University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Survey the environmental impact of cement production using life cycle assessment

Najmeh Sargolzaee[1] | Fatemeh Einollahipeer[2]✉ | Ali Kazemi[3] | Narjes Okati[4]

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: najmeh.s.environment@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: fatemeheinollahi@uoz.ac.ir
3. Department Environmental Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail: kazemi64@araku.ac.ir
4. Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: narjesokati@uoz.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 09 December 2022

Received in revised form 07 February 2023

Accepted 05 March 2022

Published online 23 September 2023

Keywords:

Cement industry,

Fossil fuel,

Life cycle assessment,

SimaPro.

ABSTRACT

The cement industry despite its positive economic and social effects, is facing important challenges regarding the reduction of raw materials and energy demands, and CO_2 emissions. It should be noted the production of materials without considering the elements of the environment, is not consistent with the attitude of sustainable development. Although many advances have been reached in the last decades through technology improvements, the use of alternative materials and fuels still can be further explored. The Zabol cement industry is considered economically efficient. Nevertheless, there are no scientific studies regarding environmental concerns in. The life cycle assessment (LCA) is a comprehensive tool for collecting and analyzing the potential environmental inpute, and consequence of producing a product or commodity. This study aims to assess the environmental impacts of gray cement production in Sistan cement factory using Life Cycle Assessment (LCA). The analysis and evaluation of environmental impact of cement was done using SimapRo software (version 9) and Ecoinvent database (version 3.4) based on ISO 14040 and ISO 14044 standards. The 18 midpoint and 3 endpoint impact categories have been determined by using ReCiPe midpoint H and ReCiPe endpoint H respectively. Emissions, heavy fuel oil, pozzolan and electricity have the highest contribution to most of the surveyed impact categories. The sensitivity analysis also indicated the influence of the mentioned cases on the results. Thus, with a 20% reduction in pozzolan, heavy fuel oil and electricity consumption could reduce the destruction of fossil resource scarcity, global warming and human and ecosystem toxicity. The total endpoint score was 27 Pt, mainly associated to the human health damage category. The most important factor affecting the mentioned result was related to the formation of suspended particles less than 2.5 micrometers. The cumulative energy demand assessment indicated fossil fuels had the highest consumption with 97.89% and other sources has the least energy participation. The results illustrated replacement of fossil fuels by alternative fuels can be an option to decrease impacts regarding fossil fuels consumption and atmospheric emissions from the cement production process.

Cite this article: Sargolzaee, N., Einollahipeer, F., Kazemi, A., & Okati, N. (2023). Survey the environmental impact of cement production using life cycle assessment. *Journal of Natural Environment*, 76 (3), 511-525. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2023.352277.2504

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2023.352277.2504

محیط زیست طبیعی
شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳
Homepage: https://jne.ut.ac.ir/
انتشارات دانشگاه تهران

بررسی پیامدهای محیطزیستی تولید سیمان با استفاده از ارزیابی چرخهٔ حیات

نجمه سرگلزائی[۱] | فاطمه عین الهی‌پیر[۲]✉ | علی کاظمی[۳] | نرجس اکاتی[۴]

۱. گروه محیطزیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: najmeh.s.environment@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه محیطزیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: fatemeheinollahi@uoz.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی محیطزیست، دانشکدهٔ کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک. اراک، ایران. رایانامه: kazemi64@araku.ac.ir
۴. گروه محیطزیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: narjesokati@uoz.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
ارزیابی چرخهٔ حیات،
سوخت‌های فسیلی،
سیماپرو،
صنعت سیمان.

چکیده

صنعت تولید سیمان، علی‌رغم اثرات مثبت اقتصادی و اجتماعی، به‌دلیل مصرف منابع اولیهٔ طبیعی، مصرف انرژی و تولید دی‌اکسیدکربن می‌تواند پیامدهای محیطزیستی به‌همراه داشته باشد. لازم به ذکر است که تولید مواد، بدون در نظر گرفتن پیامدهای محیطی، با نگرش توسعهٔ پایدار سازگار نیست. اگرچه پیشرفت‌های زیادی در دهه‌های گذشته از طریق توسعهٔ فناوری حاصل شده است، اما بررسی‌های لازم در خصوص مواد و سوخت‌های جایگزین نیز بایستی مدنظر قرار گیرد. صنعت سیمان زابل، از نظر اقتصادی کارآمد محسوب می‌شود. در عین حال، اطلاعاتی در خصوص پیامدهای محیطی آن موجود نیست. ارزیابی چرخهٔ حیات، روشی جامع برای جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل ورودی‌های بالقوهٔ محیطی و پیامدهای تولید یک محصول یا کالا است. این مطالعه با هدف ارزیابی اثرات محیط-زیستی تولید سیمان خاکستری در کارخانهٔ سیمان سیستان با استفاده از ارزیابی چرخهٔ حیات انجام شد. تجزیه و تحلیل و ارزیابی پیامدهای محیطزیستی این محصول، با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو (نسخه ۹) و پایگاه دادهٔ اکواینونت (نسخه ۳،۴) براساس استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ایزو ۱۴۰۴۴ انجام گردید. ۱۸ پیامد میانی با استفاده از شاخص ReCiPe 2016 midpoint H و ۳ دسته پیامد پایانی نیز با استفاده از شاخص ReCiPe 2016 endpoint تعیین گردید. نتایج نشان داد که در بیشتر پیامدهای مورد بررسی، انتشارات مستقیم کارخانه، مصرف سوخت مازوت، پوزولان و برق، بالاترین سهم را دارند. آنالیز حساسیت نیز حاکی از تأثیرگذاری هر یک از موارد مذکور بر پیامدها بود. بدین‌ترتیب که کاهش ۲۰٪ از میزان پوزولان، مازوت و برق، می‌تواند موجب کاهش میزان پیامدها از قبیل تخریب منابع فسیلی، گرمایش جهانی و سمیت انسانی و اکوسیستمی گردد. میزان پیامدهای پایانی pT ۲۷ به‌ویژه برای سلامت انسان با میزان ۹۷/۲٪ به‌دست آمد. مهم‌ترین عامل مؤثر بر پیامد مذکور، مربوط به تشکیل ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرومتر بود. نتایج حاصل از انرژی‌خواهی تجمعی نیز نشان داد، سوخت‌های فسیلی با ۹۷/۸۹٪ بالاترین میزان مصرف را داشته و سهم سایر منابع ناچیز بود. به‌طور کلی نتیجهٔ تحقیق حاضر نشان داد که استفاده از سوخت‌های پاک، می‌تواند موجب کاهش اثرات مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشارات جوی ناشی از فرآیند تولید سیمان شود.

استناد: سرگلزائی، نجمه؛ عین الهی‌پیر، فاطمه؛ کاظمی، علی؛ و اکاتی، نرجس (۱۴۰۲). بررسی پیامدهای محیطزیستی تولید سیمان با استفاده از ارزیابی چرخهٔ حیات. *محیط زیست طبیعی*، ۷۶ (۳)، ۵۲۵-۵۱۱.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2023.352277.2504

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

مقدمه

توسعهٔ از یک‌جهت با تکنولوژی و صنعت و از جهتی دیگر با تخریب و آلودگی محیط‌زیست مرتبط است. صنعت تولید سیمان یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین صنایع در سطح جهان بوده و محصولات آن به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، کاربرد گسترده‌ای دارد (Patnaik, 2018; Thwe *et al*., 2021). این صنعت در کشور ما نیز یکی از مهم‌ترین صنایع استراتژیک محسوب می‌شود. چراکه معمولاً با اشتغال‌زایی و جنبه‌های مؤثر اقتصادی همراه است. اما تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که همگام با منافع اقتصادی و اجتماعی، آسیب‌های محیط‌زیستی محلی، ملی و بین‌المللی ناشی از صنعت تولید سیمان، اجتناب‌ناپذیر است (Mhthu and Santhanam, 2018; Poudyal and Adhikari, 2021). زیرا این صنعت پس از بخش‌های خانگی، تجاری و حمل و نقل یکی از پرمصرف‌ترین صنایع مصرف‌کننده آب و انرژی محسوب می‌شود. به‌طوری‌که حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد از مصرف انرژی و سوخت-های فسیلی را به‌خود اختصاص داده است. مصرف سوخت‌های فسیلی در طی فرآیند تولید سیمان، به‌منظور تأمین انرژی مورد نیاز، علاوه بر هزینه بر شدن تولید، منجر به ایجاد آلاینده‌های مختلف می‌شود (Garcı´a-Gusano *et al*., 2015; Xi *et al*., 2016; Thwe *et al*., 2021).

مهم‌ترین نگرانی‌های مربوط به صنعت تولید سیمان، ایجاد آلودگی‌های مختلف از قبیل افزایش غلظت فلزات سنگین، انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش کیفیت هوا از طریق انتشار انواع گازهای مختلف مانند منوکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید سولفور، انتشار ذرات معلق، اسیدی شدن و اختناق منابع آبی، از دست‌رفتن منابع‌طبیعی و به‌ویژه تهدید اکوسیستم‌های شکننده است (Nigri *et al*., 2010; Gursel *et al*., 2014; Kim *et al*., 2019). در سال‌های اخیر همچنین با توجه به اهمیت یافتن مسألهٔ تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، به تأثیر انتشار کربن از صنایع مختلف بر این پدیده، توجه بیشتری شده است. صنعت سیمان به‌تنهایی ۵٪ از کل CO_2 تولیدی را منتشر کرده که حدود ۵۰ درصد این تولید تنها مربوط به بخش کلسیناسیون در مرحلهٔ تبدیل کلینکر است (WBCSD, 2019). بنابراین می‌تواند نقش مؤثری در پدیدهٔ گرمایش جهانی نیز داشته باشد (Thwe *et al*., 2021). بر این اساس، جزء صنایع چالش‌برانگیز محسوب شده و یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های محیط‌زیستی ارزیابی پیامدهای بالقوهٔ این صنعت می‌باشد.

در بیشتر روش‌های بررسی وضعیت صنایع، محصولات یا خدمات به‌صورت تک‌بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد که برای مدیریت و یا حتی تعیین وضع موجود نمی‌تواند اطلاعات کافی از نظر محیط‌زیستی را فراهم سازد. بنابراین بایستی رویکردهای تک‌بعدی به دیدگاهی جامع‌نگر تبدیل شود تا بتواند پیامدهای محیط‌زیستی را ارزیابی نماید و اطلاعات مناسب و دقیق‌تری را برای تصمیم‌گیران فراهم سازد. ارزیابی چرخهٔ حیات یا LCA[1] در حال حاضر یکی از مؤثرترین روش‌های ارزیابی همه‌جانبهٔ یک فرآیند محسوب می‌شود. ارزیابی چرخهٔ حیات با ارزیابی و کمی‌سازی مواد و انرژی مصرف‌شده، ضایعات تولیدی و درنهایت برهم‌کنش میان آن‌ها، قادر است اثرات آن را بر جنبه‌های مختلف محیط‌زیست برآورد کند (Kazemi *et al*., 2018; Katsuyuki, 2020; Bahramian and Yetilmezsoy, 2020; Parisi *et al*., 2020). از مهم‌ترین دلایل مؤثر بر این روش در مقایسه با روش‌های معمول تک‌بعدی، این است که تنها بر گازها و مواد منتشره و یا ضایعات تولیدشده در محل و مرز فیزیکی صنعت تمرکز نداشته، بلکه گستردگی مرزهای سیستم در برگیرندهٔ تمام آسیب‌ها و پیامدهای محیط‌زیستی در طول چرخهٔ حیات یک محصول و یا انجام یک خدمت بوده و مؤثر بودن این روش به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای ارزیابی محیط‌زیستی فرآیندهای مختلف به اثبات رسیده است (Wang *et al*., 2018; Li *et al*., 2020; Sadeghi *et al*., 2020). بنابراین از آنجا که در طی فرآیند ارزیابی چرخهٔ حیات، تمامی عملکرد سیستم بررسی شده و بدون تمرکز بر یک شاخص، طیفی از پیامدها را بررسی می‌نماید، برای مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی محصولات و فرآیندهای شیمیایی ابزاری مفید محسوب می‌شود (Wang *et al*., 2018; Thwe *et al*., 2019).

از مهم‌ترین بخش‌های ارزیابی چرخهٔ حیات، تهیهٔ LCI[2] است که در آن میزان مواد ورودی، ضایعات تولیدی، ترکیبات منتشره و انرژی مورد نیاز سیاهه‌برداری می‌شود (Josa *et al*., 2007). به‌طور کلی، سیاهه، شامل مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی ماده و انرژی در فرآیند بوده که براساس آن‌ها ارزیابی پیامدهای محیطی انجام می‌شود (Kazemi *et al*., 2018). با انجام ارزیابی

[1] Life Cycle Assessment

[2] Life cycle inventory

چرخهٔ حیات یک صنعت، اولویت‌بندی مسائل محیط‌زیستی به‌صورت اقتصادی‌تر قابل انجام بوده و از طرف دیگر، با یکپارچه نمودن بخش‌های مختلف فرآیندی و غیرفرآیندی (تحقیق، خدمات، توسعه، بازاریابی و غیره) می‌تواند در حل سؤالاتی مانند میزان مصرف آب، ایجاد آلودگی‌های محیط‌زیست، تولید گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی و سهم هر واحد فرآیندی در یک صنعت، مؤثر باشد (Korouzhdeh *et al*., 2021).

کارخانهٔ سیمان سیستان با هدف تولید کلینکر و سیمان پرتلند و پوزولانی در سال ۱۳۸۹ به بهره‌برداری رسید. این کارخانه در مسیر جادهٔ زابل به زاهدان به‌منظور ایجاد اشتغال، بهره‌گیری از ظرفیت‌های انسانی، معدنی و طبیعی استان و تولید سیمان مورد نیاز منطقه و حتی ایجاد بستری مناسب جهت صادرات محصولات آن احداث گردیده است. این امر به‌ویژه به‌دلیل دسترسی به منابع و معادن مرغوب در منطقه و کمک به بهبود تولید و رشد اقتصادی، صنعتی و اجتماعی بوده است. با این وجود، به‌دلیل اهمیت اثرات این صنعت بر محیط‌زیست از منظر مصرف منابع و انرژی و همچنین تولید و انتشارات انواع آلاینده‌ها، پایش این صنعت ضروری به‌نظر می‌رسید. بنابراین در تحقیق حاضر، وضعیت سیمان خاکستری تولیدی کارخانهٔ سیمان سیستان از نظر محیط‌زیستی به کمک روش ارزیابی چرخهٔ حیات بررسی شد.

روش‌شناسی پژوهش

کارخانهٔ سیمان سیستان، در استان سیستان و بلوچستان و در جنوب شرق ایران در موقعیت جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۷۳ دقیقه طول شرقی واقع شده و شکل ۱ موقعیت جغرافیایی کارخانه را نشان می‌دهد. این کارخانه با تولید انواع سیمان به ظرفیت ۳۳۰۰ تن کلینکر در روز در حال بهره‌برداری می‌باشد. در پژوهش حاضر، به ارزیابی چرخهٔ حیات محصول سیمان خاکستری کارخانه سیمان سیستان طی چهار مرحله براساس استانداردهای ۱۴۰۴۰، ۲۰۰۶ ISO پرداخته شد (ISO 2004). اولین مرحله شامل تعریف دامنه و هدف بود. در مرحلهٔ دوم، اطلاعات مورد نیاز جهت تجزیه و تحلیل، جمع‌آوری گردید. مرحلهٔ سوم نیز، چرخهٔ حیات سیمان خاکستری تولیدی کارخانه براساس واحد عملکردی، مورد ارزیابی قرار گرفت و در فاز چهارم تجزیه و تحلیل و تفسیر نتایج از جمله آنالیز حساسیت انجام شد.

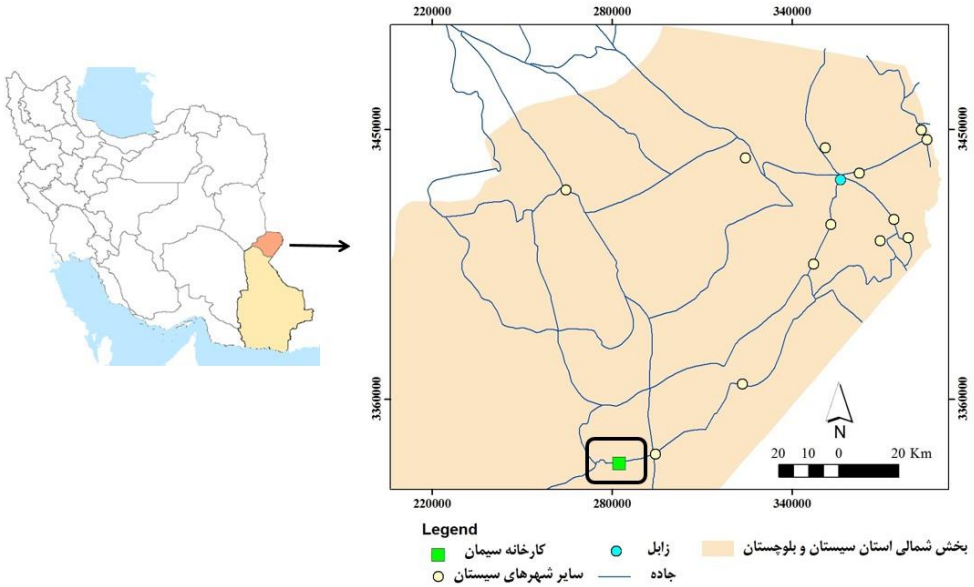
تعریف دامنه و هدف: جهت تولید سیمان خاکستری در کارخانهٔ سیمان سیستان، از مارل، سنگ آهک و سنگ آهن از نوع هماتیت استفاده می‌شود. از دیگر مواد اولیه برای تولید سیمان، آلوویوم[3] است که حاوی اکسیدسیلیس و اکسیدآلومنیوم است. این مادهٔ معدنی، با دارا بودن ۴۵٪ سیلیس، منبع تأمین‌کنندهٔ سیلیس سیمان محسوب می‌شود. معدن آلوویوم کارخانه سیمان زابل، معدن آهک و سیلیسی است که در نواحی شمالی، مرکزی و جنوبی کارخانه قرار دارد. پس از انجام عملیات آتشباری در معادن و تأمین مواد اولیه، مواد توسط سنگ‌شکن، خردایش و در سالن اختلاط ذخیره می‌شود. سپس مواد در سالن اختلاط وارد سیلو شده و پس از افزودن هماتیت و سنگ آهک وارد آسیاب غلطکی شده و پس از خردایش به سیلوی هموژناسیون منتقل و سپس وارد پیش گرمکن می‌شود. پس از انجام عمل کلسیناسیون جهت عملیات پخت، وارد کوره دوار شده و در حرارت موجود در کوره، واکنش‌های شیمیایی مربوط به تشکیل فازها انجام و کلینکر تشکیل می‌شود. دمای کلینکر داغ توسط خنک‌کن کاهش یافته و سپس وارد سیلوی کلینکر شده و پس از آن موادی نظیر سنگ گچ، پوزولان و سنگ آهک به آن اضافه و وارد آسیاب گلوله‌ای می‌شود. سپس سیمان خاکستری تولید شده در سیلوهای سیمان ذخیره و به‌صورت فله و پاکتی از طریق بارگیرخانه تحویل مشتری می‌شود. بیشترین عملیات تولید سیمان مربوط به بخش تولید کلینکر است. به‌طوری‌که بیشترین مصرف سوخت فسیلی و برق صرف تولید کلینکر می‌شود. بر این اساس، هدف این مطالعه، ارزیابی پیامدهای تولید سیمان خاکستری در کارخانهٔ سیمان سیستان و تعیین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار به‌منظور کاهش اثرات آن بود. دامنهٔ تحقیق یا مرز سیستم نیز از ورود مواد اولیه به کارخانه تا خروج محصول از کارخانه در نظر گرفته شد.

سیاهه موجودی: از آنجا که هدف تعیین وضعیت محصول سیمان خاکستری کارخانه بود، واحد عملکردی یک تن سیمان تولیدی در نظر گرفته شد (Kazemi *et al*., 2018). در این مرحله، انرژی و مواد اولیهٔ مصرفی، میزان انتشار به خاک و هوا و پسماندهای

[3] Alluvium

جدول ۱. سیاههٔ ارزیابی چرخهٔ حیات جهت تولید یک تن سیمان خاکستری (دفتر کارخانه)

ورودی‌ها			خروجی‌ها		
نوع	واحد	میزان	انتشار به خاک	واحد	میزان
برق	کیلووات ساعت	۹۰/۷۲	کلر آزاد	کیلوگرم	۰/۰۰۰۱۲
سنگ آهک	تن	۰/۸۷	نیترات	کیلوگرم	۰/۰۰۳۷
آلوویوم	تن	۰/۱۸	فسفات	کیلوگرم	۰/۰۱۶
سنگ آهن	تن	۰/۰۲	شوینده	کیلوگرم	۰/۰۰۰۴
سنگ گچ	تن	۰/۰۵	انتشار به هوا	واحد	میزان
پوزولان	تن	۰/۰۸	آمونیوم	کیلوگرم	۰/۰۰۰۵۲
آب مصرفی	مترمکعب	۰/۶	CO_2	تن	۰/۰۲۹
گازوییل	لیتر	۱/۲۲۰	CO	تن	۰/۰۰۰۳۳
مازوت	کیلوگرم	۶۶/۰۹	NO_2	تن	۰/۰۰۰۰۴۳
روغن	لیتر	۰/۰۱۹	NO	تن	۰/۰۰۰۰۳۶
			N_2O	تن	۰/۰۰۰۰۴۳
			ذرات معلق کوچک تر از ۲/۵ میکرومتر	کیلوگرم	۰/۰۱۴



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کارخانهٔ سیمان سیستان

جامد تولید شده توسط سیستم برای کل چرخهٔ حیات محصول برای یک سال و براساس مرز سیستم، از دفتر کارخانهٔ سیمان سیستان تهیه گردید سپس ورودی و خروجی برای یک تن سیمان محاسبه شد (جدول ۱).

برآورد اثرات: اثرات محیطی سیمان تولیدی در کارخانهٔ سیمان سیستان، با استفاده از ارزیابی چرخهٔ حیات براساس استاندارد ISO 14040/14044 انجام شد (Finkbeiner *et al*., 2006; Kazemi *et al*., 2018). در این تحقیق از نرم‌افزار سیماپرو نسخهٔ ۹ استفاده شد. جهت مدیریت و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز، از پایگاه‌های داده Ecoinvent ۳،۴ موجود در نرم‌افزار استفاده گردید. برای برق مصرفی، داده‌های ایران از پایگاه دادهٔ آمار و ترازنامه انرژی جهانی (OECD) انتخاب شد (International Energy Agency, 2019). برای مواد و ترکیبات شیمیایی نیز، با توجه به نبود پایگاه دادهٔ محلی، مرتبط‌ترین فرآیند برای سایر نقاط جهان (ROW[۴]) سیستم APOS انتخاب گردید (Fayyaz *et al*., 2023). با توجه به اینکه روش LCIA در دو بخش میانی و پایانی قابل دسته‌بندی و بررسی است، در تحقیق حاضر پیامدهای محیط‌زیستی در ۱۸ گروه پیامد در سطح میانی[۵] و سپس ۳ دسته پیامد

[4]Rest of Word
[5]Midpoint

در سطح پایانی[۶] بررسی شد. اثرات میانی فرآیند تولید سیمان به کمک روش ReciPe 2016 midpoint H به‌دست آمد (Huijbregts *et al*., 2017; Artaze *et al*., 2019). جهت بررسی اثرات پایانی و فراهم‌سازی دید کلی پیامدهای تولید سیمان خاکستری نیز، از روش ReciPe 2016 endpoin H استفاده شد. به‌منظور محاسبهٔ میزان مصرف انرژی در طول چرخهٔ حیات محصول سیمان نیز روش CED [۷] بکار رفت (Scipioni *et al*., 2013; Piotrowska *et al*., 2019).

یافته‌های پژوهش و بحث

پیامدهای میانی محیط‌زیستی: نتایج حاصل از ReCiPe midpoint برای ۱۸ پیامد محیط‌زیستی در جدول ۲ ارائه شده است. در بین پیامدهای مورد بررسی، برخی از پیامدها از قبیل میزان گرمایش جهانی ناشی از تولید سیمان خاکستری $kg\ CO_2\ eq$ [a] ۵۵۴، سمیت اکوسیستم‌های خشکی $kg\ C_2H_4$ [۸]eq ۲۳۸/۷۰، تخلیهٔ منابع فسیلی ۹۸/۸ kg oil eq، تخریب منابع معدنی kg Cu eq ۳/۴۲، سمیت غیرسرطانی انسانی kg 1,4-DCB ۳۶/۶۱ و تشکیل ذرات ریز kg PM2.5 eq ۱/۶۴ به‌دست آمد. انتشارات مستقیم کارخانه، سپس برق مصرفی، مازوت و پوزولان، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بیشتر پیامدهای مورد بررسی بودند (شکل ۲). در بین پیامدهای محیط‌زیستی، عوامل و فرآیندهای مؤثر بر گرمایش جهانی، تخریب منابع فسیلی، سمیت غیر انسانی و سمیت اکوسیستمی با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت. بدین‌ترتیب، دی‌اکسیدکربن حاصل از سوخت‌های فسیلی با مقدار مشارکت ۷۵/۰۸٪، بیشترین سهم را در فرآیند گرمایش جهانی داشت که ناشی از انتشارات مستقیم (۷۵/۵۲٪) و سپس برق مصرفی (۱۰/۴۹٪) بود (شکل ۳). از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر گرمایش جهانی، افزایش گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن بوده که بیشتر از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی در صنایع مختلف به محیط وارد می‌شوند. ۸۸٪ از میزان کل برق در ایران نیز، از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود، که ۷۳٪ آن از طریق گازهای طبیعی به‌دست می‌آید (International Energy Agency, 2019). از آنجا که، سوخت‌های فسیلی شامل هیدروژن و کربن هستند، سوزاندن آن‌ها مقدار زیادی دی‌اکسیدکربن به هوا آزاد می‌کند. هنگامی که درصد دی‌اکسیدکربن در هوا به‌مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد، مقدار گرمای جذب‌شده توسط این گاز نیز افزایش پیدا می‌کند که به نوبهٔ خود سبب افزایش کلی دمای سطح زمین و پدیدهٔ گرمایش جهانی می‌شود (He *et al*., 2019; Adjei and Elkatatny, 2020). از طرفی دیگر، در فرآیند تولید سیمان سیستان بخش عظیمی از انرژی مصرفی به‌صورت مستقیم در بخش مصرف مازوت و غیر مستقیم در مصرف برق و مربوط به بخش تولید کلینکر بوده که می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر افزایش دی‌اکسیدکربن داشته باشد. نتایج تحقیق حاضر، با نتایج تحقیق Josa و همکاران (۲۰۰۷) که به‌منظور ارزیابی چرخه حیات محصول سیمان انجام شد، مطابقت داشت. نتایج این محققین نشان داد که شدت اثرات محیط‌زیستی فرآیند تولید سیمان، ارتباط مستقیمی به میزان کلینکر تولیدی دارد. در تحقیقی که توسط Mbohwa و Moyo (۲۰۰۸) انجام شد، صنعت سیمان کشور زیمبابوه، به روش ارزیابی چرخهٔ حیات مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه میزان انتشار گازهای دی‌اکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، اکسیدهای نیتروژن و ضایعات جامد جهت بررسی اثرات مخرب محیط‌زیستی شامل تغییرات اقلیم، گرمایش جهانی، مسمویت اکوسیستمی و انسانی محاسبه و تجزیه و تحلیل شد و نتایج مشابهی به‌دست آمد. همچنین Thwe و همکاران (۲۰۱۹) سیمان خاکستری تولیدی کارخانه سیمان نایپایتا[۹] در میانمار را بررسی کردند. در این تحقیق نشان داد اثرات مخرب محیط‌زیستی صنعت سیمان شامل تغییر اقلیم، اسیدی شدن و اختناق محیط‌های آبی مربوط به فرآیند کلسیناسیون بخش تولید کلینکر است. در این تحقیق با تعریف سناریوی جایگزین کردن مصرف گاز طبیعی به‌جای زغال سنگ، میزان اثرات تغییر اقلیم، پتانسیل اسیدی و اختناق محیط‌های آبی به‌ترتیب به میزان ۶۸، ۸۳ و ۹۶٪ کاهش یافت. شکل ۴ نمودار فرآیندها و مواد مؤثر بر تخلیهٔ منابع فسیلی را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل دسته اثر بر تخلیه منابع فسیلی نشان داد که مواد مؤثر بر تخلیهٔ منابع فسیلی شامل مصرف نفت

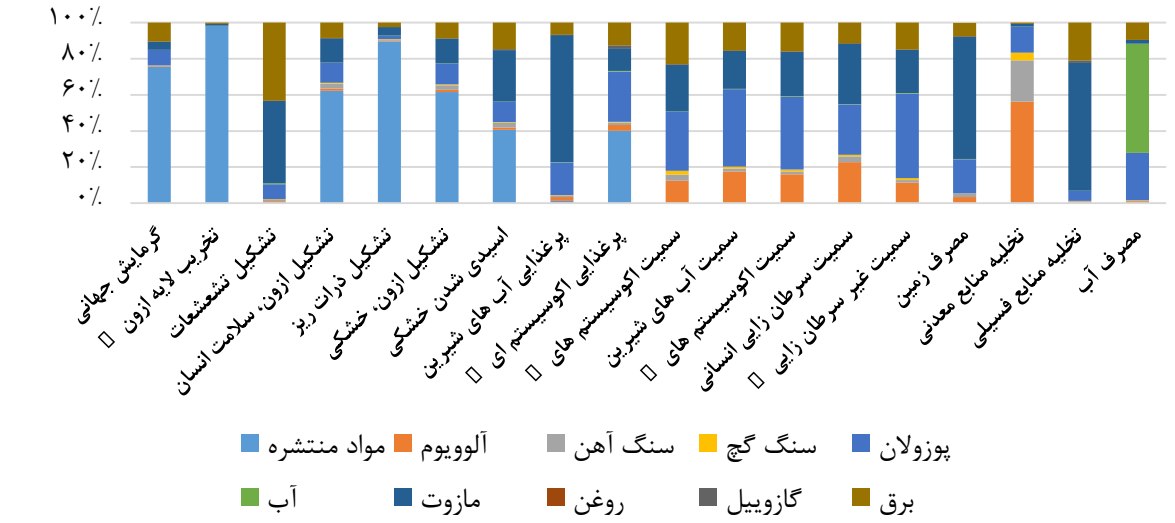
[6] Endpoint
[7] Cumulative energy demand
[8] Ethylene
[9] Naypyitaw

جدول ۲. اثرات محیط‌زیستی تولید یک تن سیمان نتیجهٔ آنالیز حساسیت با ۲۰٪ کاهش

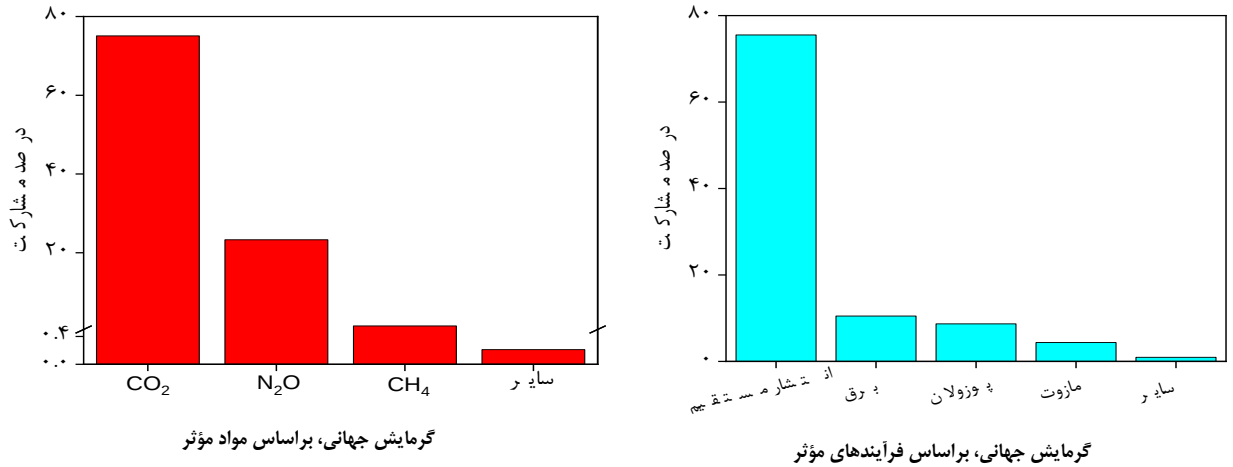
دسته‌بندی اثرات	مقدار	واحد	کارایی ۲۰٪ کاهش برق	کارایی ۲۰٪ کاهش پوزولان	کارایی ۲۰٪ کاهش مازوت
گرمایش جهانی	۵۵۴	kg CO_2 eq [a]	٪۲/۱۰	٪ ۲/۱۰	٪ ۰/۸۷
سمیت اکوسیستم‌های خشکی	۲۳۸/۷۰	kg C_2H_4 [۱]eq	٪۴/۵۹	٪ ۸/۲۵	٪ ۵/۱۸
تخلیهٔ منابع فسیلی	۹۸/۸	kg oil eq	٪۴/۲۰	٪۱/۴۲	٪۱۴/۱۴
سمیت غیرسرطانی انسانی	۳۶/۶۱	kg 1,4-DCB	٪۲/۹۸	٪۱۱/۷۸	٪۴/۸۰
مصرف زمین	۴/۱۸	m2a crop eq	٪۱/۵۰	٪۴/۶۷	٪۳/۶۱
تشکیل تشعشعات	۴/۲	kBq Co-60 eq	٪۲/۶۸	٪۲/۱۰	٪۲/۱۰
تخریب منابع معدنی	۳/۴۲	kg Cu eq	٪۰/۱۱	٪۳/۶۰	٪۰/۲۸
سمیت سرطان‌زایی انسانی	۳/۱۸	kg 1,4-DCB	٪۲/۹۲	٪۶/۹۲	٪۶/۷۳
سمیت محیطی اکوسیستم‌های دریایی	۰/۰۰۵۱۵۱	kg 1,4-DCB eq	٪۳/۱۷	٪۱۰/۱۶	٪۴/۹۲
تشکیل ذرات ریز	۱/۶۴	kg PM2.5 eq	٪۰/۴۷	٪۰/۴۶	٪۰/۹
سمیت اکوسیستم‌های آب شیرین	۰/۰۴۰۶	kg 1,4-DCB eq	٪۳/۱۰	٪۱۰/۹۹	٪۴/۲۰
مصرف آب	۰/۹۹۴	m^3	٪۱/۸۹	٪۶/۵۱	٪۰/۴۲
تشکیل ازون، اکوسیستم‌های خشکی	۰/۹۳۶	kg NOx eq	٪۱/۷۳	٪۲/۹	٪۲/۷۶
تشکیل ازون، سلامت انسان	۰/۹۲۴	kg NOx eq	٪ ۱/۷۰	٪ ۲/۸۴	٪ ۲/۶۴
اسیدی شدن خشکی	۰/۷۵۹	kg SO_2 eq	٪ ۵/۶۷	٪ ۷/۷۵	٪ ۵/۶۷
پرغذایی اکوسیستم آب شیرین	۰/۰۴۰۶	kg PO_4^{3-} eq	٪ ۱/۳۵	٪ ۶/۳۹	٪ ۴/۰۸
تخریب لایه ازون استراتوسفر	۰/۰۰۵	kg CFC[۱]-11 eq	٪۰/۱۰	٪۳/۸۰	٪۰/۲۲
پرغذایی اکوسیستم های دریایی	۰/۰۵۱۵۱	kg N eq	٪۲/۵۲	٪۲۷/۰۴	٪۲/۵۲

خام با ۷۳/۵۵٪ و مصرف گاز طبیعی با ۲۱/۲۶٪ بوده که در فرآیندهای تولید سوخت مازوت (۷۰/۷۱٪) و سپس تولید برق (۲۰/۹۶٪)، مورد مصرف قرار می‌گیرند. منابع سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ بالاترین سهم را در صنایع تولیدی و به‌ویژه تولید برق مصرف جهانی دارد. در نتیجه مصرف این قبیل سوخت‌ها نه تنها منجر به کاهش منابع تجدیدناپذیر می‌شود، بلکه گرمایش جهانی را نیز به‌دنبال خواهد داشت. انواع گازهای تولیدی ناشی از مصرف این سوخت‌ها شامل دی اکسیدکربن، دی اکسید نیتروژن و متان است (Little *et al*., 2021). تولید ترکیبات نفتی مانند مازوت، گازوییل، نفت مایع و بنزین می‌توانند اثرات مخرب محیط‌زیستی و اتمام این منابع را به‌همراه داشته باشند.

نتایج حاصل از بررسی فرآیندها و عوامل مؤثر بر سمیت اکوسیستم خشکی در شکل ۵ ارائه شده است. بر این اساس، مهم‌ترین عامل موثر بر سمیت اکوسیستمی عنصر مس با سهم ۵۰/۱۶٪ به‌دست آمد که ناشی از انتشارات مستقیم کارخانه (۳۲/۶۴٪) و



شکل ۲. نتایج حاصل از ReCiPe midpoint

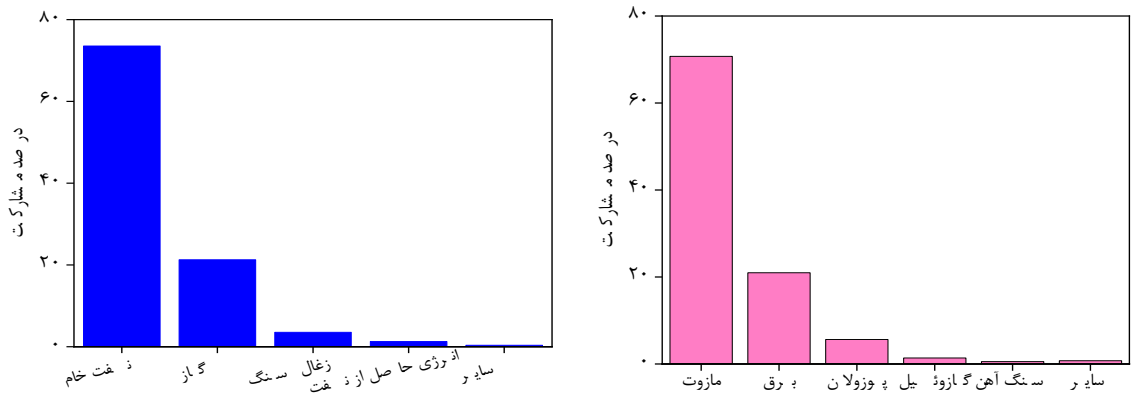


شکل ۳. نمودار فرآیندها و مواد مؤثر بر پیامد گرمایش جهانی

مصرف مازوت (۲۵/۹٪) بود. نهاده‌های مختلفی جهت تولید سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد که در طی فرآیند استحصال و آماده‌سازی قادرند تبعات محیط‌زیستی مختلفی از جمله تولید فلزات سنگین را به‌همراه داشته باشند. بوم‌سازگان‌های خشکی در حین برداشت و استخراج منابع معدنی می‌توانند در معرض آلودگی فلزات سنگین باشند. به‌طوری‌که یکباره بخش عظیمی از عناصر در دسترس محیط قرار می‌گیرند (Sttaford *et al.*, 2016). از جمله این فلزات می‌توان به مس، کروم، نیکل و آهن اشاره کرد. در نتیجه با توجه به وابستگی محصول سیمان به منابع طبیعی، برداشت نهاده‌های اولیه جهت تولید محصول می‌تواند موجب افزایش غلظت این عناصر شود (Yay, 2015; Sttaford *et al.*, 2016).

سمیت انسانی غیرسرطان‌زایی می‌تواند ناشی از مواد منتشره حاصل از تک تک مراحل تولید نهاده‌های اولیه و همچنین فرآیند تولید محصول باشد (Westh *et al.*, 2015). به‌طوری‌که نتایج حاصل از بررسی فرآیندها و عوامل مؤثر (شکل ۶) نشان داد که عنصر مس حاصل از فراآیند برداشت با سهم ۴۳/۹٪ و طی فرآیند پوزولان با سهم ۳۷/۹٪، به‌عنوان نهادهٔ مصرفی تولید سیمان، بالاترین اثر ممکن بر ایجاد سمیت انسانی غیرسرطان‌زایی را دارد.

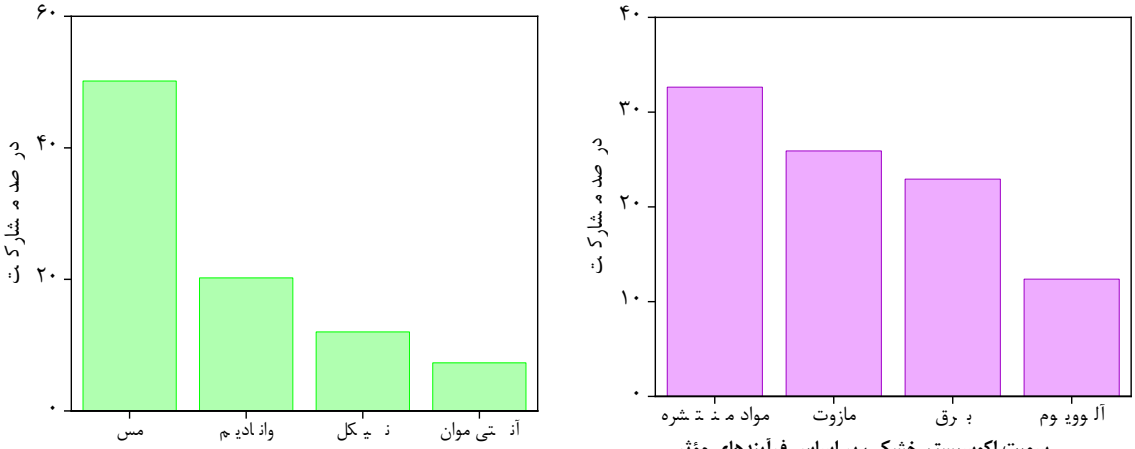
پیامدهای پایانی محیط‌زیستی: مطالعات مختلف نشان می‌دهند که تفسیر نتایج میانی دشوارتر بوده و نتایج پایانی نیز تا حدودی از عدم اطمینان بیشتری برخوردار هستند، اما نتایج پایانی قابلیت درک و تفسیر بهتری دارند (Ahmadi and Borna, 2015; Nijam *et al.*, 2022). درنتیجه با درنظر گرفتن مجموع نتایج حاصل از هر دو بخش، اطلاعات مفید و جامعی در مطالعهٔ ارزیابی



تخلیهٔ منابع فسیلی، براساس فرآیندهای مؤثر

تخلیهٔ منابع فسیلی، براساس مواد مؤثر

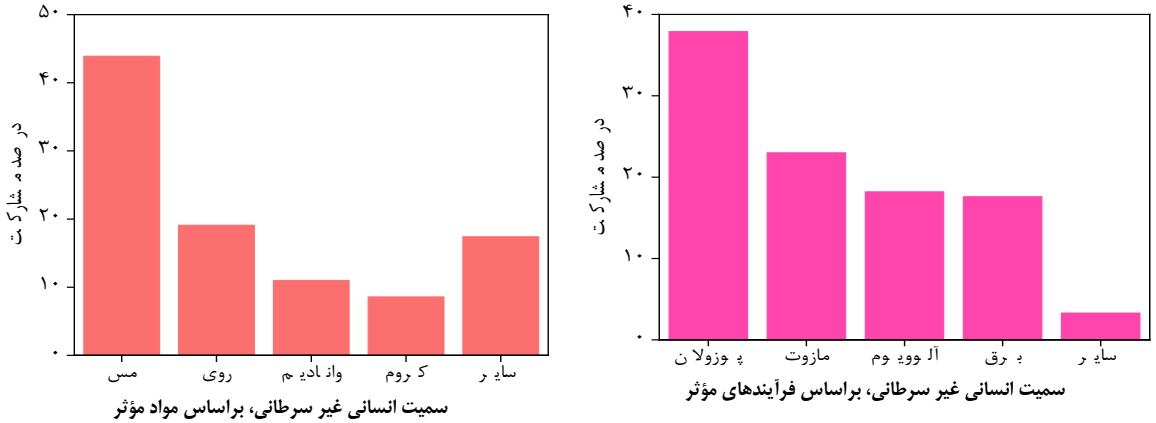
شکل ٤- نمودار فرآیندها و مواد مؤثر بر پیامد تخلیه منابع فسیلی



سمیت اکوسیستم خشکی، بر اساس فرآیندهای مؤثر

سمیت اکوسیستم خشکی، براساس مواد مؤثر

شکل ۵. نمودار فرآیندها و مواد مؤثر بر پیامد سمیت اکوسیستم خشکی



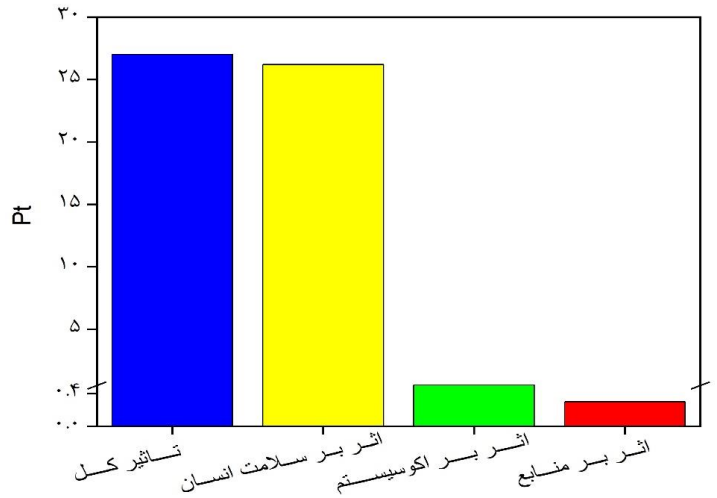
سمیت انسانی غیر سرطانی، براساس فرآیندهای مؤثر

سمیت انسانی غیر سرطانی، براساس مواد مؤثر

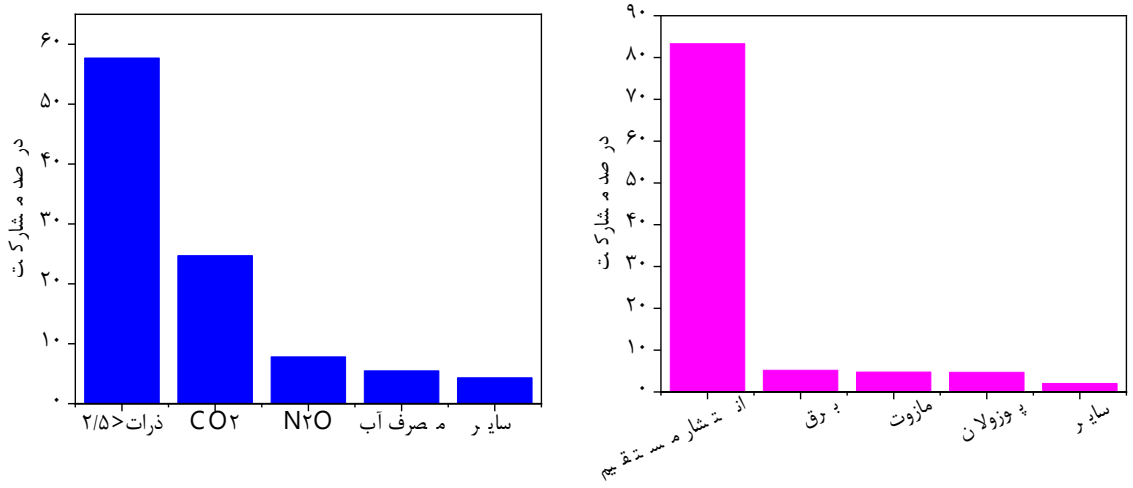
شکل ٦. نمودار فرآیندها و عوامل مؤثر بر سمیت انسانی غیر سرطانی

اثرات، سودمند خواهند بود. جهت افزایش قابلیت مقایسهٔ نتایج، ارزیابی اثرات پایانی فرآیند تولید سیمان خاکستری با سه رویکرد اثر بر سلامت انسانی، اکوسیستمی و منابع توسط ReCiPe endpoint بررسی شد. اثرات پایانی محصول سیمان در آسیب به سلامت انسان با مقدار ۰/۰۰۱۴ DALY[10]، اثر بر منابع با مقدار $1/91\times10^{-6}$ species.yr و اثر بر اکوسیستم با مقدار USD3013 ۲۴/۴ به‌دست آمد. با وزن‌دهی هر یک از شاخص‌ها، اثر بر سلامتی انسان، اکوسیستم و منابع، به‌ترتیب pT ۲۶/۲، ۰/۵۲ و ۰/۳۰

[10]Disability Adjusted Life Years



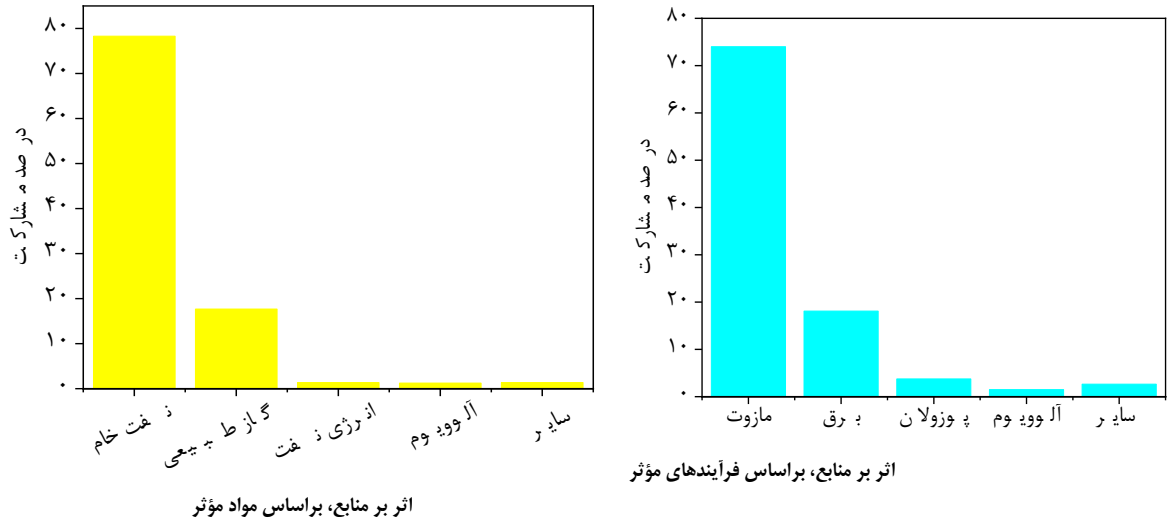
شکل ۷. نتایج حاصل از آزمون Endpoint



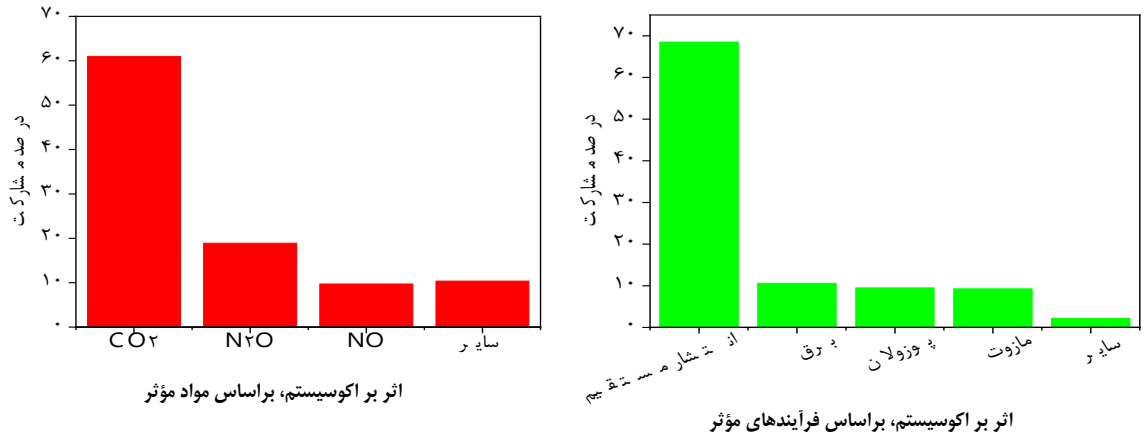
اثر بر سلامت انسانی، براساس عوامل مؤثر | **اثر بر سلامت انسانی، براساس فرآیندهای مؤثر**

شکل ۸. فرآیندها و مواد مؤثر بر سلامت انسانی

به‌دست آمد. درنتیجه، تولید سیمان خاکستری بیشترین تأثیر را بر سلامت انسان با میزان ۹۷/۲٪ دارد (شکل ۷). با بررسی عوامل و فرآیندهای مؤثر بر آسیب بر سلامت انسانی تشکیل ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرومتر در طی فرآیند تولید سیمان مهم‌ترین عامل تعیین شد (شکل ۸). ذرات معلق طی فرآیند تولید سیمان توسط میکروفیلترهای دودکش کارخانه به دام افتاده و از ورود آن‌ها به محیط جلوگیری می‌شود. در عین حال، مقدار ۱۳۰ میلی‌گرم بر ساعت خروجی ذرات ریز از دودکش بوده که توسط این میکروفیلترها جذب نمی‌شوند. بنابراین نتیجهٔ حاضر، با اطلاعات دریافتی از کارخانه مطابقت دارد. این ذرات به‌دلیل ورود مستقیم به سیستم تنفسی و به‌صورت غیر مستقیم از طریق اتصال به انواع آلاینده‌ها، قادرند سلامت انسان را به‌خطر بیاندازند (Thae *et al.*, 2021). در نتیجه بایستی به این فاکتور مؤثر توجه ویژه‌ای صورت گیرد. گازهای تولیدی نیتروژنه، گوگردی و دی‌اکسیدکربن نیز به‌دلیل واکنش با ازون در طی فرآیندهای فتوشیمیایی آلاینده‌های خطرناکی را ایجاد خواهند کرد (Camargo and Lambordi, 2018). بنابراین کاهش این قبیل گازهای منتشره از طریق جایگزین کردن روش‌ها و مواد کم‌خطرتر سبب کاهش اثرات مخرب سلامت انسان می‌شوند. با بررسی آسیب به منابع نیز مصرف سوخت‌های فسیلی مهم‌ترین عامل مؤثر بر تخریب منابع شناخته شد (شکل ۹). در سمیت اکوسیستمی نیز دی‌اکسید کربن تولید شده طی فرآیند تولید سیمان مهم‌ترین عامل مؤثر بر سلامت اکوسیستم بوده است (شکل ۱۰). در این راستا، با ایجاد ارتباط بین اثرات میانی و پایانی می‌توان دریافت که اثرات ایجاد شده مثل ازون تشکیلی و گرمایش جهانی و در نهایت اثرات اکوسیستمی و انسانی مرتبط هستند که بر این اساس نتایج به‌دست



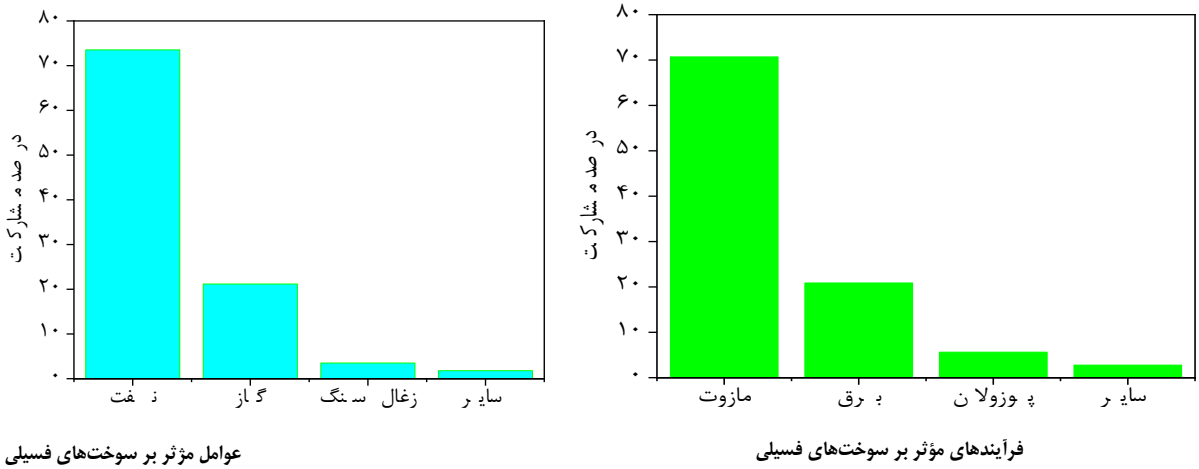
شکل ۹. فرآیندها و مواد مؤثر بر منابع



شکل ۱۰. فرآیندها و عوامل مؤثر بر اکوسیستم

آمده با یکدیگر همخوانی داشته و می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند تولید سیمان نه‌تنها موجب ایجاد پیامدهای محیط‌زیستی می‌شوند، بلکه از طریق از دست رفتن منابع سوختی و همچنین تولید ذرات معلق، قادر است منابع طبیعی و سلامتی انسان را نیز تحت تأثیر منفی خود قرار دهد (Bajpai *et al.*, 2020). در تحقیقی که توسط Robati و همکاران (۲۰۲۰) انجام گردید، بیشتر از جنبهٔ کاربرد خدمات اکوسیستمی در ارزیابی چرخهٔ حیات کارخانهٔ سیمان فراز فیروزکوه یعنی TES-LCA طی ۴ سناریو پرداخته شد. در این مطالعه مشخص شد که اثرات غیرسرطان‌زایی و مسمومیت انسانی از جمله اثرات بررسی انسانی آن بود. Zinatizadeh نیز (۲۰۱۴) در رابطه با ارزیابی محیط‌زیستی، اثرات محیط‌زیستی طرح توسعهٔ کارخانه سیمان بیجار نشان داد که با توجه به نسبت پایین اثرات مثبت به منفی، اجرای طرح، مشروط به رعایت موازین محیط‌زیستی است. در تحقیقی که توسط Imani و همکاران (۲۰۱۹) انجام شد، بیشترین اثر منفی کارخانهٔ سیمان یاسوج مربوط به کیفیت هوا، ایجاد فرسایش خاک، کاهش کیفیت محصولات کشاورزی بود. اما آثار مثبت بلند مدت این کارخانه نیز افزایش رضایت مردم محلی، افزایش خدمات طرح‌های توسعهٔ آتی و اشتغال‌زایی و جلوگیری از مهاجرت به‌دست آمد.

آنالیز حساسیت: جهت انجام آنالیز حساسیت مهم‌ترین عامل ایجادکننده پیامدهای محیط‌زیستی حاصل از آزمون ReCiPe H midpoint در نظر گرفته شد. از آنجا که در اکثر پیامدهای محیط‌زیستی، برق مصرفی، سوخت مازوت و پوزولان، بیشترین میزان تأثیر داشتند، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که میزان کاهش هر یک از عوامل، می‌تواند موجب کاهش پیامدهای محیط‌زیستی مورد بررسی گردد. در بین سه عامل ورودی مورد بررسی، کاهش ۲۰٪ از پوزولان، بیشترین تأثیر را بر کاهش پیامدهای محیط‌زیستی نشان داد. به گونه‌ای که سمیت غیر انسانی به میزان ۱۱/۷۸٪، سمیت سرطان‌زایی انسانی ۶/۹۲٪، سمیت اکوسیستم‌های دریایی ۱۰/۱۶٪، سمیت اکوسیستم آب شیرین ۱۰/۹۹٪ و اسیدی شدن خشکی‌ها ۷/۷۵٪ کاهش یافت. کاهش



فرآیندهای مؤثر بر سوخت‌های فسیلی

عوامل مؤثر بر سوخت‌های فسیلی

شکل ۱۱. عوامل و فرآیندهای مؤثر بر سوخت‌های فسیلی در آزمون CED

میزان ۲۰٪ مازوت نیز موجب کاهش ۱۴/۱۴٪ تخلیهٔ منابع فسیلی، ۵/۱۸٪ سمیت اکوسیستم خشکی، ۴/۸٪ سمیت غیر انسانی و ۶/۷۳٪ سمیت سرطان‌زایی انسانی گردید. کاهش ۲۰٪ مصرف برق نیز، موجب کاهش ۴/۲٪ تخلیهٔ منابع فسیلی و ۲/۱٪ از گرمایش جهانی گردید. بنابراین، علاوه بر مصرف برق، سایر پارامترهای موجود از قبیل مواد منتشره به طبیعت نیز می‌تواند نقش مؤثری بر پدیده گرمایش جهانی داشته باشد.

بررسی انرژی‌خواهی تجمعی تولید سیمان خاکستری (CED): انرژی‌خواهی تجمعی به‌منظور مقایسهٔ مصرف مستقیم و غیرمستقیم انرژی‌های مختلف در طول چرخهٔ حیات محصول محاسبه می‌شود (Frischknecht *et al.*, 2015). بنابراین به‌منظور تعیین دقیق انرژی مصرف شد در حین فرآیند تولید سیمان خاکستری، این شاخص بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که سوخت‌های فسیلی با ۹۷/۸۹٪ بالاترین میزان مصرف را در کارخانهٔ سیمان سیستان داشته و سهم سایر منابع از قبیل انرژی هسته‌ای تجدیدپذیر ۱/۰۵٪ و انرژی آب تجدیدپذیر ۰/۸۱٪ به‌دست آمد. درحالی‌که سهم سایر منابع انرژی بسیار ناچیز بود. مهم‌ترین اثرات استفاده از انرژی تجدیدپذیر، در مقایسه با نیروگاه‌هایی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه کاهش اثرات تابعه است. در مطالعهٔ حاضر، بررسی عوامل و فرآیندهای مؤثر بر بخش سوخت‌های فسیلی، نیز نشان داد که استفاده از سوخت مازوت بیشترین تأثیر را دارد (شکل ۱۱). در مطالعه‌ای که توسط Nigri و همکاران (۲۰۱۰) به روش ارزیابی چرخهٔ حیات انجام شد، نشان داد که صنعت سیمان از طریق مصرف سوخت‌های فسیلی و تأثیر بر گرمایش جهانی و ایجاد انواع آلودگی هوا از قبیل افزودن فلزات سنگین و گرد و غبار به هنگام استخراج مواد اولیه، اثرات مخربی بر محیط‌زیست دارد. آن‌ها عنوان کردند که اگر تکنولوژی تولید سیمان تغییر پیدا نکند و سوخت‌های با آلودگی کمتر، جایگزین نشود، در آینده‌ای نزدیک، از دست رفتن منابع و ایجاد آلودگی‌های متنوع اتفاق خواهد افتاد. بنابراین به‌منظور دسترسی به تولید پایدار، بایستی سیستم تولید اصلاح‌شده و مضرترین مرحلهٔ تولید سیمان تعیین گردد. Garcia-Segura و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان دادند که در صورتی‌که ضایعات بخش کلینکر به‌درستی بازیافت شود، موجب کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن به میزان ۴۷٪ درصد خواهد شد.

نتیجه‌گیری

نتیجهٔ تحقیق حاضر نشان داد که انتشارات مستقیم کارخانه، مهم‌ترین عامل و سپس پوزولان، مازوت و برق، بیشترین تأثیر را بر پیامدهای گرمایش جهانی، سمیت اکوسیستمی و انسانی و تخریب لایهٔ ازون داشتند. به گونه‌ای که با کاهش ۲۰٪ از میزان پوزولان، مازوت و برق، کاهش معنی‌داری در میزان پیامدها به‌دست آمد. براساس شاخص‌های پایانی نیز تولید سیمان بیشترین تأثیر را بر سلامت انسان، سپس بر اکوسیستم و در نهایت بر منابع داشت. مهم‌ترین عامل مؤثر بر این سه شاخص به‌ترتیب تولید ذرات معلق کمتر از ۲/۵ میکرومتر، مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید دی‌اکسیدکربن به‌دست آمد. همچنین شاخص CED نیز نشان داد که بخش عظیمی از انرژی مصرفی مربوط به سوخت‌های فسیلی بوده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که کارخانه از

جنبهٔ مصرف پوزولان، سوخت‌های فسیلی و ایجاد ذرات مؤثر بر سلامت انسان می‌تواند تأثیر مخربی داشته باشد که نیاز به بررسی منابع جایگزین است. بررسی دودکش کارخانه و امکان اصلاح آن می‌تواند نقش مؤثری بر کاهش انتشار ذرات معلق به محیط داشته باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود، برای صنایعی که نیاز به انرژی مصرفی بالا دارند، بخشی از انرژی از طریق الکتریسیته حاصل از توربین‌های بادی و انرژی حاصل از صفحات خورشیدی فراهم شود.

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه زابل، به دلیل پشتیبانی مالی این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود. نویسندگان مقاله همچنین از مجموعهٔ مدیریت گروه صنایع سیمان سیستان به‌ویژه آقای مهندس گلوی و آقای مهندس صباغزاده و همکاران ایشان کمال تشکر را دارند.

References

Adjei, S., Elkatanty, S., 2020. A highlight on the application of industrial and agro wastes in cement based materials. Journal of Petroleum Science and Engineering 195(12), 107911.

Ahmadi, A., Barna, L.T., 2015. A process modelling life cycle assessment multi objective optimization tool for the ecodesign of conventional treatment process of potable water. Journal of Cleaner Production 100(15), 116-125.

Artaze, S., Pfister, S., Oberschelp, C., Sanchez-Perez, J.A., 2019. Environmental impacts of an advanced oxidation process as tertiary treatment in a wastewater treatment plant. Science of the Total Environment 694(51), 133572.

Bahramian, M., Yetilmezsoy, K., 2020. Life cycle assessment of the building industry: an overview of two decades of research (1995-2018). Energy and Building 219(14), 109917.

Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K.S., Singh, M., 2020. Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. Journal of Cleaner Production 254(13), 120147.

Camargo, E.C., Lombardi, A.T., 2018. Effect of cement industry flue gas simulation on the physiology and photosynthetic performance of Chlorella sorokiniana. Journal of Apples Phycology 30(2), 861-871.

Fayyaz, S., Khadem Masjedi, S., Kazemi, A., Khaki, E., Moeinaddini, M., Olsen, S., 2023. Life cycle assessment of reverse osmosis for high–salinity seawater desalination process: potable and industrial water production. Journal of cleaner production 382(1), 135299.

Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., Klüppel, H.-J., 2006. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. The International Journal of Life Cycle Assessment 11(2), 80-85.

García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J., 2014. Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. The International Journal of Life Cycle Assessment 19, 3-12.

Garcı´a-Gusano, D., Herrera, I., Garraı´n, D., Lecho´n, Y., Cabal, H., 2015. Life cycle assessment of the Spanish cement industry: implementation of environmental-friendly solutions. Clean Technologies and Environmental Policy 17(1), 59-73.

Gursel, P., Masanet, E., Horvath, A., Stadel, A., 2014. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. Cement and Concrete Composites 51(7), 38-48.

He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., Wang, Y., 2019. Comparison of CO_2 emissions from OPC and recycled cement production. Construction and Building Materials 211(17), 965-973.

Huijbreg, A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment 22(2), 138-147.

Imani, B., Yarmohammadi, K., Asadpoor, Z., 2019. Environmental Impact Assessment of Yasuj Cement Factory Using Iranian RIAM and Leopold Matrix (Case Study: Tangary Village of Yasouj City). Journal of Natural Environmental Hazards 8(21), 249-270.

International Energy Agency, 2019. IEA World Energy Statistics and Balances.

Josa, A., Aguado, A., Cardim, A., Byars, E., 2007. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the US. Cement and Concrete Research 37(5), 781-788.

Katsuyuki, N., 2020. Life Cycle Assessment of Wooden Building Material. The Journal of Life Cycle Assessment 16(2), 72-78.

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(6), 527-537.

Kim, N., Hwang, S., Hwang, M., 2019. New projection of GHG reduction potentials for Korea's cement industry and comparison with Roadmap 2030. Energy and Environment 30(3), 499-521.

Korouzhdeh, T., Eskandari, H., Kaemi, R., 2021. Hybrid artificial neural network with biogeography – based optimization to assess the role of cement fineness on ecological footprint and mechanical properties of cement mortar expose to freezing / thawing. Construction and Building Materials 304(40), 124589.

Li, Y., Chen, S.F., Dong, X.J., Zhao, X.J., 2020. Prediction of cause – specific disability adjusted life years in China from 2018 through 2021: a Systematic Analysis Public Health 180(3), 90-99.

Little, D., Sheppard, R.J., Hulme, D., 2021. A perspective on oil spills: what's we should have learned about global warming? Ocean and Coastal Management 202(4), 105509.

Mbohwa, C., Moyo, S., 2008. Life Cycle Assessment of the Cement Industry in Zimbabwe Charles. 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering 2008. Zimbabwe.

Mhthu, M., Santhanam, M., 2018. Effect of reduced graphene oxide, alumina and silica nanoparticles on the deterioration characteristics of Portland cement paste exposed to acidic environment. Cement and Concrete Composites 91(7), 118-137.

Nigam, H., Jain, R., Malik, A., Singh, V., 2022. Comparative life cycle assessment of microalgal biomass production in conventional growth media versus newly developed nonoemulsion media. Bioresource Technology 352(11), 127069.

Nigri, E.M., Rocha, S.D.F., Filho, E.R., 2010. Portland cement: an application of life cycle assessment. Product, Management and Development 8(2), 167-172.

Parisi, M.L., Vesce, S.M., Sinicropi, V.A., Carlo, A.D., Basosi, R., 2020. Prospective life cycle assessment of third generation photovoltaic at the pre-industrial scale: a long term scenario approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews 121(5), 109703.

Patnaik, R., 2018. Impact of Industrialization on Environment and Sustainable Solutions–Reflections from a South Indian Region Rasmi Patnaik IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 120(2017 5th International Conference on Environment Pollution and Prevention (ICEPP 2017), 14-16 December 2017, Singapore), 012016.

Piotrowska, K., Kruszelinka, 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.

Poudyal, L., Adhikari, K., 2021. Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production, Resources. Environment and Sustainability 4(2), 100024.

Robati, M., Hosseini, M., Mansouri, N., 2020. Application of ecosystem services in life cycle assessment using TES-LCA. Case study: Faraz Firoozkoh. Journal of Environmental Studies 45(4), 663-678.

Sadeghi, S., Ghandehariun, S. and Rosen, M.A., 2020. Comparative economic and life cycle assessment of solar based hydrogen production for oil and gas industries. Energy 208(19), 118347.

Scipioni, A., Niero, M., Mazzi, A., Manzadro, A., Piubello, S., 2013. Significance of the use of non-renewable fossil CED as proxy indicator for screening LCA in the beverage packaging sector. The International Journal of Life Cycle Assessment 18(3), 673-682.

Stafford, F.N., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J.A., Hotza, D., 2016. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. Journal of Cleaner Production 137(35), 1293-1299.

Thai, T., Bernatik, A., Kucera, P., 2021. Air pollution associated with total suspended particulate and particulate matter in cement grinding plant I Vietnam. Atmosphere 12(2), 1707.

Thwe, E., Khatiwada, D., Gasparatos, A., 2021. Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar. Cleaner Environmental Systems 2(1), 100007.

WBCSD, 2019. Global Cement Database on CO_2 and Energy Information. https://gccassociation.org/sustainability-innovation/ gnr-gcca-in-numbers/. (Accessed on 10 Jun 2018).

Wang, J., Wang, R., Zhu, Y., Li, J., 2018. Life cycle assessment and environmental coast accounting of coal –fired power generation in China. Energy Policy 115(4), 374-384.

Westh, T.B., Hauschild, M., Birkved, M., Jorgensen, M.S., Rosenbaum, R.K., Fantke, P., 2015. The USEtox story: a survey of model developer visions and user. The International Journal of Life Cycle Assessment 20(2), 299-310.

Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., 2016. Substantial global carbon uptake by cement carbonation, Nature Geoscience 9(12), 880-883.

Yay, A.S., 2015. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. Journal of Cleaner Production 94(9), 284-293.

Zinatizadeh, M., 2014. Assessment of the environmental effects of the Bijar cement plant expansion plan, Kurdistan, the First National and Specialized Conference on Environmental Research, Hamadan, Iran. (in Persian)