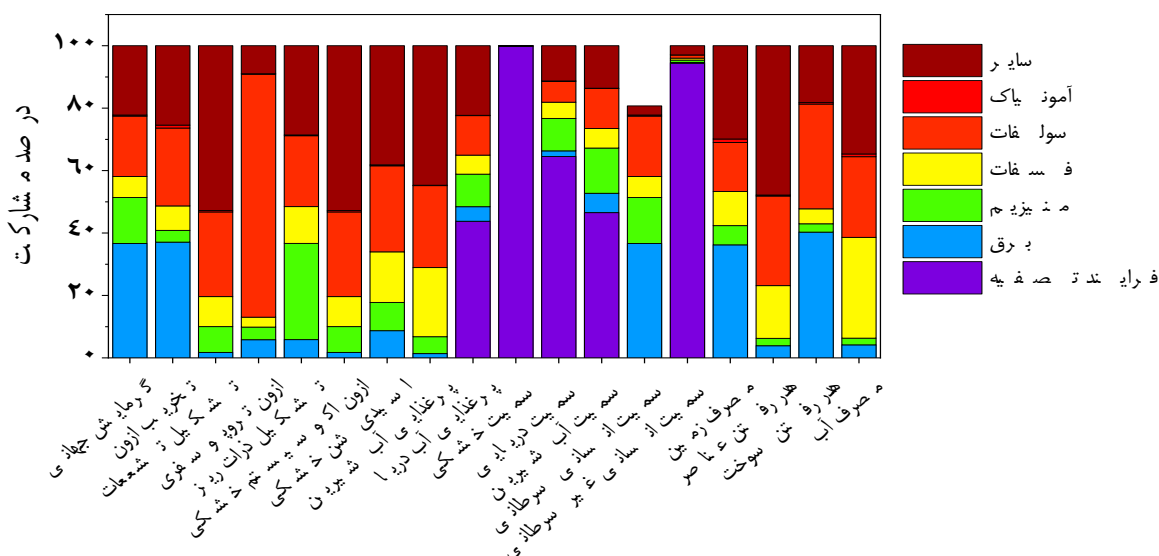
ورودی‌ها			خروجی‌ها	
روى	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲۹	انتشار به خاک	واحد
آهن	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۲۲	آهن	کیلوگرم
سرب	کیلوگرم	۰/۰۰۰۰۰۲	مس	کیلوگرم
			کروم	کیلوگرم
			روی	کیلوگرم
			منگنز	کیلوگرم
			سدیم	کیلوگرم
			جیوه	کیلوگرم
			کیالت	کیلوگرم
			آرسنیک	کیلوگرم

یافته‌های پژوهش و بحث

بررسی پیامدهای میانی آزمون ReCiPe midpoint: نتایج حاصل از بررسی پیامدهای میانی در ۱۸ دسته پیامد، در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل از نرمال‌سازی داده‌ها، سمیت اکوسیستم‌های خشکی (۰/۰۸۵) با مقدار معادل Kg 1,4-DCB eq ۰/۵۰۹، سمیت اکوسیستم‌های آب شیرین (۰/۰۲۰۴) با مقدار معادل kg 1,4-DCB eq ۰/۲۵۱، سمیت غیر سرطانزایی انسانی (۰/۰۸۴۹) با مقدار معادل kg 1,4-DCB eq ۲۷/۷ و سمیت اکوسیستم‌های دریایی (۰/۰۴۳) با مقدار معادل Kg 1,4-DCB eq ۰/۲۵۹، مهم‌ترین پیامدهای محیط‌زیستی حاصل از تصفیه ۱ متر مکعب فاضلاب بودند. شکل ۱، درصد مشارکت هر یک از عوامل مؤثر بر ایجاد پیامدهای محیط‌زیستی را نشان می‌دهد. بررسی عوامل مؤثر بر پیامدها، حاکی از تأثیر فرآیند تصفیه بر تعداد زیادی از پیامدها از قبیل سمیت خشکی، سمیت انسانی غیر سرطانی و پرغذایی آب دریا بود. در ارزیابی چرخه حیات تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران توسط Rahmati و همکاران (۲۰۲۴)، پیامدهای این تصفیه‌خانه با استفاده از نرم‌افزار SimaPro 9 و استانداردهای تعریف‌شده به روش ReCiPe 2016-midpoint محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرآیند کلی تصفیه فاضلاب بیشترین اثرات نامطلوب محیط‌زیستی را دارند که با مطالعه حاضر همخوانی داشت. در بین ۱۸ طبقه پیامد، پساب تصفیه شده در طبقه سمیت محیط‌زیست دریایی با مقدار ۱۰۱/۱۵۳۱ کیلوگرم DCB-۱،۴ بیشترین اثرات محیط‌زیستی را در بین سایر طبقات داشت. درحالی‌که در مطالعه حاضر بیشترین تأثیر بر اکوسیستم‌های خشکی به‌دست آمد. در مطالعه حاضر، پس از فرآیند کلی تصفیه، برق مصرفی و سولفات باقیمانده از فرآیند، بیشترین تأثیر را بر پیامدهای محیط‌زیستی داشتند. در مطالعه Szluc و همکاران (۲۰۲۱) نیز که به‌منظور بررسی عملکرد تصفیه‌خانه شهری پوزنان (Poznań) لهستان، اثرات میانی و پایانی محیط‌زیستی به روش ReCiPe بررسی شد، نشان داده شد که عامل انرژی، مربوط به تقاضای فرآیند تصفیه فاضلاب، بیشترین تأثیر را بر مجموع شاخص‌های محیط‌زیستی دارد. بنابراین در این زمینه (مصرف انرژی) با مطالعه حاضر همخوانی دارد. در عین حال، به‌دلیل سطح پایین میزان هر یک از پیامدها، آنها عملکرد تصفیه‌خانه را هم‌راستا با محیط‌زیست عنوان کردند. تحقیق حاضر با مطالعه Salo نیز همخوانی بالایی داشت، به‌گونه‌ای که Salo (۲۰۱۷) با بررسی پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه آب در هلستینکی، نشان داد که بیشترین اثرات محیط‌زیستی ناشی از کل فرآیند تصفیه بود. عملیات عمدتاً ناشی از مصرف برق تصفیه‌خانه، تولید مواد شیمیایی، آب آهک، آب آمونیاک و هیپوکلریت سدیم بود. عوامل مؤثر بر پیامدها نیز تولید مواد شیمیایی در اثر استفاده از گاز طبیعی طبیعی، برق و زغال سنگ برآورد شد.

با توجه به بررسی عوامل مؤثر بر پیامدهای محیط‌زیستی، آنالیز حساسیت با ۱۰٪ کاهش برق مصرفی و همچنین ۱۰٪ کاهش سولفات باقیمانده از فرآیند، انجام و نتایج حاصل از بررسی مجدد پیامدها در جدول ۲ نشان داده شد. بدین ترتیب با کاهش ۱۰٪ مقدار مصرف برق، بیشترین اثر کاهشی بر کاهش پیامد گرمای جهانی با مقدار ۱۳/۸٪ و از دست رفتن منابع فسیلی با مقدار ۵/۲۱٪ حاصل شد. درحالی‌که سایر پیامدها کاهش معنی‌داری نشان ندادند. بنابراین جهت کمتر شدن تأثیر برق مصرفی، بر

پیامدهای محیط‌زیستی، انرژی جایگزین بایستی مد نظر قرار گیرد. از آنجا که تولید برق بیشتر از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی است، تأثیر بر پیامدهای مورد بررسی شدیدتر است. با جایگزین شدن انرژی پاک، تأثیر پیامدها کمتر خواهد شد. در پژوهش Guerra-Rodríguez و همکاران (۲۰۲۳) نیز مصرف برق عامل اصلی تأثیرگذار بر پایداری محیط‌زیستی بود و بین ۶۵ تا ۹۰ درصد از کل اثرات را شامل شد. در مجموع، در این مطالعه نیز مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییرات اقلیمی مهم‌ترین دسته‌های تأثیر در همه سناریوها بودند. همچنین تأثیر کاهش ۱۰٪ سولفات با مقادیر ۷/۳۲٪، ۴/۳۴٪ و ۲/۸۴٪ به ترتیب در پدیده گرمایش جهانی، از دست رفتن سوخت‌های فسیلی و تأثیر بر غیر سرطانی‌زایی انسانی به دست آمد. درحالی‌که تأثیر معنی‌داری در کاهش سایر پیامدها نداشت. بنابراین در صورت تصفیه بهتر پساب توسط فرآیند تصفیه هوازی در تصفیه‌خانه فاضلاب زابل و به دنبال آن کاهش مقدار سولفات، تأثیر خروج پساب تصفیه‌شده به طبیعت کمتر خواهد شد (Hao et al., 2014; Guerra-Rodríguez et al., 2023).



شکل ۱- درصد مشارکت عوامل مؤثر بر پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از عملکرد تصفیه‌خانه

مطالعه حاضر با نتایج حاصل از تحقیق Eskandari و همکاران (۲۰۲۰) نیز مطابقت داشت. این محققین در بررسی عملکرد تصفیه‌خانه پژوهشگاه صنعت نفت تهران، برق را از عوامل بحرانی عنوان کردند. در مطالعه Dong (۲۰۱۲) بیشترین عامل مؤثر، پدیده گرمایش جهانی شناخته شد که ناشی از دی‌اکسید کربن تولیدی (۵۰٪) و سپس نیتروژن دی‌اکسید و متان ناشی از مصرف انرژی تشخیص داده شد. McNamara و همکاران (۲۰۱۶) نیز به بررسی پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه فاضلاب در ایرلند پرداختند. در این مطالعه، مصرف انرژی و لجن، همچنین استفاده از لجن، به عنوان بزرگترین عوامل تأثیرگذار بر محیط‌زیست تعیین شدند. از آنجا که بیشترین مقدار مصرف انرژی در بخش هوادهی ثانویه برآورد شده بود، صرفه‌جویی در این بخش مهم شناخته شد. Parsajou و Fataei (۲۰۱۹) به مقایسه سیستم‌های تصفیه لجن بین دو روش لاگون هوادهی در تصفیه‌خانه فاضلاب اردبیل و لجن فعال در تصفیه‌خانه فاضلاب خلخال به روش ارزیابی چرخه حیات توسط آزمون CML 2001 و داده پایه‌ای Eco-indicator 99 پرداختند و نشان دادند که سیستم لاگون در تمامی طبقات اثر، تأثیر بیشتری داشته و در مقابل، سیستم لجن فعال دارای پیامدهای بسیار کمتری است. بنابراین روش لاگون هوادهی به عنوان سیستم جایگزین در طرح توسعه تصفیه‌خانه فاضلاب اردبیل معرفی گردید. همچنین Gomez و همکاران (۲۰۲۵)، با بررسی اثرات محیط‌زیستی یک تصفیه‌خانه فاضلاب در شهر سن لوئیس (مکزیک) با استفاده از روش ردپای اکولوژیک در تجزیه و تحلیل چرخه حیات نشان دادند که زیرساخت و تصفیه تکمیلی به ترتیب بر دسته‌های تأثیر کاربری زمین و تخریب لایه ازن اثرگذارند. همچنین در این بررسی غلظت فلزات سنگین در لجن به اثرات سلامت انسان و دست‌بندی سمیت آب شیرین کمک می‌کند. آنها عنوان کردند با کاهش فاصله بین منطقه پیش تصفیه و سیستم تصفیه اصلی تصفیه‌خانه، جهت کاهش مصرف انرژی الکتریکی مورد نیاز توسط پمپاژ و

همچنین استفاده از یک منبع انرژی جایگزین برای تأمین انرژی لازم تصفیه‌خانه و مدیریت لجن در محل دفن زباله یا بیوگاز می‌توان پیامدها را کاهش داد.

جدول ۲- پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه ۱ متر مکعب فاضلاب و نتیجه آنالیز حساسیت با ۱۰٪ کاهش کلر مصرفی توسط آزمون ReCiPe midpoint

دسته بندی پیامدها	مقدار	واحد	نرمالیزه	کارایی ۱۰٪ کاهش برق	کارایی ۱۰٪ کاهش سولفات
گرمایش جهانی	۳/۹	kg CO ₂ eq ^a	-۰/۰۰۰۵۴۹	۱۳/۸۸٪	۷/۳۲٪
تخریب ازون استراتوسفری	۲/۰۴×۱۰ ^{-۷}	kg CFC ^{۱۰-11} eq	۶/۹۲×۱۰ ^{-۶}	۹/۶۵×۱۰ ^{-۷}	۶/۴۹×۱۰ ^{-۷}
تشکیل تشعشعات	۰/۱۳۶	kBq Co-60 eq	-۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۳۰٪	۰/۰۴۶٪
تشکیل ازون، سلامت انسان	۰/۰۲۵۳	kg NO _x eq	-۰/۰۰۰۴۴۵	۰/۰۰۰۶۵٪	۰/۰۰۰۴۸۰٪
تشکیل ذرات ریز	۰/۰۰۶۰۸	kg PM _{2.5} eq	-۰/۰۰۰۴۳۲	۰/۰۰۰۳۵٪	۰/۰۰۱۳۸٪
تشکیل ازون، اکوسیستم‌های خشکی	۰/۰۱۱۷	kg NO _x eq	-۰/۰۰۳۴۳۲	۰/۰۰۱۴۶٪	۰/۰۰۱۹۷٪
اسیدی شدن خشکی	۰/۰۱۲۱	kg SO ₂ eq	-۰/۰۰۰۳۱۶	۰/۰۰۱۰۵٪	۰/۰۰۰۳۳٪
پرغذایی اکوسیستم آب شیرین	۰/۰۰۰۹۰۳	kg PO ^{۱۱} ₄ ³⁻ eq	-۰/۰۰۳۱۱۶	۰/۰۰۰۱۲٪	۰/۰۰۰۲۳٪
پرغذایی اکوسیستم‌های دریایی	۰/۰۰۰۱۷۴	kg N eq	-۰/۰۰۰۱۱۸	۰/۰۰۰۴۰٪	۰/۰۰۰۱۰٪
سمیت اکوسیستم‌های خشکی	۰/۵۰۹	Kg 1,4-DCB eq	-۰/۰۸۵	۰/۰۰۰۷۴۸٪	۰/۰۰۰۳۶۴٪
سمیت اکوسیستم‌های دریایی	۰/۲۵۹	Kg 1,4-DCB eq	-۰/۰۴۳۴۱۷	۰/۰۰۱۹٪	۰/۰۰۷۲٪
سمیت اکوسیستم‌های آب شیرین	۰/۲۵۱	kg 1,4-DCB eq	-۰/۰۲۰۴۶۸	۰/۰۰۴۵٪	۰/۰۱۱٪
سمیت انسانی سرطانزایی	۰/۳۷۲	kg 1,4-DCB eq	-۰/۰۰۰۵۲۳	۰/۰۰۰۰۸۹٪	۰/۰۰۰۰۶۲۵٪
سمیت انسانی غیر سرطانزایی	۲۷/۷	kg 1,4-DCB eq	-۰/۰۸۴۹۵	۰/۰۰۷۹۶٪	۰/۲/۸۴۹٪
مصرف زمین	۰/۰۷۷۶	M ₂ a crop eq	۷/۷۶×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۰۰۱۵٪	۰/۰۰۰۰۶۸٪
از دست رفتن عناصر	۰/۱۵۸	kg Cu eq	-۰/۰۰۰۳۵۶	۰/۰۰۶۱۷٪	۰/۰۰۴۵٪
از دست رفتن سوخت فسیلی	۱/۲۹	kg oil eq	-۰/۰۰۱۰	۰/۰۵/۲۱٪	۰/۴/۳۴٪
کاهش میزان آب	۰/۰۴۲۶	m ³	-۰/۰۰۰۰۲۳۶	۰/۰۱۷٪	۰/۱۱٪

نتایج حاصل از آزمون Endpoint: بخش پایانی فرآیند ReCiPe شامل سه بخش مصرف منابع، سلامت انسانی و سلامت اکوسیستمی است که اثرات یک فرآیند را به این ترتیب و به شکل کلی نشان می‌دهد (Hardaker et al., 2024). آسیب‌رسانی به سلامت انسان توسط یک فرآیند یا یک محصول به کمک شاخص DALY^{۱۲} قابل بررسی و محاسبه است. جهت محاسبه این شاخص، نرم افزار به کمک اطلاعات ورودی، برحسب تعداد سال‌هایی که از عمر یک شخص بالغ بر اثر فرآیند مذکور کم می‌شود، نتیجه‌گیری می‌کند. بدین ترتیب، این شاخص در بازه ۰ تا ۱ محاسبه شده که به ترتیب نشان‌دهنده سلامت کامل و مرگ فرد است (Kobayashi et al., 2015; Olagunju et al., 2021). شکل ۲ اثرات پایانی تصفیه یک متر مکعب فاضلاب در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر بر سلامت انسانی این فرآیند با مقدار ۶۴/۹۴٪ بیشترین پیامد بوده که ناشی از فرایند تصفیه بود. تأثیر بر سلامت اکوسیستم با مقدار ۳۱/۰۱٪ در رده دوم قرار گرفت. درحالی که کمترین پیامد، تأثیر بر منابع با مقدار ۴/۰۵٪ حاصل شد.

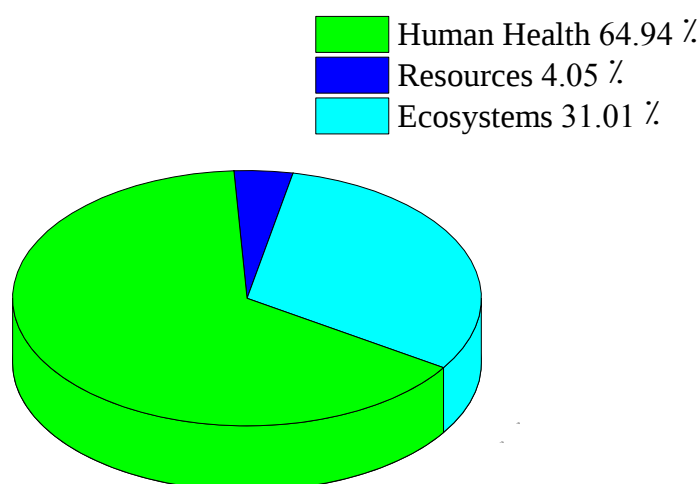
برآورد انرژی‌خواهی تجمعی به روش CED: از جمله انرژی که به‌طور غیر مستقیم استفاده می‌شود می‌توان به گازوئیل مصرفی جهت تولید برق اشاره کرد. بیشترین برق تولیدی در کشور به کمک سوخت گازوئیل و مازوت به‌دست می‌آید که می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر افزایش اثر انرژی‌خواهی تجمعی داشته باشد و به نوعی بر پدیده گرمایش جهانی تأثیرگذار باشد (Statistical Year Book, 2013; Shahraki et al., 2023). جریان کل انرژی استفاده شده در طی فرآیند تصفیه فاضلاب که به‌طور مستقیم و غیر مستقیم استفاده شده است، به کمک آزمون CED برحسب مگاژول محاسبه شد. شکل ۳ نتایج حاصل از آنالیز CED مربوط به تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصل، انرژی فسیلی غیر قابل تجدید بیشترین میزان را به‌خود

¹⁰Chlorofluorocarbon

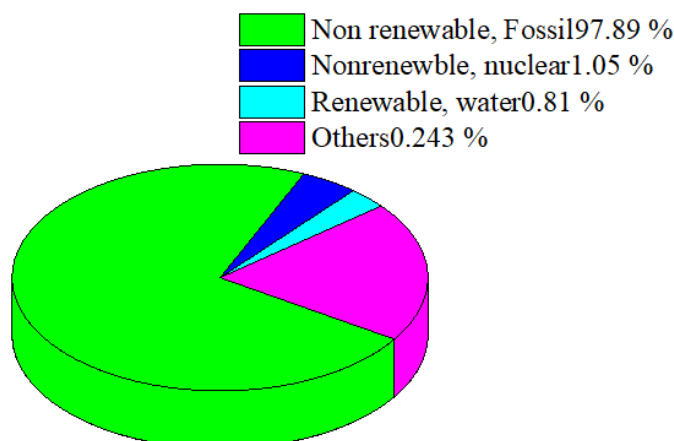
¹¹Phosphate

¹²Disability Adjusted Life Years

اختصاص داد. به‌طوری که میزان آن MJ ۵۹/۰۰۵۵ به‌دست آمد. سپس منابع تجدیدپذیر و آب با مقدار ۲/۷٪ به‌دست آمد. گازوئیل نقش معنی‌داری بر مواد خام در مصرف انرژی داشته که میزان آن ۷۳/۲۳٪ به‌دست آمد. نفت خام و گاز طبیعی مهم‌ترین سوخت‌های فسیلی جهت تهیه انرژی به‌دست آمدند که مقادیر آنها به‌ترتیب ۸۸/۹۲٪ و ۶/۰۲٪ محاسبه شد. مهم‌ترین اثرات استفاده از انرژی تجدیدپذیر، در مقایسه با نیروگاه‌هایی که در آنها از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌شود، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه کاهش اثرات تابعه است (Das et al., 2021). بنابراین با جایگزین کردن انرژی پاک مثل انرژی خورشیدی (پتانسیل بالای زابل در استفاده از انرژی خورشیدی به‌دلیل واقع شدن در منطقه خشک و آفتاب‌گیر با تعداد ۲۶۰ ساعت آفتابی متوسط در ماه) یا برق بادی (با توجه به بادخیز بودن منطقه) می‌توان پیامدهای محیط‌زیستی تصفیه‌خانه را کاهش داد.



شکل ۲- نتایج حاصل از آزمون Endpoint یک متر مکعب تصفیه فاضلاب در تصفیه‌خانه شهرستان زابل



شکل ۳- نمودار مشخصات روش انرژی‌خواهی تجمعی تصفیه یک متر مکعب فاضلاب

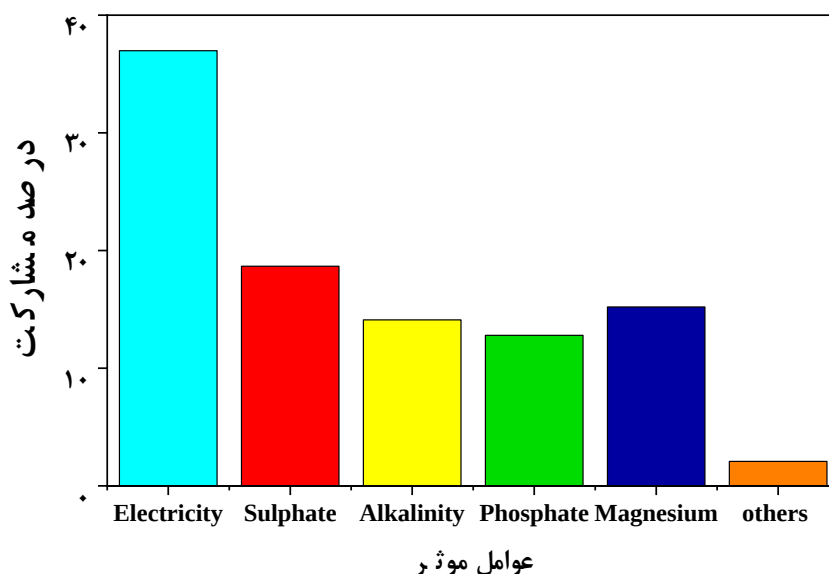
روش IPCC جهت بررسی GWP و همچنین Greenhouse gas protocol بر حسب $\text{kg CO}_2\text{-eq}$: آزمون IPCC جهت بررسی پتانسیل گرمایش جهانی محاسبه گردید. شاخص GWP نیز با اثر انتشار گاز دی‌اکسیدکربن مرتبط بوده و جهت برآورد سهم نسبی گرمایش جهانی در اثر انتشار اتمسفری واحد کیلوگرم یک گاز گلخانه‌ای خاص نسبت به انتشار واحد کیلوگرم دی‌اکسید کربن به‌کار می‌رود. معمولاً شاخص GWP بر پایه بازه‌های زمانی ۲۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ ساله محاسبه می‌شود. دی‌اکسید کربن و متان از جمله گازهای گلخانه‌ای هستند که از محصولات صنایع مختلف به هوا منتشر می‌شوند. واحد اندازه‌گیری دی‌اکسید کربن، معادل کیلوگرم دی‌اکسید کربن منتشر شده است. گازهای گلخانه‌ای شامل دی‌اکسید کربن و متان

حاصل مصرف نفت، گاز و پتروشیمی بوده که به هوا انتشار می‌یابد (Massone-Delmotte *et al.*, 2021; Çetinkaya *et al.*, 2023). براساس آزمون GWP، جهت تعیین پتانسیل گرمایش جهانی، مقدار Fossil CO₂ eq برابر ۳/۸۰ کیلوگرم CO₂، Biogenic CO₂ eq برابر ۰/۰۵۸ کیلوگرم CO₂، تغییرات زمین و مصرف آن (from land transformation) برابر ۰/۰۰۲۴ کیلوگرم CO₂ به‌دست آمد. مصرف سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین عامل ایجاد کننده با میزان ۹۹٪ سهم در تولید دی‌اکسیدکربن به‌دست آمدند. این میزان ناشی از انتشار مستقیم فرآیند تصفیه فاضلاب بود، که نتیجه آن با آزمون ردپای اکولوژیک تصفیه فاضلاب در مطالعه حاضر همخوانی داشت. زیرا در ردپای اکولوژیک در این مطالعه بیشترین تأثیر آن ناشی از انتشار دی اکسید کربن با انتشار ۹۴/۵۶٪ و سپس مصرف زمین با میزان ۳/۲۲٪ بود. بنابراین بایستی روش جایگزین سوخت پاک جهت کاهش تولید گاز مخرب دی‌اکسیدکربن استفاده شود. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که مقدار جذب CO₂ از جو توسط فرآیند تصفیه (یعنی میزان صرفه‌جویی در تولید دی‌اکسیدکربن و کاهش انتشار آن) برابر ۰/۰۶۸ کیلوگرم CO₂ بود.

تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌توانند سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشند، اما در عین حال فرصت‌هایی برای کاهش ردپای کربنی نیز فراهم می‌کنند. این انتشارها می‌توانند مستقیم باشند، مانند احتراق سوخت‌های فسیلی در محل یا انتشارهای ناشی از فرآیندهای تصفیه، یا غیرمستقیم، که عمدتاً ناشی از مصرف برق است (Demir and Yapıcıoğlu, 2019; Riccardo *et al.*, 2023; Karakas *et al.*, 2024). براساس آزمون IPCC، که در بازه ۵۰۰ ساله سنجش شد، مقدار دی‌اکسیدکربن تولید معادل فرآیند تصفیه فاضلاب به‌ازای یک مترمکعب فاضلاب تصفیه شده، ۳/۹۶۹ کیلوگرم CO₂ به‌دست آمد. بررسی عامل مؤثر حاکی از تأثیر برق مصرفی بود که به نوعی تأییدی بر نتایج فوق است (شکل ۴). مطالعات متعددی به ارزیابی ردپای کربنی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب پرداخته‌اند. Riccardo و همکاران (۲۰۲۳) جنبه‌های مختلف ردپای کربنی یک تصفیه‌خانه بزرگ در مرکز ایتالیا که از سیستم لجن فعال سنتی و هاضم بی‌هوازی استفاده می‌کرد را بررسی نمودند. مطالعه دیگری ردپای کربنی یک تصفیه‌خانه پیشرفته زیستی را با در نظر گرفتن انتشارهای مستقیم و غیرمستقیم براساس روش‌شناسی‌های معرفی‌شده از سوی UNFCC^{۱۳} و IPCC ارزیابی کرد (Karakas *et al.*, 2024). نتیجه برخی مطالعات نیز نشان می‌دهد که فرآیندهای تصفیه فاضلاب به‌طور میانگین ۳/۶۳ کیلوگرم CO₂ به‌ازای هر متر مکعب فاضلاب تصفیه‌شده تولید می‌کنند (Demir and Yapıcıoğlu, 2019; Riccardo *et al.*, 2023; Karakas *et al.*, 2024). این نتیجه اهمیت درک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را برجسته می‌سازد.

یکی از راهکارهای کاهش ردپای کربنی در تصفیه‌خانه فاضلاب، کاهش مصرف برق است. این امر می‌تواند از طریق به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه محقق شود (Demir and Yapıcıoğlu, 2019; Boiocchi *et al.*, 2023). راهکار دیگر، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی پاک است که می‌تواند تولید CO₂ و ورود آن را به جو کاهش دهد (Gustavsson *et al.*, 1995; Tetteh *et al.*, 2022). رویکردهای یکپارچه برای ارزیابی پایداری محیط‌زیستی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از منظر ردپای کربنی ضروری هستند. زیرا این ارزیابی‌ها منابع مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای را در نظر می‌گیرند. این دسته مطالعات می‌توانند به شناسایی نقاط بحرانی و کلیدی جهت بهبود کمک کنند و توسعه راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از تصفیه‌خانه‌ها را هدایت نمایند (Demir and Yapıcıoğlu, 2019; Riccardo *et al.*, 2023; Karakas *et al.*, 2024).

¹³United Nations Framework Convention on Climate Change

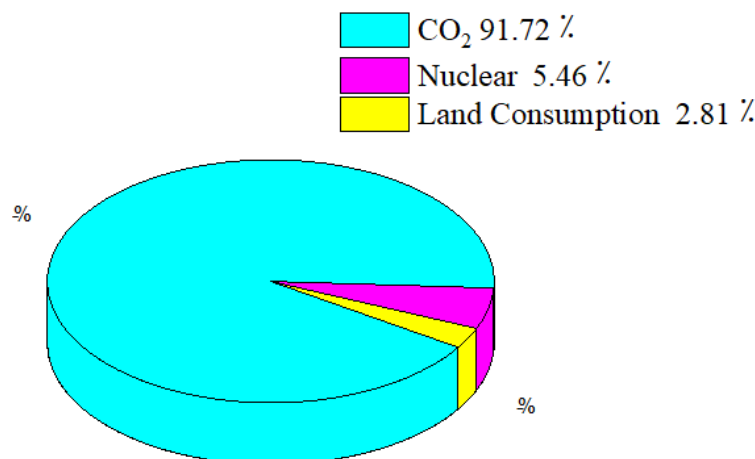


شکل ۴- درصد مشارکت عوامل اصلی مؤثر بر پدیده گرمایش جهانی براساس IPCC

Chen و همکاران (۲۰۲۳) میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از ۱۷ تصفیه‌خانه را در مقیاس کشوری برآورد کردند. داده‌های لازم از تمامی تصفیه‌خانه‌های مورد بررسی از مناطق مختلف در این کشور جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که انتشار گازهای گلخانه‌ای طی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها از مقدار 0.29 کیلوگرم $\text{CO}_2 \text{ eq/m}^3$ تا 1.18 کیلوگرم $\text{CO}_2 \text{ eq/m}^3$ متفاوت بود. عوامل کلیدی مؤثر در انتشار کلی گازهای گلخانه‌ای نیز به‌عنوان دی‌اکسیدکربن (فسیلی) و متان (فسیلی) به هوا که عمدتاً از تولید الکتریسیته تولید می‌شود و متان (بیوژنیک) و اکسید نیتروژن (بیوژنیک) به هوا که عمدتاً از تصفیه فاضلاب تولید می‌شود، شناسایی شدند. میانگین کلی انتشار گازهای گلخانه‌ای با مقدار 0.88 کیلوگرم $\text{CO}_2 \text{ eq/m}^3$ ارزیابی شد. همچنین انتشار گازهای گلخانه‌ای مبتنی بر مصرف برق 34% ، مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید شده برآورد شد. آنها پیشنهاد کردند، تنظیم بیشتر شبکه برق به سمت انتشار کمتر کربن، بهبود فناوری برای ارتقای بهره‌وری تصفیه و بازیابی انرژی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. همچنین آنها اظهار داشتند، به‌منظور دستیابی به حذف کامل آلاینده‌ها و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سیاست‌گذاری در مورد تصفیه فاضلاب باید با شرایط محیطی هر منطقه تنظیم شود.

برآورد ردپای اکولوژیک (Ecological footprint): یکی از مهم‌ترین فرایندها یا ارزیابی‌های مؤثر بر نقش یک فرآیند در محیط‌زیست، بررسی ردپای اکولوژیک یا Ecological footprint (EF) است. ردپای اکولوژیک براساس سه شاخص تولید غلظت دی‌اکسیدکربن، انرژی هسته‌ای و میزان اشغال زمین محاسبه و برآورد می‌شود (Liu et al., 2024). در تحقیق حاضر، میزان ردپای اکولوژیک در طی فرآیند تصفیه فاضلاب به ترتیب $91/72\%$ ، $5/46\%$ و $2/81\%$ به‌دست آمد (شکل ۵). بر این اساس، بیشترین میزان مربوط به دی‌اکسید کربن بوده است. نتیجه بررسی عوامل و فرایندهای مؤثر بر ایجاد دی‌اکسید کربن نیز نشان داد که بیشترین عامل مؤثر برق مصرفی با میزان مشارکت $37/30\%$ و سپس قلیائیت با میزان $18/10\%$ بود. درحالی‌که عامل مؤثر بر Nuclear و مصرف زمین سولفات با مقادیر $31/40\%$ و $20/37\%$ بود.

در تحقیقی که توسط Teo و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد، از ترکیب فاضلاب یک کشتارگاه واقعی و سه سناریو، بدون تصفیه و تخلیه، تصفیه و تخلیه اولیه و همچنین تصفیه تکمیلی به‌دنبال استفاده مجدد جزئی از آب برای مدیریت فاضلاب مدل استفاده شد. هر سه سناریو از نظر عملکرد محیط‌زیستی آنها پس از ارزیابی چرخه زندگی، با استفاده از روش ردپای محیطی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که بهترین سناریو برای تصفیه فاضلاب کشتارگاه، سناریوی سوم با ردپای کلی 0.255 میلی‌اکوپینت (mPt) در مقایسه با $3/45$ mPt و $1/331$ mPt در سناریوی اول و دوم است. به‌طور کلی، تفاوت‌های مشاهده شده در نتایج مطالعات مختلف عمدتاً ناشی از اختلاف در شرایط عملیاتی تصفیه‌خانه‌ها، ویژگی‌های پساب ورودی، روش‌های تصفیه و سناریوهای ارزیابی مورد استفاده در هر مطالعه است.



شکل ۵- نتیجه حاصل از آزمون Ecological footprint

نتیجه گیری

تحقیق حاضر به منظور تعیین عوامل بحرانی مؤثر بر پیامدهای محیطی ناشی از عملکرد تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان زابل انجام شد. مهم‌ترین عامل مؤثر بر کلیه پدیده‌ها به‌ویژه پیامدهای مذکور، در ابتدا ناشی فرایند تصفیه و سپس برق مصرفی و سولفات باقیمانده از فرایند تصفیه بود. این عوامل بیشترین تأثیر را بر پیامد سلامت انسان در بررسی پیامدهای پایانی و همچنین سمیت اکوسیستم‌های خشکی، سمیت اکوسیستم‌های دریایی، سمیت غیر سرطانزایی انسانی و سمیت اکوسیستم‌های آب شیرین در بخش پیامدهای میانی داشتند. همچنین کربن منتشره حاصل از ۱ مترمکعب تصفیه، برابر ۳/۹۶۹ کیلوگرم CO₂ بود. مهم‌ترین شکل انرژی مصرفی شامل سوخت‌های فسیلی بوده و در بخش ردپای اکولوژیک، نیز بیشترین تأثیر را بر سلامت انسان داشت که با نتایج پیامدهای پایانی همخوانی داشت. به‌طور کلی مصرف برق نقطه بحرانی تأثیرگذار بر پیامدهای محیط‌زیستی بود. بنابراین با توجه به بادخیز بودن منطقه و همچنین داشتن حداقل ۲۴۰ روز آفتابی، جایگزین کردن انرژی‌های بادی و خورشیدی، می‌تواند تأثیر استفاده از سوخت‌های فسیلی را کاهش دهد. همچنین تصفیه کارتر پساب ورودی می‌تواند موجب کاهش غلظت آلاینده‌ها از قبیل سولفات شده که به‌دنبال آن پیامدهای محیط‌زیستی کاهش خواهد یافت.

References

- Adhikari, B., Khanal, S.N., Giri, D., Lamichhane, J., 2014. Seasonal variation of pH, BOD, COD and BOD/COD ratio in different ages of landfill leachate in Nepal. *Journal of Biomolecule Reconstruction* 11(2), 89-99.
- Azizi, S.Q., Saleh, S.M., Omar, I.A., 2019. Essential treatment processes for industrial wastewaters and reusing for irrigation. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences* 31(3), 269-275.
- Boiocchi, R., Viotti, P., Lancione, D., Stracqualursi, N., Torretta, V., Ragazzi, M., Rada, E.C., 2023. A study on the carbon footprint contributions from a large wastewater treatment plant. *Energy Report* 9, 274-286.
- Capodaglio, A.G., 2023. Urban Wastewater Mining for Circular Resource Recovery: Approaches and Technology Analysis. *Water* 15(22), 3967.
- Çetinkaya, M., Üstün, G.E., 2022. Monitoring and evaluation of the efficiency of a mixed textile-domestic wastewater treatment plant for 3 years. *Environmental Monitoring and Assessment* 194(6), 430.
- Charpentier Poncelet, A., Loubet, P., Helbig, C., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Sonnemann, G., 2022. Midpoint and endpoint characterization factors for mineral resource dissipation: methods and application to 6000 data sets. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 27(9), 1180-1198.

- Chen, W., Zhang, Q., Hu, L., Geng, Y., Liu, C., 2023. Understanding the greenhouse gas emissions from China's wastewater treatment plants: Based on life cycle assessment coupled with statistical data. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 259, 115007.
- Das, D.K., Chowdhury, S., 2021. Contribution of Renewable Energy in Mitigation of Global Warming Caused by Fossil Fuel. *International Journal of Renewable Energy Resources* 11(2), 57-65.
- Demir, Ö., Yapıcıoğlu, P., 2019. Investigation of GHG emission sources and reducing GHG emissions in a municipal wastewater treatment plant. *Greenhouse Gases: Science and Technology* 9(5), 948-964.
- Dessie, B.K., Tessema, B., Asegide, E., Tibebe, D., Alamirew, T., Walsh, C.L., Zeleke, G., 2022. Physicochemical characterization and heavy metals analysis from industrial discharges in Upper Awash River Basin, Ethiopia. *Toxicology Reports* 9, 1297-1307.
- Dong, B., 2012. Life cycle assessment of wastewater treatment plants, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts Institute of Technology, pp. 1-65.
- Einollahipeer, F., Ghafari, M., Dehmardeh Behrooz, R., 2020. Feasibility study of using urban wastewater treatment plant effluent in agriculture and aquaculture with CWQI model (case study, Zabol city, Sistan and Baluchestan province, Iran). *Journal of Animal Environment* 12(4), 581-592. (In Persian)
- Eskandari, A., Morovati, M., Alaiee, E., Alavi, K., 2020. Investigating the Wastewater Treatment System of the Tehran Oil Industry Research Institute using the Life Cycle Assessment Method. *The Journal of Toloo-e-behdasht* 19(2), 96-108. (In Persian)
- Federation, W.E., Association, A., 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, pp. 21.
- Finkbeiner, M., 2014. The international standards as the constitution of life cycle assessment: the ISO 14040 series and its offspring. In *Background and future prospects in life cycle assessment*, Dordrecht: Springer Netherlands 85-106.
- Goglio, P., Williams, A.G., Balta-Ozkan, N., Harris, N.R., Williamson, P., Huisingh, D., Tavoni, M., 2020. Advances and challenges of life cycle assessment (LCA) of greenhouse gas removal technologies to fight climate changes. *Journal of Cleaner Production* 244, 118896.
- Gomez, S.R., Castillo, N.A.M., Orozco, I.H., Galarza, A.Á., Larragoitia, S.A.C., Flores, M.M.A., Vázquez, V.Á., 2025. Life Cycle Assessment of a wastewater treatment plant in an urban area using the environmental footprint method: SR Gomez et al. *Environment, Development and Sustainability* 27(4), 9145-9163.
- Guerra-Rodríguez, S., Cuesta, S., Pérez, J., Rodríguez, E., Rodríguez-Chueca, J., 2023. Life Cycle Assessment of sulfate radical based-AOPs for wastewater disinfection. *Chemical Engineering Journal* 474, 145427.
- Gustavsson, L., Börjesson, P., Johansson, B., Svenningsson, P., 1995. Reducing CO₂ emissions by substituting biomass for fossil fuels. *Energy* 20(11), 1097-1113.
- Hao, T.W., Xiang, P.Y., Mackey, H.R., Chi, K., Lu, H., Chui, H.K., Chen, G.H., 2014. A review of biological sulfate conversions in wastewater treatment. *Water Research* 65, 1-21.
- Hardaker, A., Styles, D., Williams, P., Chadwick, D., Dandy, N., 2022. A framework for integrating ecosystem services as endpoint impacts in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 370, 133450.
- Kamble, S., Singh, A., Kazmi, A., Starkl, M., 2019. Environmental and economic performance evaluation of municipal wastewater treatment plants in India: a life cycle approach. *Water Science and Technology* 79(6), 1102-1112.
- Karakas, A., Tozum-Akgul, S., Komesli, O.T., Kaplan-Bekaroglu, S.S., 2024. Carbon footprint analysis of advanced biological wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering* 61, 105254.
- Karolinczak, B., Walczak, J., Bogacka, M., Zubrowska-Sudol, M., 2024. Life Cycle Assessment of sewage sludge mono-digestion and co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste at a wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment* 907, 167801.
- Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A., Olsen, S.L., 2018. Life cycle assessment of nanoadsorbents at early-stage technological development. *Journal of Cleaner Production* 174, 527-537.

- Kobayashi, Y., Peters, G.M., Ashbolt, N.J., Shiels, S., Khan, S.J., 2015. Assessing burden of disease as disability adjusted life years in life cycle assessment. *Science of the Total Environment* 530, 120-128.
- Liu, J., Sun, B., Piao, W., Jin, M., 2024. Evaluation of the Environmental Impact and Energy Utilization Efficiency of Wastewater Treatment Plants in Tumen River Basin Based on a Life Cycle Assessment+ Data Envelopment Analysis Model, *Sustainability* 16(4), 1690.
- Mainardis, M., Ferrara, C., Cantoni, B., Di Marcantonio, C., De Feo, G., Goi, D., 2024. How to choose the best tertiary treatment for pulp and paper wastewater? Life cycle assessment and economic analysis as guidance tools. *Science of the Total Environment* 906, 167598.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., 2021. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
- McNamara, G., Fitzsimons, L., Horrigan, M., Phelan, T., Delaure, Y., Corcoran, B., Clifford, E., 2016. Life cycle assessment of wastewater treatment plants in Ireland. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 4(3), 216-233.
- Nowrouzi, M., Abyar, H., 2021. A framework for the design and optimization of integrated fixed-film activated sludge-membrane bioreactor configuration by focusing on cost-coupled life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 296, 126557.
- Olagunju, B.Koch, D., Friedl, A., Mihalyi, B., 2023. Influence of different LCIA methods on an exemplary scenario analysis from a process development LCA case study. *Environment. Development and Sustainability* 25(7), 6269-6293.
- Parsajou, H., Fataei, E., 2019. Environmental assessment of the life cycle of sludge treatment systems of ardabil and khalkhal wastewater treatment plants. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 51(2), 243-256.
- Rahmati, M., Rasouli, M., Haji Agha Alizadeh, H., Ataeiyan, B., 2024. Impact Evaluation of Wastewater Treatment Based on the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Using the Life Cycle Assessment Method. *International Journal of Chemical Engineering* 2024(1), 5991815.
- Salo, H., 2017. A life cycle assessment of potable water treatment plant (Master's thesis).
- Saravanan, A., Kumar, P.S., Duc, P.A., Rangasamy, G., 2023. Strategies for microbial bioremediation of environmental pollutants from industrial wastewater: A sustainable approach. *Chemosphere* 313, 137323.
- Shahraki, H., Einollahipeer, F., Abyar, H., Erfani, M., 2023. Assessing the environmental impacts of copper cathode production based on life cycle assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management* 20(4), 1180-1190.
- Statistical Center of Iran. 2013. Iran statistical yearbook 583, 19.
- Szulc, P., Kasprzak, J., Dymaczewski, Z., Kurczewski, P., 2021. Life cycle assessment of municipal wastewater treatment processes regarding energy production from the sludge line. *Energies* 14(2), 356.
- Tariq, A., Mushtaq, A., 2023. Untreated wastewater reasons and causes: A review of most affected areas and cities. *International Journal of Chemical and Biochemical Science* 23, 121-143.
- Teo, C.J., Karkou, E., Vlad, O., Vyrkou, A., Savvakis, N., Arampatzis, G., Angelis-Dimakis, A., 2023. Life cycle environmental impact assessment of slaughterhouse wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design* 200, 550-565.
- Tetteh, E.K., Rathilal, S., 2022. Biophotocatalytic reduction of CO₂ in anaerobic biogas produced from wastewater treatment using an integrated system. *Catalysts* 12(1), 76.
- Thanigaivel, S., 2023. Ecological disturbances and abundance of anthropogenic pollutants in the aquatic ecosystem: Critical review of impact assessment on the aquatic animals. *Chemosphere* 313, 137475.