



# Environmental life cycle assessment of graphene production from biomass waste: the impact of transitioning energy sources to renewable energy on global warming potential

Fatemeh Bahmei<sup>1</sup> | Nader Bahramifar<sup>2✉</sup> | Sharam Ghasemi-Mir<sup>3</sup> | Habibollah Younesi<sup>4</sup> | Marcel Weil<sup>5</sup>

1. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.. E-mail: [f.bahmei@modares.ac.ir](mailto:f.bahmei@modares.ac.ir)
2. Corresponding Author, Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: [n.bahramifar@modare.ac.ir](mailto:n.bahramifar@modare.ac.ir)
3. Faculty of Chemistry, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. E-mail: [sghasemi@umz.ac.ir](mailto:sghasemi@umz.ac.ir)
4. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: [hunesi@modares.ac.ir](mailto:hunesi@modares.ac.ir)
5. Institute for Technology Assessment and Systems Analysis (ITAS), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany. E-mail: [marcel.weil@kit.edu](mailto:marcel.weil@kit.edu)

## Article Info

### Article type:

Research Article

### Article history:

Received 04 January 2025

Received in revised form 14

February 2025

Accepted 02 March 2025

Published online 01 July 2025

### Keywords:

**Biomass waste,**

**Graphene,**

**Life cycle assessment,**

**Renewable energy.**

## ABSTRACT

In recent years, graphene has garnered significant attention in fields such as electronics and energy storage due to its remarkable properties, including high electrical and thermal conductivity. Producing graphene from bio-waste has emerged as an innovative approach to reducing costs and enhancing environmental sustainability. This method can contribute to resource efficiency and mitigate environmental impacts. However, life cycle assessments of graphene production from bio-waste are limited, and its environmental impacts depend on the synthesis method and the energy sources utilized. In this study, a cradle-to-gate life cycle assessment was conducted with a functional unit of producing 1 kilogram of graphene to evaluate the environmental impacts associated with the production phase. The findings indicate that producing graphene from bio-waste, such as banana peels, wheat straw, and populus wood waste, can reduce environmental impacts. Among the evaluated bio-waste sources, graphene derived from wheat straw exhibited the highest environmental impact in the global warming category, equivalent to 580.91 kilograms of CO<sub>2</sub>. In contrast, graphene produced from populus wood waste demonstrated the lowest impact in this category, equivalent to 122.49 kilograms of CO<sub>2</sub>. Future scenario analyses suggest that incorporating renewable energy sources into Iran's electricity mix could significantly reduce the global warming potential of graphene production between 2030 and 2050. This reduction is particularly notable for populus wood waste, with a projected decrease of 29% to 57% over the analyzed years.

**Cite this article:** Bahmei, F., Bahramifar, N., Ghasemi-Mir, S., Younesi, H., & Weil, M. (2025). Environmental life cycle assessment of graphene production from biomass waste: the impact of transitioning energy sources to renewable energy on global warming potential. *Journal of Natural Environment*, 78 (Monitoring and Management of Natural Environmental Pollutants), 229-241. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.388187.2752>



## ارزیابی محیط زیستی چرخه حیات تولید گرافن از ضایعات زیستی: اثر تغییر منابع تأمین انرژی به انرژی های تجدیدپذیر بر پتانسیل گرمایش جهانی

فاطمه بهمنی<sup>۱</sup> | نادر بهرامی فر<sup>۲</sup> | شهرام قاسمی میر<sup>۳</sup> | حبیب الله یونسی<sup>۴</sup> | مارسل ویل<sup>۵</sup>

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: [f.bahmei@modares.ac.ir](mailto:f.bahmei@modares.ac.ir)
۲. نویسنده مسئول، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: [n.bahramifar@modare.ac.ir](mailto:n.bahramifar@modare.ac.ir)
۳. گروه نانو شیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. رایانامه: [sghasemi@umz.ac.ir](mailto:sghasemi@umz.ac.ir)
۴. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: [hunesi@modares.ac.ir](mailto:hunesi@modares.ac.ir)
۵. گروه فناوری های انرژی پایدار، دانشکده ارزیابی فناوری و تجزیه و تحلیل سیستم ها، دانشکاه تکنولوژی کارلسروهه، کارلسروهه، آلمان. رایانامه: [marcel.weil@kit.edu](mailto:marcel.weil@kit.edu)

| اطلاعات مقاله                                                                         | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی                                                               | در سال های اخیر، گرافن به دلیل ویژگی های برجسته ای مانند رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا، در زمینه هایی چون الکترونیک و ذخیره سازی انرژی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تولید گرافن از ضایعات زیستی به عنوان رویکردی نوین برای کاهش هزینه ها و ارتقای پایداری محیط زیستی مطرح شده است. این روش می تواند به بهره وری منابع و کاهش اثرات محیط زیستی کمک کند. با این حال، ارزیابی های چرخه حیات تولید گرافن از ضایعات زیستی محدود است و اثرات محیط زیستی آن به روش سنتز و منابع انرژی مورد استفاده وابسته است. در این مطالعه برای ارزیابی اثرات محیط زیستی مربوط به فاز تولید گرافن، یک ارزیابی چرخه حیات از نوع گهواره تا دروازه با واحد کارکردی تولید یک کیلوگرم گرافن انجام شد. نتایج این مطالعه نشان می دهد که تولید گرافن از ضایعات زیستی مانند پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر می تواند اثرات محیط زیستی را کاهش دهد. گرافن حاصل از ضایعات کاه گندم بالاترین اثرات محیط زیستی را در رده گرمایش جهانی، معادل ۵۸۰/۹۱ کیلوگرم CO <sub>2</sub> دارد. در حالی که گرافن تولیدی از ضایعات چوب صنوبر کمترین تأثیرات را در این زمینه، معادل ۱۲۲/۴۹ کیلوگرم CO <sub>2</sub> نشان می دهد. تحلیل سناریوهای آینده نشان می دهد که استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در ترکیب منابع برق ایران می تواند پتانسیل گرمایش جهانی را از سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ به طور قابل توجهی کاهش دهد، به ویژه برای ضایعات چوب صنوبر که می تواند بین ۲۹٪ تا ۵۷٪ طی سال های مورد بررسی کاهش یابد. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| کلیدواژه ها:<br>ارزیابی چرخه حیات،<br>انرژی های تجدیدپذیر،<br>ضایعات زیستی،<br>گرافن. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

**استناد:** بهمنی، فاطمه؛ بهرامی فر، نادر؛ قاسمی میر، شهرام؛ یونسی، حبیب الله؛ و ویل، مارسل (۱۴۰۴). ارزیابی محیط زیستی چرخه حیات تولید گرافن از ضایعات زیستی: اثر تغییر منابع تأمین انرژی به انرژی های تجدیدپذیر بر پتانسیل گرمایش جهانی. محیط زیست طبیعی، ۷۸ (ویژه نامه پایش و مدیریت آلاینده های محیط زیست طبیعی)، ۲۲۹-۲۴۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.388187.2752>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

در سال‌های اخیر، گرافن و مواد مرتبط با آن به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای همچون خواص الکتریکی استثنایی، رسانایی حرارتی بالا، سطح ویژه بزرگ و خواص مکانیکی منحصر به فرد، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند (Somanathan et al., 2015). گرافن کاربردهای متعددی دارد، از جمله به عنوان نیمه‌هادی در دستگاه‌های الکترونیکی، جایگزین اکسید ایندیوم قلع در نمایشگرهای کریستال مایع، افزودنی در کامپوزیت‌ها برای بهبود استحکام و رسانایی، و استفاده در ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی (Arvidsson et al., 2014). روش‌های متعددی برای تولید گرافن وجود دارد که شامل لایه‌برداری و جداسازی مکانیکی (Sinclair et al., 2019)، لایه‌برداری فاز مایع، استفاده از ترکیب‌های بین‌مولکولی، رشد روی کاربید سیلیکون، (Obraztsov et al., 2009)، رسوب‌دهی بخار شیمیایی (Kang et al., 2012) رسوب روی فلزات، و سنتز شیمیایی از طریق اکسیداسیون و کاهش گرافیت می‌شود (Munuera et al., 2022). در سال‌های اخیر، تولید گرافن از ضایعات زیستی به عنوان رویکردی نویدبخش برای کاهش هزینه‌ها و ارتقای پایداری محیط‌زیستی مطرح شده است (Idris et al., 2023). پردازش و بازیافت ضایعات زیستی نه تنها بهره‌وری منابع طبیعی را افزایش می‌دهد، بلکه به تولید مواد شیمیایی و کربنی ارزشمند منجر می‌شود و به مدیریت پایدار منابع و حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند (Wu et al., 2024). مطالعات متعددی به سنتز گرافن از ضایعات زیستی و ارزیابی کاربردهای آن پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، Chen و همکاران (۲۰۱۶) گرافن چندلایه را از کاه گندم سنتز کردند (Y.Chen et al., 2016) و همکاران (۲۰۱۷) ضایعات پوسته بادام زمینی را به گرافن چندلایه با سطح ویژه ۲۰۷۰ مترمربع بر گرم تبدیل کردند که برای کاربردهای ابرخازنی مناسب است. Baqiya و همکاران (۲۰۲۰) نیز با استفاده از پوسته نارگیل و لایه‌برداری مکانیکی، ذراتی با ابعاد نانومتری تولید کردند (Baqiya et al., 2020). این پژوهش‌ها نشان‌دهنده پتانسیل ضایعات زیستی برای تولید گرافن هستند. با این حال، ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی فرآیندهای تولید گرافن ضروری است. درحالی‌که استفاده از ضایعات زیستی به عنوان پیش‌ماده مزایای محیط‌زیستی دارد (Heydarzadeh et al., 2023)، مواد فعال‌ساز و فرآیندهای مورد استفاده ممکن است اثرات منفی داشته باشند (Cossutta et al., 2017). بنابراین، استفاده از ارزیابی چرخه حیات (LCA<sup>۱</sup>) برای بررسی تأثیرات محیط‌زیستی این فرآیندها لازم است (Heidari et al., 2019).

LCA ابزاری کلیدی برای ارزیابی جامع اثرات محیط‌زیستی فناوری‌های نوظهور است که تمامی مراحل، از استخراج مواد اولیه تا دفع نهایی را پوشش می‌دهد (Cossutta et al., 2015). با وجود پیشرفت در فناوری‌های سنتز گرافن، تحقیقات درباره LCA تولید گرافن از ضایعات زیستی همچنان محدود است (Khanam et al., 2017). بررسی‌های پیشین عمدتاً روی فرآیندهایی همچون اکسیداسیون شیمیایی، لایه‌برداری فاز مایع، آسیاب گلوله‌ای، رسوب‌دهی بخار شیمیایی و رشد هم‌بافته متمرکز بوده‌اند (Arvidsson et al., 2014; Cossutta et al., 2017; Beloin-Saint-pierre an Hischier, 2021). یافته‌ها نشان می‌دهند که اثرات محیط‌زیستی تولید گرافن به شدت به روش تولید وابسته است (Tripathi et al., 2019). به عنوان نمونه، Arvidsson و همکاران (۲۰۱۴) کاهش قابل توجهی در اثرات محیط‌زیستی با بازیافت دی‌اتیل اتر مشاهده کردند (Arvidsson et al., 2014). آن‌ها همچنین نشان دادند که مصرف بالای برق در فرآیندهایی مانند تولید ویفرهای SiC، اثرات محیط‌زیستی عمده‌ای دارد و پیشنهاد کردند که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند این اثرات را کاهش دهد. Cossutta و همکاران (۲۰۱۷) روش‌های مختلف تولید گرافن را مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که روش‌های کاهش شیمیایی برای تولید انبوه مناسب نیستند. همچنین، Serrano-Luján و همکاران (۲۰۱۹) به این نتیجه رسیدند که روش مارکانو از نظر محیط‌زیستی برتر از روش هامر است، اما استفاده از هیدرازین در این روش می‌تواند مخاطراتی ایجاد کند.

همان‌طور که ذکر شد مطالعاتی که به ارزیابی چرخه حیات محصولات کربنی مانند کربن فعال یا گرافن از ضایعات زیستی پرداخته باشند نسبتاً محدود هستند. به‌طور مثال در مطالعه‌ی که Puspita و همکاران (۲۰۲۱) انجام دادند تولید گرافن از پوسته برنج و گرافیت ورقه‌ای مقایسه شد که مشخص شد روش مبتنی بر زیست‌توده دارای پتانسیل گرمایش جهانی کمتری (۲۴/۲۶ کیلوگرم معادل CO<sub>2</sub>) نسبت به روش گرافیت ورقه‌ای است.

<sup>۱</sup>Life cycle assessment

در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۲۲ توسط Jia و همکاران انجام شد، نشان داد که استفاده از ضایعات زیستی برای تولید گرافن ردهای محیط زیستی بسیار کمتری به نسبت تولید گرافن با روش های سنتی مانند لایه برداری الکتروشیمیایی گرافیت و اکسیداسیون شیمیایی دارد. همچنین نتایج آنها نشان داد مهمترین عامل ایجاد پیامد در تولید گرافن از پسماندهای زیستی مصرف الکتروسیسته است که بسته به نوع پیش ماده ها بین ۷۵ تا ۹۵ درصد در ایجاد پیامد مشارکت دارد. این مطالعات نشان می دهند که مصرف برق یکی از عوامل کلیدی در اثرات محیط زیستی تولید گرافن است (Arvidsson et al., 2014; Cossutta et al., 2020). براساس تحقیق Arvidsson و Molander (۲۰۱۷)، در بدترین حالت، مصرف برق بیش از ۹۹ درصد و در بهترین حالت بیش از ۷۶ درصد از اثرات محیط زیستی را تشکیل می دهد. این نتایج اهمیت گنجانیدن سیستم های مختلف تولید برق در چارچوب LCA را برجسته می کند، زیرا تأثیرات محیط زیستی بسته به ترکیب برق می توانند به طور چشم گیری تغییر کنند. بنابراین، درک دقیق زنجیره تأمین برق برای ارزیابی اثرات محیط زیستی تولید گرافن ضروری است. تحقیقات نشان داده اند که استفاده از انرژی های تجدیدپذیر می تواند اثرات محیط زیستی را به طور قابل توجهی کاهش دهد، چراکه این منابع انرژی، تولید گازهای گلخانه ای و سایر آلاینده های مرتبط با برق فسیلی را محدود می کنند.

با وجود توجه فزاینده به انرژی های تجدیدپذیر در سال های اخیر، توسعه این نوع انرژی هنوز در مراحل اولیه قرار دارد. سوخت های فسیلی همچنان سهم غالبی در تولید و مصرف انرژی جهانی دارند و بیش از ۸۰ درصد از سبد تأمین انرژی دنیا را تشکیل می دهند (Aryanpur et al., 2019; Noorollahi et al., 2022). با این حال، روند افزایشی سهم انرژی های تجدیدپذیر در سبد انرژی جهانی می تواند پیامدهای ژئوپلیتیکی قابل توجهی به همراه داشته باشد. ایران، به عنوان کشوری غنی از منابع انرژی، ظرفیت قابل توجهی برای توسعه انرژی های تجدیدپذیر، به ویژه انرژی های بادی و خورشیدی، دارد. شرایط جغرافیایی و اقلیمی متنوع این کشور امکان بهره برداری مؤثر از این منابع را فراهم می کند (Fathi et al., 2023).

براساس برآوردها، ظرفیت انرژی بادی ایران حدود ۶۵۰۰ مگاوات است و ۴۵ سایت مناسب برای احداث پارک های بادی شناسایی شده اند، که میانگین ضریب ظرفیت سالانه این پارک ها حدود ۳۳ درصد تخمین زده می شود. همچنین، ایران از سال ۲۰۰۰ در زمینه طراحی و ساخت توربین های بادی فعالیت داشته و تاکنون ۱۶۳ توربین بادی با مجموع ظرفیت ۹۴/۲۷۰ مگاوات در کشور نصب شده است. در حوزه انرژی خورشیدی، ایران با تابش خورشیدی متوسط ۲۰۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال یکی از بهترین مناطق جهان برای توسعه این نوع انرژی است. تا پایان سال ۲۰۱۰، ظرفیت کل انرژی خورشیدی نصب شده در ایران به ۶۷ مگاوات رسید و ۱۱ پروژه خورشیدی در حال اجرا یا بهره برداری بودند (Zamanipour et al., 2023).

هدف این مطالعه، بررسی تأثیر تغییرات زنجیره تأمین الکتروسیسته از سوخت های فسیلی به انرژی های تجدیدپذیر بر فرآیند تولید گرافن از پسماندهای زیستی شامل پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر است. این پژوهش با استفاده از مدل سازی های انجام شده، سناریوهای مختلف تأمین برق در ایران تا سال ۲۰۵۰ میلادی را تحلیل می کند تا تأثیر این تغییرات بر پیامدهای محیط زیستی تولید گرافن را ارزیابی نماید. نتایج این مطالعه می تواند به ارائه راهکارهایی برای بهبود فرآیندهای تولید مواد پیشرفته همانند گرافن در چارچوب توسعه پایدار کمک کند.

## روش شناسی پژوهش

**تولید گرافن از ضایعات زیستی:** فعال سازی با پتاسیم هیدروکسید (KOH) یک روش شناخته شده برای ایجاد ساختارهای کربنی متخلخل است. طی فرآیند فعال سازی، واکنش شیمیایی بین KOH و کربن که در معادله (۱) نشان داده شده است، شبکه ای از حفرات ایجاد می کند. در دماهای بالاتر از ۹۷۳ کلوین، کربنات پتاسیم ( $K_2CO_3$ ) به کربن دی اکسید ( $CO_2$ ) و اکسید پتاسیم ( $K_2O$ ) تجزیه می شود که به ریزتخلخل بالا کمک می کند (Chen et al., 2020). اثرات ترکیبی فعال سازی شیمیایی و فیزیکی، همراه با نفوذ پتاسیم فلزی، منجر به ایجاد ساختار کربنی بسیار متخلخل می شود (Aluri et al., 2018; Wang et al., 2012). شستشو، پتاسیم فلزی و سایر ترکیبات را حذف می کند و از بازگشت صفحات کربن به حالت غیرمتخلخل جلوگیری می کند (Torri et al., 2016).

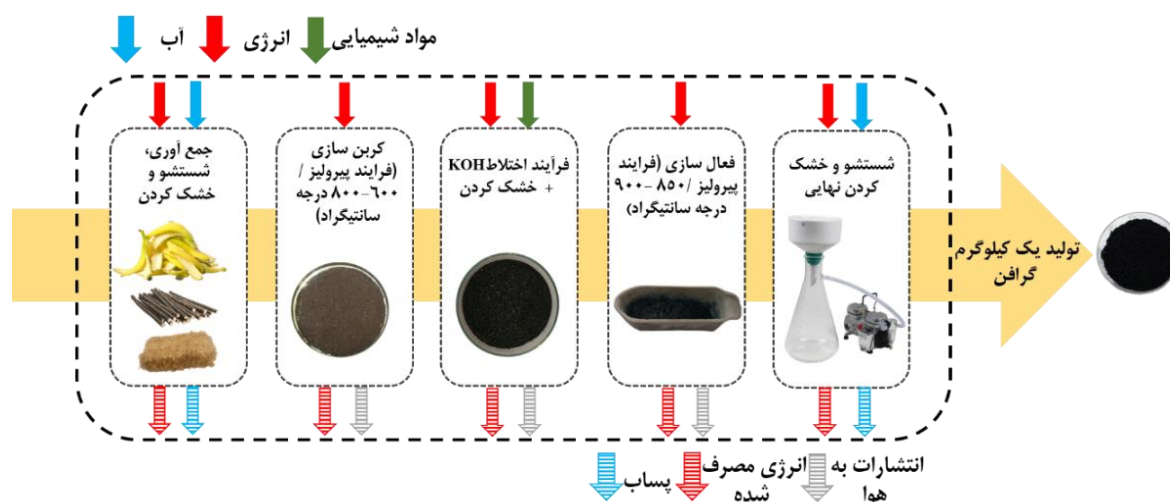


تخلخل و سطح ویژه گرافن به‌طور قابل توجهی به نوع پیش‌ماده زیست‌توده بستگی دارد (Gomez-Martin et al., 2019). در مطالعه قبلی، ضایعات پوست موز تحت فرآیند کربونیزاسیون در اتمسفر آرگون و فعال‌سازی با KOH قرار گرفت و در نتیجه گرافن متخلخل با سطح ویژه ۲۳۱۷/۵ مترمربع بر گرم به‌دست آمد (Bahmei et al., 2020). به‌طور خلاصه، پودر پوست موز خشک شده تحت کربونیزاسیون در اتمسفر آرگون با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه به‌مدت حدود ۱ ساعت قرار گرفت. نمونه‌های کربونیزه شده با محلول KOH با نسبت جرمی KOH به کربن برابر ۵:۱ (۵ گرم KOH به ۱ گرم ضایعات پوست موز کربونیزه شده) مخلوط شدند. فعال‌سازی در اتمسفر آرگون با نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه، دمای فعال‌سازی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان فعال‌سازی ۲ ساعت و نرخ جریان ثابت گاز آرگون ۱۴۰ میلی‌لیتر در دقیقه انجام شد. نمونه‌های گرافن حاصل با آب دیونیزه شستشو داده شدند، به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس در یک محفظه بسته نگهداری شدند. روش‌های مشابهی برای ضایعات چوب صنوبر و کاه گندم اعمال شد که منجر به سطح ویژه بالا و بازده مثبت برای پیش‌ماده‌های مختلف شد (Ekhlasi et al., 2018; Kazemi, 2018; Bahmei et al., 2020).

**مدل ارزیابی چرخه حیات:** برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی مربوط به فاز تولید گرافن از ضایعات زیستی، یک ارزیابی چرخه حیات از نوع گهواره تا دروازه براساس چهار مرحله‌ای که در استانداردهای ISO ۱۴۰۴۰/۱۴۰۴۴ برای LCA تعریف شده است، انجام شد: تعریف هدف و دامنه، تجزیه و تحلیل سياهه (LCI<sup>۲</sup>)، ارزیابی پیامد (LCIA<sup>۳</sup>) و تفسیر و بهبود.

در مرحله اول، تعریف هدف و دامنه، چارچوب مطالعه LCA مشخص شده و انتظارات تمامی ذینفعان هماهنگ می‌گردد. مرحله بعد، LCI، شامل جمع‌آوری داده‌ها در مورد ورودی‌ها و خروجی‌های فرآیند و انجام توازن‌های جرمی و انرژی است. در نهایت، در مرحله LCIA، نتایج LCI با استفاده از روش‌های استاندارد شده LCIA به اثرات محیط‌زیستی تبدیل می‌شود.

**هدف، دامنه، مرز سیستم و واحد عملکردی:** این مطالعه LCA با هدف ارزیابی اثرات محیط‌زیستی مرتبط با تولید گرافن از ضایعات زیستی و بررسی تأثیرات تأمین انرژی با توجه به پتانسیل‌های موجود در ایران انجام شده است. هدف اصلی این مطالعه حمایت از توسعه فناوری‌های جدید و ایجاد معیاری برای تحقیقات آینده در این حوزه می‌باشد. شکل ۱ فرآیند کلی تولید یک کیلوگرم گرافن به‌عنوان واحد کارکردی از ضایعات زیستی را طبق مرز سیستم تعریف شده نشان می‌دهد. مرز سیستم در این مطالعه به‌عنوان مراحل چرخه حیات از گهواره تا دروازه تعریف شده است. با توجه به اینکه تولید آزمایشگاهی فعلی گرافن در مقیاس ۱ گرم انجام می‌شود، داده‌ها برای تولید در مقیاس ۱ کیلوگرم نرمال‌سازی شده‌اند تا این تحلیل تسهیل شود و پیامدهای زنجیره تأمین برق در یک سناریوی تولید در مقیاس بزرگ‌تر بررسی گردد.



شکل ۱- مرز سیستم از گهواره تا دروازه برای تولید ۱ کیلوگرم گرافن از سه نوع ضایعات زیستی به‌عنوان پیش‌ماده

<sup>۲</sup>Life cycle inventory

<sup>۳</sup>Life cycle impact assessment

**تجزیه و تحلیل سیاهه (LCI):** در این مطالعه، برای انجام ارزیابی چرخه حیات از نرم افزار OpenLCA و پایگاه داده Ecoinvent نسخه ۳٫۹ استفاده شده است. OpenLCA با قابلیت های پیشرفته خود مانند مدل سازی گرافیکی و تحلیل مشارکت، امکان بررسی دقیق فرآیندها و تأثیرات محیط زیستی را فراهم کرد. پایگاه داده Ecoinvent با پوشش گسترده خود در زمینه های مختلف از جمله تأمین انرژی و مواد شیمیایی، داده های دقیق و به روزی را برای تحلیل فراهم کرد. استفاده از این ابزارها نه تنها دقت و جامعیت تحلیل را افزایش داد، بلکه امکان مقایسه نتایج با سایر مطالعات مشابه را نیز فراهم نمود. با توجه به اینکه فرآیند تولید گرافن در ایران اجرا شده (جدول ۱)، زنجیره تأمین برق با استفاده از ترکیب برق ایران مدل سازی شده است. لازم به ذکر است نوع ضایعات نیز به عنوان ضایعات واقعی و بدون هیچ گونه بار محیط زیستی باقیمانده در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- فهرست چرخه حیات برای تولید یک کیلوگرم گرافن از سه پیش ماده مختلف

| کاه گندم         | پوست موز        | چوب صنوبر        | ورودی           |                  |                 |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| ماده             | مقدار (کیلوگرم) | ماده             | مقدار (کیلوگرم) | ماده             | مقدار (کیلوگرم) |
| ضایعات کاه گندم  | ۲۴              | ضایعات پوست موز  | ۱۲۶             | ضایعات چوب صنوبر | ۶               |
| آرگون            | ۱۴/۹۸           | آرگون            | ۳/۸۴            | نیتروژن          | ۱/۳۷            |
| پتاسیم هیدروکسید | ۳۲/۷            | پتاسیم هیدروکسید | ۲۵              | پتاسیم هیدروکسید | ۵/۶             |
| آب دیونیزه       | ۱۲۰۰            | آب دیونیزه       | ۱۰۰۰            | آب دیونیزه       | ۸               |
| الکتریسیته مصرفی | ۸۱۲/۲*          | الکتریسیته مصرفی | ۳۳۵/۷۴*         | الکتریسیته مصرفی | ۱۳۷/۴۳*         |
| -                | -               | -                | -               | اسید هیدروکلریک  | ۴               |

| خروجی                         |       |                               |       |                               |       |
|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| گرافن                         | ۱     | گرافن                         | ۱     | گرافن                         | ۱     |
| هیدروژن (انتشار به هوا)       | ۰/۳۷۹ | هیدروژن (انتشار به هوا)       | ۰/۲۱۸ | هیدروژن (انتشار به هوا)       | ۰/۱۰۲ |
| کربن مونوکسید (انتشار به هوا) | ۱/۰۸۴ | کربن مونوکسید (انتشار به هوا) | ۰/۶۲۳ | کربن مونوکسید (انتشار به هوا) | ۰/۲۹۲ |
| کربن دی اکسید (انتشار به هوا) | ۱/۲۹۷ | کربن دی اکسید (انتشار به هوا) | ۰/۷۴۴ | کربن دی اکسید (انتشار به هوا) | ۰/۳۴۹ |
| متان (انتشار به هوا)          | ۰/۶۸۸ | متان (انتشار به هوا)          | ۰/۳۹۶ | متان (انتشار به هوا)          | ۰/۱۸۵ |
| اتیلن (انتشار به هوا)         | ۰/۱۶۸ | اتیلن (انتشار به هوا)         | ۰/۰۹۹ | اتیلن (انتشار به هوا)         | ۰/۰۴۵ |
| اتان (انتشار به هوا)          | ۰/۲۹۳ | اتان (انتشار به هوا)          | ۰/۱۶۹ | اتان (انتشار به هوا)          | ۰/۰۷۹ |
| بخار آب (انتشار به هوا)       | ۳/۶   | بخار آب (انتشار به هوا)       | ۹۸/۶  | بخار آب (انتشار به هوا)       | ۰/۹   |
| نیتروژن (انتشار به هوا)       | ۱۴/۹۸ | نیتروژن (انتشار به هوا)       | ۳/۸۴  | نیتروژن (انتشار به هوا)       | ۱/۳۷  |
| خاکستر                        | ۲/۳۴۵ | خاکستر                        | ۱/۳۳۵ | خاکستر                        | ۰/۶۱۵ |
| پساب                          | ۱۲۰۰  | پساب                          | ۱۰۰۰  | پساب                          | ۸     |

\*kwh

**ارزیابی پیامد (LCIA):** ارزیابی پیامد چرخه حیات جنبه ای اساسی برای کمی سازی اثرات محیط زیستی مرتبط با چرخه حیات محصولات است. انتخاب روش مناسب LCIA به عوامل مختلفی از جمله آخرین پیشرفت ها در این حوزه، نوع ارزیابی (مانند نقطه میانی یا نقطه انتهایی)، سازگاری با مطالعات مرتبط دیگر، و عوامل نرمال سازی منطقه ای بستگی دارد (Crenna et al., 2019). در این مطالعه روش Midpoint ۲۰۱۶ Recipe برای محاسبه پیامدهای محیط زیستی و مقایسه اثرات بالقوه مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع ۱۸ دسته پیامد محیط زیستی با استفاده از روش نقطه میانی مورد ارزیابی قرار گرفته اند. در حالی که هر دسته دارای اهمیت خاصی است، این مطالعه کلیدی ترین دسته در مطالعات ارزیابی چرخه حیات؛ پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) را مورد ارزیابی قرار می دهد.

**آنالیز حساسیت و سناریوهای آینده:** آنالیز حساسیت در LCA برای بررسی تغییرپذیری و عدم قطعیت مرتبط با پارامترهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. با تغییر سیستماتیک متغیرهای ورودی، آنالیز حساسیت عوامل مؤثر بر نتایج شناسایی می شوند. در کنار این آنالیز، سناریوهای آینده طراحی می شوند. آنالیز سناریو طیف وسیعی از آینده های ممکن را با در نظر گرفتن سطوح

مختلف پیشرفت‌های فناوری، مداخلات سیاسی و تغییرات اجتماعی-اقتصادی بررسی می‌کند (Zhang et al., 2022). همان‌طور که در مطالعات قبلی نشان داده شده است، برق نقش مهمی در تأثیرات محیط‌زیستی فرآیند پیرولیز ایفا می‌کند (Nowrouzi et al., 2017; Cossutta et al., 2020; Idris et al., 2023). بنابراین، آنالیز حساسیت انجام شده به بررسی این موضوع پرداخته که چگونه تغییرات در ترکیب برق می‌تواند بر تولید گرافن حاصل از مواد زائد تأثیر بگذارد. سناریوها براساس مدل پیش‌بینی تأمین برق ایران در ۵۰ سال آینده طراحی شده‌اند که داده‌های موجود از منابع مختلف (Aryanpur et al., 2019; Fathi et al., 2023) را شامل می‌شود. این مدل به توسعه‌های مختلف احتمالی در بخش انرژی توجه دارد، از جمله پذیرش منابع انرژی تجدیدپذیر، پیشرفت‌های بهره‌وری انرژی و تغییرات پیش‌بینی‌شده در سیاست‌های انرژی (Sohrab et al., 2022). سناریوهای مدل‌شده به درک این موضوع کمک می‌کنند که چگونه ترکیب‌های مختلف برق، از ترکیب غالب سوخت‌های فسیلی تا ترکیب‌های با تجدیدپذیری بالا، می‌توانند بر نتایج محیط‌زیستی تولید گرافن تأثیر بگذارند.

### یافته‌های پژوهش

جدول ۲ نتایج LCIA را برای ۱۸ رده پیامد مورد بررسی در این مطالعه ارائه می‌دهد. در تمامی موارد، گرافن تولید شده از ضایعات کاه گندم بیشترین تأثیر را نشان داد، در حالی که ضایعات چوب صنوبر کمترین تأثیر را داشت. نتایج مشاهده شده به بازده تولید گرافن از هر پیش‌ماده مرتبط است که تحت تأثیر محتوای رطوبت و نسبت مواد لیگنوسلولزی و سلولزی قرار دارد (Rajendran, 2017). پوست موز شامل مقادیر قابل‌توجهی سلولز، همی‌سلولز و لیگنین به‌ترتیب در حدود ۳۶-۲۳٪، ۲۲-۸٪، و ۲۲-۸٪ است (Kabenge et al., 2018). با این حال، محتوای رطوبت پوست موز می‌تواند بالا باشد (۹۰-۷۵٪) که بر کیفیت گرافن تولیدشده تأثیر منفی گذاشته و باعث افزایش نیاز به انرژی برای خشک کردن فعال می‌شود (Vu et al., 2017). در مقابل، کاه گندم یک ضایعات کشاورزی فراوان است که حاوی تقریباً ۴۵-۳۵٪ سلولز، ۳۰-۲۰٪ همی‌سلولز و ۲۰-۱۰٪ لیگنین است (Pasangulapati et al., 2012; Ranjan et al., 2022). محتوای رطوبت کاه گندم معمولاً بین ۲۰-۱۰٪ است. ضایعات چوب صنوبر، به‌عنوان یک چوب سخت، تقریباً شامل ۵۰-۴۰٪ سلولز، ۳۰-۲۰٪ همی‌سلولز و ۳۰-۲۰٪ لیگنین است. محتوای رطوبت چوب صنوبر معمولاً بین ۲۰-۱۰٪ است که آن را به یک ماده اولیه مناسب برای تولید گرافن تبدیل می‌کند (Lühr and Pecenka, 2020). از میان اجزای مختلف زیست‌توده، همی‌سلولز کمترین پایداری حرارتی و لیگنین بیشترین پایداری را دارد. محتوای بالای لیگنین، به‌دلیل ترکیبات فنولی، محصول نهایی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد (Jin et al., 2012). در این مطالعه، محتوای لیگنین در نمونه‌های زیست‌توده پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر به‌ترتیب ۹/۳٪، ۱۴/۸٪، و ۳۵/۵٪ براساس وزن خشک اندازه‌گیری شد. براساس نتایج آزمایشگاهی، گرافن می‌تواند با بازده‌های ۰/۹٪، ۴/۱٪، و ۱۷٪ از پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر تولید شود (Ekhlasi et al., 2018; Kzemi, 2018; Bahmei et al., 2020). این بازده‌ها ارتباط نزدیکی با محتوای رطوبت پیش‌ماده و محتوای لیگنوسلولزی دارند (Levuchuk et al., 2023).

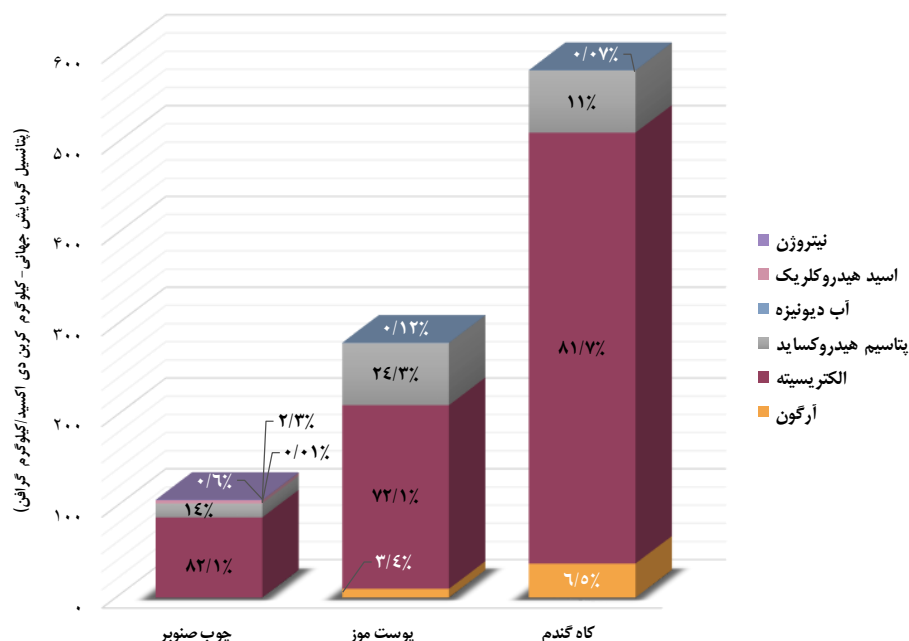
**پتانسیل گرمایش جهانی:** نتایج سهم فرآیندهای مختلف در پتانسیل گرمایش جهانی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مصرف برق در مراحل مختلف تولید گرافن، به‌ویژه در فرآیند پیرولیز، بزرگ‌ترین سهم را در تمامی سناریوهای بررسی شده دارد. برای پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر، مصرف برق به‌ترتیب ۷۲/۱ درصد، ۸۱/۷ درصد و ۸۲/۱ درصد از کل تأثیرات محیط‌زیستی را به‌خود اختصاص داده است. این نشان‌دهنده نقش برجسته انرژی مصرفی در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

علاوه بر مصرف برق، استفاده از پتاسیم هیدروکسید به‌عنوان ماده فعال‌ساز شیمیایی، سهم قابل‌توجهی در پتانسیل گرمایش جهانی در هر سه پیش‌ماده دارد. نکته قابل‌توجه این است که برق مصرفی در تمامی این فرآیندها از شبکه برق ایران تأمین می‌شود، که حدود ۹۷/۵ درصد آن از سوخت‌های فسیلی نظیر نفت و گاز طبیعی تولید می‌شود. این امر سهم قابل‌توجه برق در پتانسیل گرمایش جهانی را توضیح می‌دهد. همچنین، فرآیندهای تولید گرافن در مقیاس آزمایشگاهی به‌طور قابل‌توجهی انرژی‌برتر از مقیاس صنعتی هستند، که این مسئله تأثیرات محیط‌زیستی را افزایش می‌دهد. نتایج این مطالعه با پژوهش‌های مشابه مانند Arvidsson و همکاران (۲۰۱۴) هم‌راستا است و بر اهمیت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای کاهش تأثیرات محیط‌زیستی

تأکید می کند. با این وجود تحلیل های مقایسه ای نشان می دهند که تولید یک کیلوگرم گرافن از ضایعات پسماند چوب صنوبر به طور قابل توجهی کمتر از سایر روش های مورد بررسی برای تولید گرافن است. مطالعه Serrano-Luján همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تولید گرافن با استفاده از روش هامر و بهره گیری از کاهنده های مختلف پرداخت. این پژوهش کاهش ۴۰ درصدی پتانسیل گرمایش جهانی را با به کارگیری گلوکز به عنوان عامل کاهنده گزارش کرده است؛ این کاهش معادل ۳۴۳ کیلوگرم معادل CO<sub>2</sub> به ازای هر کیلوگرم گرافن است. با این حال، مقدار GWP حاصل از این روش همچنان ۶۸ درصد بیشتر از مقدار محاسبه شده برای گرافن تولید شده از ضایعات چوب صنوبر در مطالعه حاضر است.

جدول ۲- نتایج ارزیابی چرخه حیات برای تولید یک کیلوگرم گرافن از سه پیش ماده چوب صنوبر، پوست موز و کاه گندم

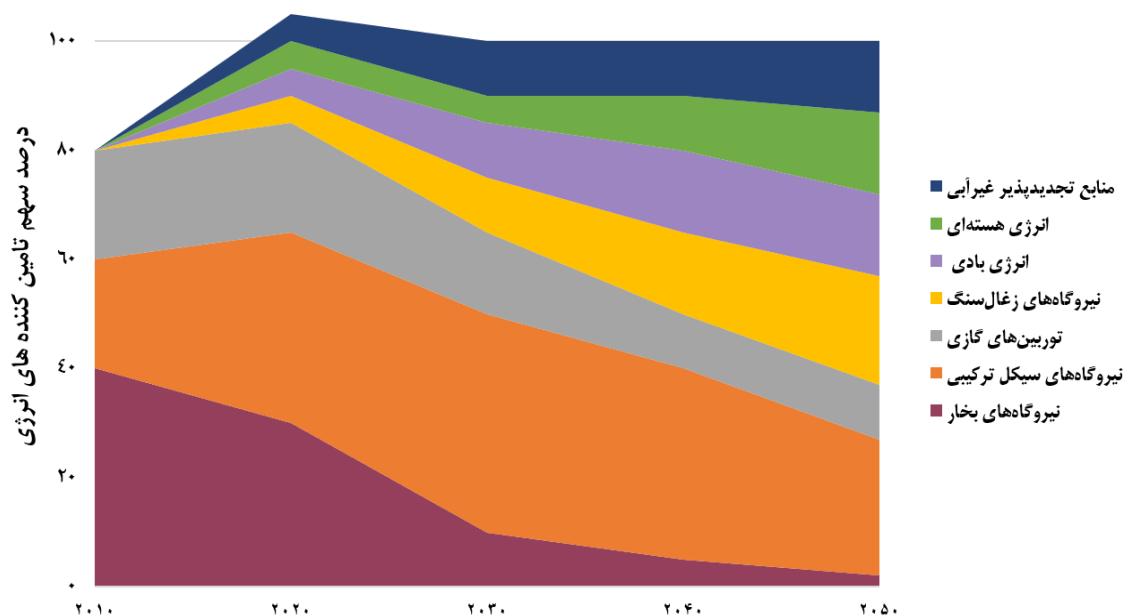
| رده پیامد                      | واحد                     | ضایعات چوب صنوبر | ضایعات پوست موز | ضایعات کاه گندم |
|--------------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| استفاده از زمین                | m <sup>2</sup> a crop eq | ۰/۷۹۷۷           | ۲/۹۷۸۴          | ۴/۰۷۱۲          |
| مصرف آب                        | m <sup>3</sup>           | ۰/۴۷۸۸           | ۲/۶۲۸۴          | ۴/۴۳۴۹          |
| کمبود منابع فسیلی              | kg oil eq                | ۳۹/۶۴۲۵          | ۱۰۵/۲۶۲۷        | ۲۴۵/۵۲۰۰        |
| کمبود منابع معدنی              | kg Cu eq                 | ۰/۱۷۴۹           | ۰/۵۲۴۷          | ۰/۹۶۱۱          |
| گرمایش جهانی                   | kg CO <sub>2</sub> eq    | ۱۲۲/۴۹۴۶         | ۱۰۷/۶۸۹۹        | ۵۸۰/۹۱۲۲        |
| تشکیل ذرات معلق ریز            | kg PM <sub>2.5</sub> eq  | ۰/۰۹۴۳           | ۰/۲۸۵۷          | ۰/۵۶۶۸          |
| تشکیل اوزون، سلامت انسان       | kg NO <sub>x</sub> eq    | ۰/۲۰۵۶           | ۰/۵۸۱۷          | ۱/۱۹۷۷          |
| تشکیل اوزون، اکوسیستم زمینی    | kg NO <sub>x</sub> eq    | ۰/۲۳۳۱           | ۰/۶۴۸۲          | ۱/۳۳۸۹          |
| سمیت انسانی، غیرسرطانی         | kg 1,4-DCB               | ۳۵/۵۳۲۵          | ۱۱۷/۰۳۷۲        | ۲۰۲/۵۲۹۰        |
| سمیت انسانی، سرطانی            | kg 1,4-DCB               | ۳/۰۵۰۲           | ۹/۳۲۶۲          | ۱۷/۳۰۵۶         |
| تشعشعات یونیزه کننده           | kBq Co-60 eq             | ۳/۸۸۱۸           | ۱۲/۵۴۳۰         | ۲۵/۴۵۰۳         |
| سمیت اکولوژیکی آب شیرین        | kg 1,4-DCB               | ۱/۹۵۸۴           | ۶/۴۹۹۸          | ۱۲/۸۹۴۱         |
| سمیت اکولوژیکی دریایی          | kg 1,4-DCB               | ۲/۶۰۳۷           | ۸/۸۵۸۷          | ۱۶/۸۸۳۳         |
| سمیت اکولوژیکی زمینی           | kg 1,4-DCB               | ۲۱۹/۷۴۶۷         | ۶۶۵/۹۵۸۴        | ۱۲۳۶/۸۱۹۷       |
| یوتریفیکاسیون آب شیرین         | kg P eq                  | ۰/۰۰۹۹           | ۰/۰۳۶۳          | ۰/۰۶۰۵          |
| یوتریفیکاسیون دریایی           | kg N eq                  | ۰/۰۰۱۷           | ۰/۰۰۴۸          | ۰/۰۰۹۶          |
| اسیدی شدن زمینی                | kg SO <sub>2</sub> eq    | ۰/۲۲۹۰           | ۰/۶۶۳۹          | ۱/۳۶۶۶          |
| تخریب لایه اوزون در استراتوسفر | kg CFC <sub>11</sub> eq  | ۰                | ۰/۰۰۰۱          | ۰/۰۰۰۲          |



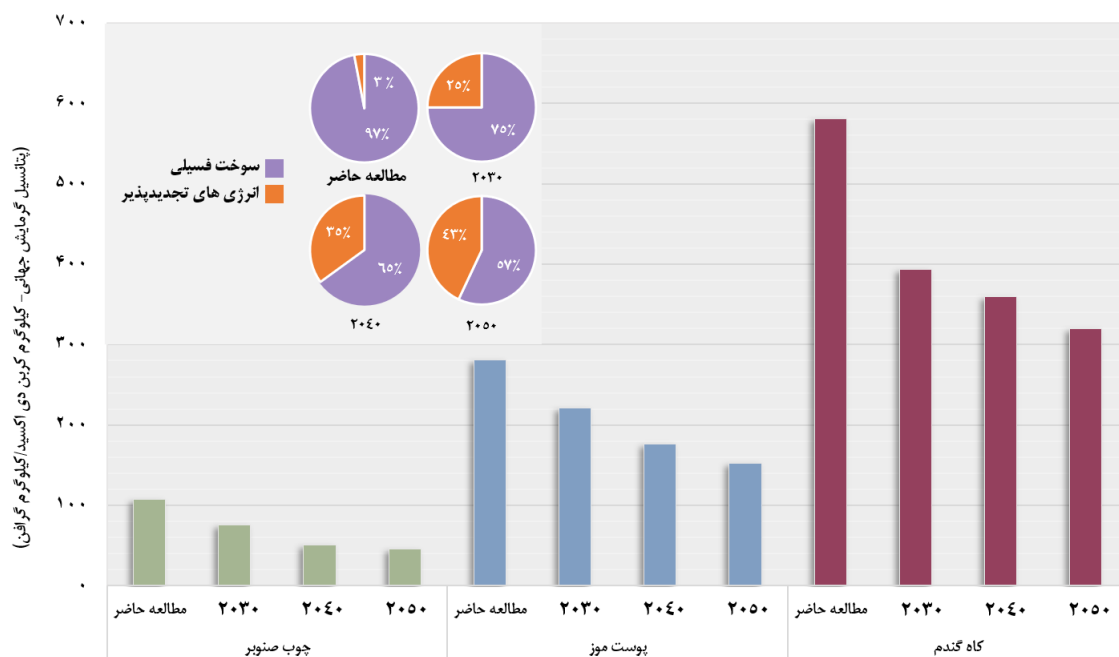
شکل ۲- نتایج پتانسیل گرمایش جهانی و سهم فرایندهای مختلف برای تولید یک کیلوگرم گرافن از سه پیش ماده زیستی

**نتایج بررسی سناریوهای آینده:** نتایج ارزیابی چرخه حیات نشان می‌دهند که برق بیشترین تأثیر را بر پتانسیل گرمایش جهانی داشته است. در واقع، برق مورد استفاده در فرآیند پیرولیز، که شامل کربونیزاسیون و فعال‌سازی است، به‌نظر می‌رسد که مؤثرترین عامل در افزایش گرمایش جهانی باشد. این نتیجه مشهود در پژوهش‌های دیگری که به سنتز مواد کربنی از طریق سیستم پیرولیز پرداخته‌اند نیز مشاهده شده است. ترکیب فعلی برق در ایران به‌شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته است و بیش از ۹۷/۵ درصد از آن را تشکیل می‌دهد که به‌طور قابل توجهی به آلودگی محیط‌زیست و انتشار  $\text{CO}_2$  کمک می‌کند (Noorollahi et al., 2021). به‌طور خاص، گاز طبیعی بیشترین سهم را در تولید برق ایران دارد و حدود ۸۱ درصد از کل برق تولیدی را شامل می‌شود، در حالی که نفت ۱۴ درصد را تشکیل می‌دهد. انرژی آبی مهم‌ترین منبع تجدیدپذیر است و ۳-۴ درصد از ترکیب برق را به‌خود اختصاص می‌دهد، در حالی که سایر منابع تجدیدپذیر، شامل باد، خورشید و زیست‌توده، به‌طور جمعی کمتر از ۱-۲ درصد از تولید برق ملی را تأمین می‌کنند (Zamanipour et al., 2023) (شکل ۳).

براساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، ترکیب درصدی منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر و سوخت‌های فسیلی از سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ به‌طور قابل توجهی پتانسیل گرمایش جهانی را برای تولید ۱ کیلوگرم گرافن از هر سه پیش‌ماده کاهش می‌دهد. به‌طور ویژه، GWP برای پیش‌ماده‌های مختلف به این شکل کاهش می‌یابد: برای کاه گندم، در مقایسه با سناریوی فعلی، شاهد کاهش قابل توجهی بین ۳۲ تا ۴۵ درصد از سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ هستیم. این در حالی است که این میزان برای پوست موز، بین ۲۱ تا ۴۵ درصد و برای پسماند چوب صنوبر بین ۲۹ تا ۵۷ درصد است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد انرژی‌های تجدیدپذیر در ترکیب منابع برق تأثیر به‌سزایی در کاهش GWP دارد. علاوه بر این، یافته‌ها بر نقش حیاتی انتقال به انرژی‌های تجدیدپذیر در دستیابی به اهداف پایداری تأکید دارند، به‌ویژه در کاهش اثرات محیط‌زیستی تولید گرافن. روندهای مشاهده‌شده نشان می‌دهند که سیاست‌های انرژی آینده که بر ادغام منابع تجدیدپذیر تمرکز دارند، می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرات کربنی فرآیندهای صنعتی مانند سنتز گرافن ایفا کنند. این امر به‌ویژه با توجه به تأثیرات شدید تغییرات اقلیمی در سطح جهانی و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، اهمیت بالایی پیدا می‌کند. در این راستا، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی برای دستیابی به یک آینده پایدار و کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی مطرح شود.



شکل ۳- روند سهم منابع مختلف انرژی در تولید برق ایران (۲۰۱۰-۲۰۵۰) (Aryanpur et al., 2019)



شکل ۴- نتایج GWP برای تولید ۱ کیلوگرم گرافن از سه پیش ماده چوب صنوبر، پوست موز و کاه گندم، مرتبط با تغییرات در زنجیره تأمین برق از سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰

## بحث و نتیجه گیری

این مطالعه نشان داد که تولید گرافن از ضایعات زیستی می تواند یک گزینه پربازده و پایدار برای کاهش اثرات محیط زیستی ناشی از تولید این ماده با ارزش باشد. ارزیابی چرخه حیات فرآیند تولید گرافن از پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر اثرات محیط زیستی این فرآیند را به طور دقیق بررسی کرد و نشان داد که ترکیب منابع انرژی می تواند تأثیر زیادی بر کاهش یا افزایش اثرات محیط زیستی داشته باشد. نتایج نشان دادند که گرافن تولید شده از کاه گندم بالاترین میزان پتانسیل گرمایش جهانی را به خود اختصاص داده است، در حالی که استفاده از چوب صنوبر به عنوان پیش ماده، اثرات کمتری در گرم شدن جهانی ایجاد می کند. این یافته ها به اهمیت انتخاب پیش ماده های مناسب برای تولید گرافن اشاره دارند که می تواند به کاهش اثرات منفی محیط زیستی کمک کند. مهم ترین عامل تأثیرگذار در این ارزیابی، مصرف انرژی و تأمین آن از منابع فسیلی است. مصرف برق در مراحل مختلف فرآیند تولید گرافن، به ویژه در فرآیند پیرولیز، بزرگ ترین سهم را در تمامی سناریوهای بررسی شده دارد. برای پوست موز، کاه گندم و چوب صنوبر، مصرف برق به ترتیب ۷۲/۱ درصد، ۸۱/۷ درصد و ۸۲/۱ درصد از کل تأثیرات محیط زیستی را به خود اختصاص داده است. این نشان دهنده نقش برجسته انرژی مصرفی در انتشار گازهای گلخانه ای است. این نتایج با توجه به وضعیت کنونی ترکیب منابع برق در ایران، که عمدتاً به سوخت های فسیلی وابسته است، به ویژه گاز طبیعی و نفت، اهمیت تغییر به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر را تأکید می کند.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در ترکیب برق ایران از سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰، پتانسیل گرمایش جهانی برای تولید گرافن را به طور قابل توجهی کاهش می دهد. به ویژه در تولید گرافن از کاه گندم و پوست موز، این کاهش، قابل توجه است. این یافته ها می توانند به سیاست گذاران انرژی کمک کنند تا استراتژی هایی برای ادغام منابع تجدیدپذیر در شبکه برق کشور طراحی کنند و بدین ترتیب به تحقق اهداف پایداری و حفاظت از محیط زیست نزدیک تر شوند. علاوه بر این، بررسی روند توسعه انرژی های تجدیدپذیر در ایران و ظرفیت های موجود در این حوزه، مانند انرژی بادی و خورشیدی، به ویژه در مناطق خاص ایران، می تواند کمک شایانی به بهبود پایداری محیط زیستی فرآیندهای صنعتی مانند تولید گرافن کند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به طور مستقیم می تواند منجر به کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و کاهش اثرات منفی محیط زیستی ناشی از تولید گرافن گردد.

نتایج این مطالعه تأکید می‌کنند که ترکیب انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند تولید گرافن از ضایعات زیستی می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای کاهش اثرات محیط‌زیستی باشد و پیشنهاد می‌شود که برای بهینه‌سازی تولید گرافن، به‌ویژه در مقیاس‌های صنعتی، باید به‌طور جدی به استفاده از این منابع انرژی توجه شود. این رویکرد نه تنها اثرات محیط‌زیستی تولید گرافن را کاهش می‌دهد بلکه به ترویج فناوری‌های پایدار و اقتصاد چرخه‌ای کمک می‌کند.

## سپاسگزاری

تحقیق حاضر با حمایت مالی از طرف بنیاد ملی علوم ایران (گرنٲ شماره ۴۰۰۳۹۷۸) و دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است.

## References

- Aluri, S., Syed, A., Flick, D.W., Muzzy, J.D., Sievers, C., Agrawal, P.K., 2018. Pyrolysis and gasification studies of model refuse derived fuel (RDF) using thermogravimetric analysis. *Fuel Processing Technology* 179, 154–166.
- Arvidsson, R., Kushnir, D., Sandén, B.A., Molander, S., 2014. Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction. *Environmental Science & Technology* 48(8), 4529–4536.
- Aryanpur, V., Atabaki, M.S., Marzband, M., Siano, P., Ghayoumi, K., 2019. An overview of energy planning in Iran and transition pathways towards sustainable electricity supply sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112, 58–74.
- Bahmei, F., Bahramifar, N., Younesi, H., Tolstoy, V., 2020. Synthesis of porous graphene nanocomposite and its excellent adsorption behavior for erythromycin antibiotic. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics* 11(2), 214–222.
- Beloin-Saint-Pierre, D., Hischier, R., 2021. Towards a more environmentally sustainable production of graphene-based materials: Building on current knowledge to offer recommendations. *International Journal of Life Cycle Assessment* 26(2), 327–343.
- Chen, W., Gong, M., Li, K., Xia, M., Chen, Z., Xiao, H., Fang, Y., Chen, Y., Yang, H., Chen, H., 2020. Insight into KOH activation mechanism during biomass pyrolysis: Chemical reactions between O-containing groups and KOH. *Applied Energy* 278, 115730.
- Cossutta, M., McKechnie, J., Pickering, S.J., 2017. A comparative LCA of different graphene production routes. *Green Chemistry* 19(24), 5874–5884.
- Cossutta, M., Vretenar, V., Centeno, T.A., Kotrusz, P., McKechnie, J., Pickering, S.J., 2020. A comparative life cycle assessment of graphene and activated carbon in a supercapacitor application. *Journal of Cleaner Production* 242, 118468.
- Crenna, E., Secchi, M., Benini, L., Sala, S., 2019. Global environmental impacts: Data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 24(10), 1851–1877.
- Ekhlesi, L., Younesi, H., Rashidi, A., Bahramifar, N., 2018. Populus wood biomass-derived graphene for high CO<sub>2</sub> capture at atmospheric pressure and estimated cost of production. *Process Safety and Environmental Protection* 113, 97–108.
- Fathi, A., Ghayedhosseini, A., Salehi, M., 2023. Optimizing Wind-Solar Power Plants: Novel Structures for Identifying Potential Sites and Capacity Ratios in Iran. *Journal of Energy Management and Technology*.
- Gomez-Martin, A., Martinez-Fernandez, J., Ruttart, M., Winter, M., Placke, T., Ramirez-Rico, J., 2019. Porous graphene-like carbon from fast catalytic decomposition of biomass for energy storage applications. *ACS Omega* 4(17), 21446–21458.
- Heidari, A., Hajinezhad, A., Aslani, A., 2019. A sustainable power supply system, Iran's opportunities via bioenergy. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 38(1), 171–188.
- Heydarzadeh, S., Arena, C., Vitale, E., Rahimi, A., Mirzapour, M., Nasar, J., Kisaka, O., Sow, S., Ranjan, S., Gitari, H., 2023. Impact of Different Fertilizer Sources under Supplemental Irrigation and Rainfed Conditions on Eco-Physiological Responses and Yield Characteristics of Dragon's Head (*Lallemantia iberica*). *Plants* 12(8), 1–21.

- Idris, M.O., Guerrero-Barajas, C., Kim, H.-C., Yaqoob, A.A., Ibrahim, M.N.M., 2023. Scalability of biomass-derived graphene derivative materials as viable anode electrode for a commercialized microbial fuel cell: A systematic review. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 55, 277-292.
- Jin, X.-J., Yu, Z.-M., Wu, Y.U., 2012. Preparation of activated carbon from lignin obtained by straw pulping by KOH and K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> chemical activation. *Cellulose Chemistry and Technology* 46(1), 79.
- Kabenge, I., Omulo, G., Banadda, N., Seay, J., Zziwa, A., Kiggundu, N., 2018. Characterization of banana peels wastes as potential slow pyrolysis feedstock. *Journal of Sustainable Development* 11(2), 14-14
- Kang, J., Shin, D., Bae, S., Hong, B.H., 2012. Graphene transfer: Key for applications. *Nanoscale* 4(18), 5527-5537.
- Kazemi, A., 2018. Synthesis and life cycle assessment of graphene oxide nanosheets produced from lignocellulosic agricultural wastes and modified to magnetite composite functionalized with thiol groups to remove mercury (II) from aqueous solutions. Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Khanam, P.N., Popelka, A., Alejji, M., Al Maadeed, M.A., 2017. Biotechnological production process and life cycle assessment of graphene. *Journal of Nanomaterials* 2017.
- Levchuk, I., Lähde, A., Mešćeriakovas, A., Mešćeriakovè, S.-M., Moreno-Andrés, J., Murashko, K., 2023. Challenges of synthesizing graphene-like and graphitic structures from biomass-based lignocellulosic wastes and its applications. In: *Graphene Extraction from Waste*. Elsevier, pp. 173-212.
- Lühr, C., Pecenka, R., 2020. Development of a model for the fast analysis of polymer mixtures based on cellulose, hemicellulose (xylan), lignin using thermogravimetric analysis and application of the model to poplar wood. *Fuel* 277, 118169.
- Munuera, J., Britnell, L., Santoro, C., Cuéllar-Franca, R., Casiraghi, C., 2022. A review on sustainable production of graphene and related life cycle assessment. *2D Materials* 9(4).
- Noorollahi, Y., Lund, H., Nielsen, S., Thellufsen, J.Z., 2021. Energy transition in petroleum rich nations: Case study of Iran. *Smart Energy* 3, 100026.
- Nowrouzi, M., Behin, J., Younesi, H., Bahramifar, N., Charpentier, P.A., Rohani, S., 2017. An enhanced counter-current approach towards activated carbon from waste tissue with zero liquid discharge. *Chemical Engineering Journal* 326, 934-944.
- Obraztsov, A.N., 2009. Making graphene on a large scale. *Nature Nanotechnology* 4(4), 212-213.
- Pasangulapati, V., Ramachandriya, K.D., Kumar, A., Wilkins, M.R., Jones, C.L., Huhnke, R.L., 2012. Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass. *Bioresource Technology* 114, 663-669.
- Rajendran, K., 2017. Effect of moisture content on lignocellulosic power generation: Energy, economic and environmental impacts. *Processes* 5(4), 78.
- Ranjan, S., Kumar, S., Dutta, S.K., Sow, S., Ghosh, M., 2022. Effect of integrated nutrient management in rice on vegetative growth and economic profitability of wheat under long term rice-wheat cropping system. *Journal of Cereal Research* 14(2), 198-203.
- Sinclair, R.C., Suter, J.L., Coveney, P.V., 2019. Micromechanical exfoliation of graphene on the atomistic scale. *Physical Chemistry Chemical Physics* 21(11), 5716-5722.
- Sohrab, T., Rafiee, M., Karkoodi, S., Parvin, M., 2022. Estimation of the employment rate of wind power plants in Iran in the horizon of 2050. *International Journal of Ambient Energy* 43(1), 603-609.
- Torri, I.D.V., Paasikallio, V., Faccini, C.S., Huff, R., Caramão, E.B., Sacon, V., Oasmaa, A., Zini, C.A., 2016. Bio-oil production of softwood and hardwood forest industry residues through fast and intermediate pyrolysis and its chromatographic characterization. *Bioresource Technology* 200, 680-690.
- Tripathi, N., Hills, C.D., Singh, R.S., Atkinson, C.J., 2019. Biomass waste utilisation in low-carbon products: Harnessing a major potential resource. *NPJ Climate and Atmospheric Science* 2, 35.
- Vu, H.T., Scarlett, C.J., Vuong, Q.V., 2017. Effects of drying conditions on physicochemical and antioxidant properties of banana (*Musa cavendish*) peels. *Drying Technology* 35(9), 1141-1151.
- Wang, J., Heerwig, A., Lohe, M.R., Oschatz, M., Borchardt, L., Kaskel, S., 2012. Fungi-based porous carbons for CO<sub>2</sub> adsorption and separation. *Journal of Materials Chemistry* 22(28), 13911-13913.
- Wu, Y., Li, Y., Zhang, X., 2024. The Future of Graphene: Preparation from Biomass Waste and Sports Applications. *Molecules* 29(8), 1-19.

- Zamanipour, B., Ghadaksaz, H., Keppo, I., Saboohi, Y., 2023. Electricity supply and demand dynamics in Iran considering climate change-induced stresses. *Energy* 263, 126118.
- Zhang, C., Zheng, Y., Jing, J., Liu, Y., Huang, H., 2022. A comparative LCA study on aluminum electrolytic capacitors: From liquid-state electrolyte, solid-state polymer to their hybrid. *Journal of Cleaner Production* 375, 134044.