



Investigation and Comparison of the Effect of Pyrolysis Temperature on the Microstructure and Properties of Biochar Derived from *Platanus orientalis L.* Leaves

Mahdi Takalo ¹, Sepehr Shakerizadeh ¹, Iman Mobasherpour ^{1, 2*}, Esmail Salahi ³, Mansour Razavi ³,
 Mohammad Mehdi Sabzehmeidani ⁴

¹ MSc Student, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

² Associate Professor, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

³ Professor, Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

⁴ Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

*Corresponding Author's Email: i.mobasherpour@merc.ac.ir (Iman Mobasherpour)

Paper History:

Received: 2025-08-24

Revised: 2025-09-22

Accepted: 2025-11-13

Keywords:

Biochar,
 Pyrolysis,
 Temperature,
Platanus orientalis L. leaves

Abstract Biochar is a carbon-rich material obtained from the decomposition of biomass through various thermochemical processes in the absence or limitation of oxygen. Its characteristics and structure are directly influenced by the type of biomass and the thermal conditions of the process. Considering the wide-ranging role of biochar in environmental and agricultural fields, a thorough examination of the physical and structural properties of biochars produced from different biomass sources under varying temperature conditions is essential. This study focuses on the production of biochar from plane tree leaves (*Platanus orientalis L.*) through pyrolysis at three temperatures: 500°C, 550°C, and 600°C. The resulting biochars were analyzed and compared in terms of their physical and microstructural characteristics. According to the results, the biochar produced at 550°C exhibited the highest porosity (74.3%) and the greatest electrical conductivity in aqueous suspension (340.4 μS/cm) compared to those produced at 500°C and 600°C. These findings indicate that biochar produced at optimal temperature may demonstrate superior functional qualities. As a result, biochar produced at 550°C, with better physical properties and desirable surface performance and structure, has more advantages for environmental and agricultural applications than biochar produced at other temperatures.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.541645.1335>

URL: https://www.jamt.ir/article_234570.html

1. INTRODUCTION

In the modern world, rapid population growth and industrial development have led to a significant rise in energy demand. Conventional fossil fuels are both limited in availability and harmful to the environment, highlighting the urgent need for sustainable and renewable alternatives (Iwuozor, 2019). Among such alternatives, biochar is a promising carbon-rich material produced through the thermal processing of organic biomass derived from plant or animal sources (Shakerizadeh et al., 2024). The production of biochar contributes to environmental sustainability and creates a multifunctional material with many potential applications. Biochar is increasingly explored for its ability to adsorb pollutants such as heavy metals and pharmaceutical compounds from wastewater, making it useful for water purification and environmental remediation (Tan et al., 2022). It also improves soil health by enhancing nutrient retention, moderating soil pH, and increasing water-holding capacity, thereby supporting better plant growth (Zhang et al., 2017). In addition, biochar shows potential in energy-related applications, particularly in the production of supercapacitors and batteries, due to its porous structure and electrical conductivity. Pyrolysis is a common method for producing biochar. It involves decomposing

biomass at high temperatures in the absence or near absence of oxygen. The properties of the resulting biochar, such as porosity, surface area, and conductivity, are strongly influenced by factors including the type of biomass used, the temperature applied, and the rate of heating. This study presents a comparative analysis of biochar made from the leaves of the plane tree (*Platanus orientalis L.*) using three different pyrolysis temperatures. Key parameters such as apparent density, true density, total porosity, and electrical conductivity in water were measured to evaluate the structural and physical characteristics of the biochar. Using these leaves as biomass provides a novel and locally adaptable approach to sustainable biochar production, transforming organic waste into a valuable material for environmental and technological applications.

2. MATERIALS AND METHODS

Leaves of *Platanus orientalis L.*, collected from the Materials and Energy Research Center (Karaj), were washed, air-dried, and then oven-dried at 70°C for 48 hours. The dried leaves were milled and sieved (≤595 μm). The biomass was pyrolyzed in an alumina crucible at 500°C, 550°C, and 600°C for 30 minutes under an argon atmosphere, with a heating rate of 5°C/min. The electrical conductivity of the biochar aqueous suspension was measured using a CyberScan PCD6500

Please cite this article as: Takalo, M., Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., & Sabzehmeidani, MM. (2025). Investigation and Comparison of the Effect of Pyrolysis Temperature on the Microstructure and Properties of Biochar Derived from *Platanus orientalis L.* Leaves, *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 14, No. 3, 1-10. [in Persian]. <https://doi.org/10.30501/jamt.2025.541645.1335>



(Eutech Instruments, Singapore). SEM images were obtained using a Cambridge Instruments Stereoscan 360 SEM (England). Apparent density, true density, and total porosity were determined according to ASTM D2854-09 and validated by reference to several reputable research articles.

3. RESULTS AND DISCUSSION

SEM images of the biochars generally reveal agglomerates with rough and fractured surfaces, which, due to the presence of irregularities and numerous

cracks, can increase the number of surface active sites (Figure 1). The electrical conductivity measurements of the biochar suspensions show that the sample synthesized at 550°C exhibits the highest conductivity (340.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) among all samples. This higher conductivity indicates its greater potential for applications such as wastewater treatment through electrochemical processes (Figure 2). Furthermore, the evaluation of other physical properties of the biochars, including apparent density, true density, and total porosity, also favored the biochar synthesized at 550°C.

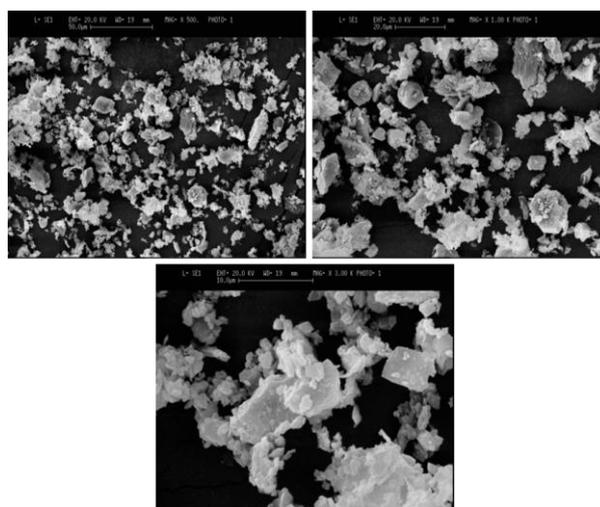


Figure 1. SEM images of the biochar produced at 550 °C at different scales.

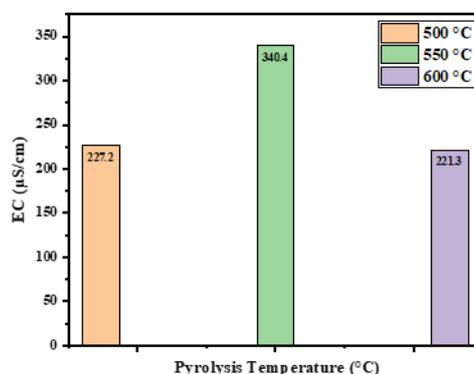


Figure 2. Electrical conductivity trend of biochar suspensions pyrolyzed at different temperatures.

4. CONCLUSION

This study investigated and compared the physical and microstructural properties of biochars derived from *Platanus orientalis* L. leaves pyrolyzed at 500°C, 550°C, and 600°C. The results showed that the biochar produced at 550°C exhibited the most favorable properties, including a porous and rough surface, higher apparent and true densities, the highest porosity (74.3%), and the greatest electrical conductivity (340.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$), making it more suitable for agricultural and environmental application.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to sincerely thank the Materials and Energy Research Center (MERC) in Karaj for providing laboratory facilities and equipment.

REFERENCES

- Iwuozor, K. O. (2019). Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. *Advanced Journal of Chemistry-Section A*, 2(2), 105-127. <https://doi.org/10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127>
- Shakerizadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., Sabzehmeidani, M. M., & Takalo, M. (2024). *Platanus orientalis* L. leaves residue-derived biochar: investigating the effects of synthesis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06320-8>
- Tan, Y., Wan, X., Zhou, T., Wang, L., Yin, X., Ma, A., & Wang, N. (2022). Novel Zn-Fe engineered kiwi branch biochar for the removal of Pb (II) from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127349. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127349>
- Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., & Boyd, S. E. (2017). Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. *Biomass and Bioenergy*, 105, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.024>



مقاله کامل پژوهشی

بررسی و مقایسه تأثیر دمای پیرولیز بر ریزساختار و ویژگی‌های بیوچار حاصل از پس ماند برگ درخت چنار

مهدی تکلو^۱، سپهر شاکری‌زاده^۱، ایمان مباحشرپور^{۲*}، اسماعیل صلاحی^۳، منصور رضوی^۳، محمد مهدی سبزه‌میدانی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳ استاد، پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، مازندران، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

کلیدواژه‌ها:

بیوچار،

پیرولیز،

دما،

برگ چنار

چکیده بیوچار ماده‌ای غنی از کربن است که از تجزیه زیست‌توده در فناوری‌های متنوعی از فرایندهای حرارتی-شیمیایی در غیاب یا محدودیت اکسیژن حاصل می‌شود. ویژگی‌ها و ساختار آن به‌طور مستقیم تحت تأثیر نوع زیست‌توده و شرایط دمایی فرایند قرار دارد. با توجه به نقش گسترده بیوچار در زمینه‌های محیط‌زیستی و کشاورزی، بررسی دقیق ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری بیوچارهای تولیدشده حاصل از زیست‌توده‌های مختلف در شرایط دمایی متفاوت ضروری است. این پژوهش به تولید بیوچار از پس‌ماند برگ‌های چنار (*Platanus orientalis L.*) در سه دمای ۵۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس از طریق فرایند پیرولیز پرداخته و ویژگی‌های فیزیکی و ریزساختاری حاصل را مورد تحلیل و مقایسه قرار داده است. براساس نتایج این پژوهش، بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس بیشترین درصد تخلخل ($0.74/3$) و بالاترین میزان هدایت الکتریکی سوسپانسیون آبی ($340/4$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) را نسبت به بیوچار تولیدشده در دماهای ۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان داد. در نتیجه، بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس با داشتن ویژگی‌های فیزیکی بهتر و عملکرد و ساختار سطحی مطلوب، نسبت به بیوچارهای تولیدشده در سایر دماها از مزیت‌های بیشتری برای کاربردهای محیط‌زیستی و کشاورزی برخوردار است.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2025.541645.1335>

URL: https://www.jamt.ir/article_234570.html

۱- مقدمه

تولید می‌کند که از قابلیت‌های کاربردی گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف برخوردار است (Adeniyi et al., 2023; Emenike et al., 2024). از جمله این کاربردها می‌توان به حذف مؤثر آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین و ترکیبات دارویی از آب و پساب‌های صنعتی و شهری اشاره کرد (Li et al., 2025; X. Liu et al., 2025). همچنین، این ماده ارزشمند در بهبود ویژگی‌های خاک از جمله افزایش حاصلخیزی (Yadav et al., 2023)، تعدیل pH (Liu et al., 2025)، بهبود ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی (Han et al., 2023) و در نتیجه، ارتقای رشد و عملکرد گیاهان (Pathak et al., 2024) نقش بسزایی دارد. افزون‌براین، استفاده از آن در حوزه تولید و ذخیره‌سازی انرژی، به‌ویژه در

در جهان امروزی که با رشد شتابان جمعیت و توسعه صنعتی روبه‌روست، نیاز به منابع انرژی بیش از هر زمان دیگر احساس می‌شود. منابع محدود سوخت‌های فسیلی نه تنها این نیاز را تأمین نمی‌کنند، بلکه پیامدهای مخربی برای محیط‌زیست به‌همراه دارند. در نتیجه، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند یک راهکار مؤثر برای رسیدن به آینده‌ای پایدار و پویا باشد (Adeniyi et al., 2024; Azni et al., 2023; Pourrajabian et al., 2024). بیوچار، ماده‌ای سرشار از کربن است که از طریق فرایندهای حرارتی بر روی زیست‌توده‌ای متشکل از مواد آلی با منشأ گیاهی یا حیوانی تولید می‌شود (Adeniyi et al., 2024). این فرایند، افزون‌بر مزایای محیط‌زیستی، ماده‌ای چندمنظوره

عهده‌دار مکاتبات: ایمان مباحشرپور

نشانی: ایران، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده‌ی سرامیک

پیام‌نگار: i.mobasherpour@merc.ac.ir

۵۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. در این مرحله، لیگنین به دلیل ساختار آروماتیک و پیوندهای متنوع، در گستره دمایی وسیع و به آهستگی تجزیه می‌شود. شکست پیوندهای آروماتیک موجب آزاد شدن ترکیبات فنولیک، متانول، متان، مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن می‌گردد. مرحله پنجم، مرحله تشکیل گازها و واکنش‌های ثانویه است که در دمای بالاتر از ۴۵۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. در نهایت در این مرحله، هیدروژن، مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های معطر چندحلقه‌ای تحت فرایند کراکینگ تشکیل می‌شوند ([Vuppaladadiyam et al., 2023](#)). ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بیوپچار حاصل از فرایند پیرولیز به عوامل متعددی بستگی دارد؛ از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به نوع زیست‌توده و شرایط دمایی فرایند، نظیر دمای واکنش، مدت‌زمان ماندگاری بیوپچار در دمای موردنظر، و شدت گرمادهی اشاره کرد ([Fakhar et al., 2025](#)). باتوجه به کاربردهای گسترده ذکرشده بیوپچار در حوزه‌های مختلف، شناخت ویژگی‌های ساختاری، ذاتی و فیزیکوشیمیایی آن برای بهینه‌سازی عملکرد بیوپچار امری ضروری است.

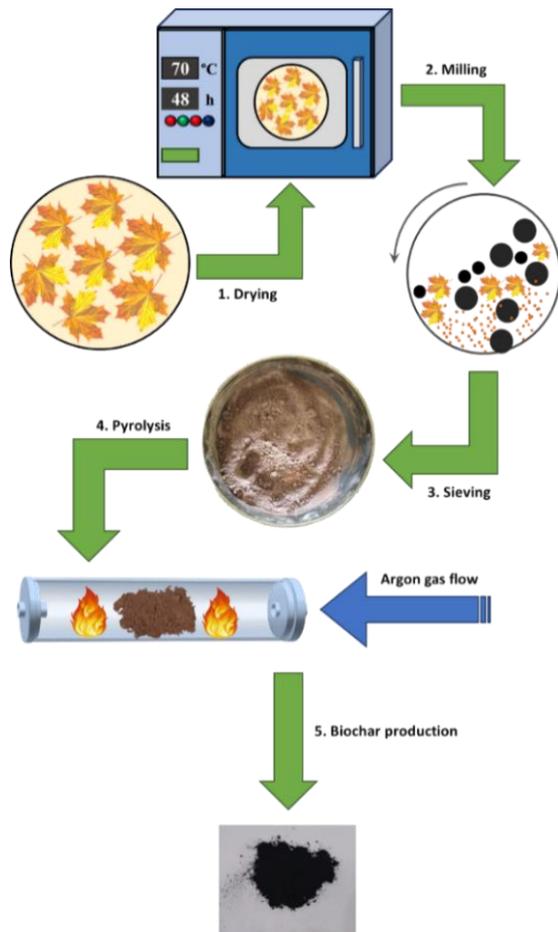
در این مطالعه، برای نخستین بار برخی از ویژگی‌های بیوپچار حاصل از برگ چنار (*Platanus orientalis L.*) در سه دمای مختلف پیرولیز و همچنین ریزساختار آن‌ها به صورت مقایسه‌ای بررسی شد. این تحقیق با تمرکز بر پارامترهای کلیدی مانند چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، تخلخل کل و هدایت الکتریکی بیوپچار در آب، توانسته است اثر دمای پیرولیز را بر ریزساختار و عملکرد بالقوه بیوپچار آشکار سازد. استفاده از این برگ‌ها به عنوان زیست‌توده، رویکردی نوین در تولید بیوپچار پایدار و بومی‌شده در راستای بهره‌برداری از پس‌ماند زیستی و مدیریت بهینه آن است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- تولید بیوپچار

برگهای درختان چنار (*Platanus orientalis L.*) که گونه‌ای بومی و خاص در برخی کشورهای خاورمیانه از جمله ایران است، از محوطه پژوهشگاه مواد و انرژی کرج جمع‌آوری شدند. به منظور حذف آلودگی‌های سطحی، برگ‌ها با آب شسته شده و در محیطی تمیز قرار داده شدند تا رطوبت سطحی آن‌ها خشک شود. سپس، برای حذف رطوبت میان‌باقی، نمونه‌ها به مدت ۴۸

ساخت ابرخازن‌ها ([Kwarciany et al., 2024](#)) و باتری‌ها ([Shi et al., 2024](#)) از دیگر زمینه‌های مهم تحقیق و توسعه این ماده به‌شمار می‌رود. این موارد تنها بخشی از کاربردهای گسترده‌ای است که بیوپچار می‌تواند در حوزه‌هایی که نقش بنیادینی در تأمین نیازهای بشر امروز و تضمین پایداری زندگی برای نسل‌های آینده دارد، داشته باشد. فناوری‌های حرارتی مورد استفاده در تولید بیوپچار بسیار متنوع و گسترده‌اند و هر یک، بسته به کاربرد موردنظر، دارای مزایا و محدودیت‌هایی نسبت به یکدیگر هستند. روش پیرولیز معمولاً روشی ساده‌تر، قابل‌دسترس‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر برای تولید بیوپچار خالص به‌شمار می‌رود. در این فرایند، زیست‌توده تحت واکنش‌های ترموشیمیایی و در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن محدود، به بیوپچار تبدیل می‌شود ([del Carmen Recio-Ruiz et al., 2025](#); [Zou et al., 2024](#)). زیست‌توده‌های گیاهی عمدتاً شامل سه جزء کلیدی سلولز (جزء اصلی و دارای بلندترین زنجیره پلیمری)، همی‌سلولز (پلیمری با زنجیره کوتاه‌تر و شاخه‌دارتر)، و لیگنین (ایجاد دیواره سلولی و ساختار مقاوم برای گیاه) هستند. سازوکار عملیات پیرولیز زیست‌توده شامل پنج مرحله اصلی بوده که هر کدام در یک بازه دمایی رخ می‌دهد و محصولات متفاوتی به دنبال دارد. مرحله اول، خشک شدن است که در بازه دمایی ۵۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. در این مرحله، رطوبت آزاد و آب موجود در ساختار گیاه تبخیر می‌شود و تنها بخار آب به‌عنوان محصول واکنش خارج می‌شود. مرحله دوم، تجزیه همی‌سلولز است که در بازه دمایی ۱۸۰ تا ۲۸۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. در این مرحله، تجزیه در دمای نسبتاً پایین رخ داده و استات‌های موجود در زنجیره آن می‌شکنند. در نتیجه این واکنش، استیک‌اسید، دی‌اکسیدکربن، مقادیر کمی قند و گازهای سبک آزاد می‌شوند. مرحله سوم، تجزیه سلولز است که در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۳۷۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. در این مرحله، زنجیره‌های سلولزی دچار شکست حرارتی شده و ترکیباتی چون لووگلوکوزان ($C_6H_{10}O_5$)، فوران‌ها (C_4H_4O)، مونوکسیدکربن و بخار آب تولید می‌کنند. این گام، اصلی‌ترین مرحله تولید قندها و ترکیبات آلی فرار است. تشکیل بیوپچار از این مرحله شروع می‌شود و با افزایش دما طی مراحل بعدی، ساختار بیوپچار آروماتیک‌تر و به تثبیت بیشتری می‌رسد. مرحله چهارم، تجزیه لیگنین است که در بازه دمایی گسترده ۲۰۰ تا



شکل ۱. شمای کلی مراحل تولید بیوچار از پیرولیز بقایای برگ چنار

برای انجام آزمون هدایت الکتریکی بیوچارها در آب، ابتدا مقدار ۰/۵ گرم از هر یک از بیوچارهای تولیدشده در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، در بشرهای جداگانه حاوی ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد. سپس جهت اختلاط کامل محتویات، بشرها به مدت ۲۴ ساعت روی همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه^۱ (rpm) قرار گرفتند. پس از گذشت این مدت، هدایت الکتریکی محلول‌ها با استفاده از دستگاه CyberScan PCD6500 ساخت شرکت Eutech Instruments کشور سنگاپور اندازه‌گیری شد (Balmuk et al., 2023).

برای محاسبه چگالی ظاهری، حجم مشخصی از یک استوانه مدرج با بیوچار پر شد و جرم بیوچار که این حجم از استوانه را پر کرده، اندازه‌گیری شد. سپس از طریق رابطه (۱) چگالی ظاهری بیوچارها محاسبه گردید (ASTM, 2019):

ساعت در آن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند. در ادامه، برگهای خشک‌شده با استفاده از آسیاب گلوله‌ای، پودر شدند و جهت یکنواخت‌سازی اندازه ذرات، از الک مش ۳۰ عبور داده شدند (حداکثر اندازه ذرات حدود ۵۹۵ میکرومتر). ماده خام حاصل به‌عنوان زیست‌توده در بوته‌ای از جنس آلومینا قرار گرفته و برای انجام فرایند پیرولیز به درون کوره تیوبی منتقل شد. به‌منظور جلوگیری از حضور اکسیژن و انجام پیرولیز در شرایط بی‌هوازی، گاز آرگون به‌صورت مداوم به درون کوره دمیده شد.

فرایند پیرولیز در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس انجام شد. نرخ افزایش دما ۵ درجه سلسیوس بر دقیقه و زمان ماندگاری ۳۰ دقیقه در دمای نهایی، برای هرکدام از بیوچارهای تولیدشده، در نظر گرفته شد. شکل ۱، فرایند آماده‌سازی ماده خام زیست‌توده برگ چنار و تولید بیوچار حاصل از پیرولیز آن را به‌صورت گام‌به‌گام نمایش می‌دهد.

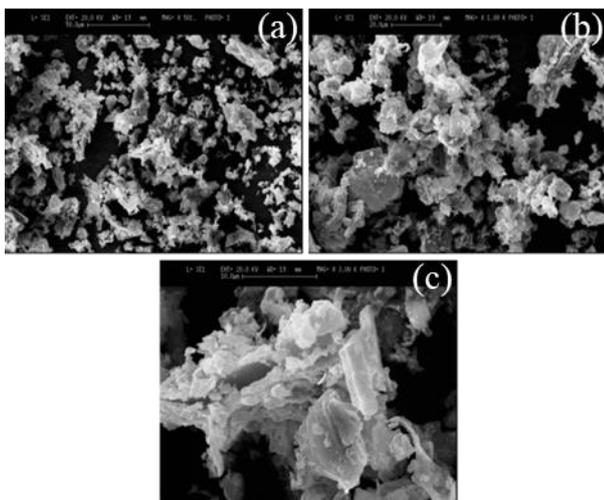
۲-۲- روش تعیین مشخصات ساختاری و عملکردی بیوچار
برای انجام آزمون‌ها و اندازه‌گیری‌های مختلف در این مطالعه، بیوچارهای تولیدشده در هر یک از سه دمای مختلف، به‌صورت جداگانه آسیاب و سپس از الک با مش ۱۰۰ عبور داده شدند تا ذراتی با اندازه یکنواخت به‌دست آید (حداکثر اندازه ذرات حدود ۱۵۰ میکرومتر). سپس بیوچارهای الک‌شده در آونی با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا رطوبت احتمالی آن‌ها به‌طور کامل حذف شده و نمونه‌ها کاملاً خشک شوند.

تنحصی Expert HighScore Plus استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریخت‌شناسی سطحی

ریخت‌شناسی سطحی بیوپچارهای حاصل از فرایند پیرولیز در دماهای ۵۰۰ (شکل ۲)، ۵۵۰ (شکل ۳) و ۶۰۰ درجه سلسیوس (شکل ۴)، در مقیاس‌های ۵۰، ۲۰ و ۱۰ میکرومتر، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی دماهای بررسی‌شده، ساختار کلی بیوپچار به صورت توده‌هایی با سطوح زبر، شکسته و نامنظم مشاهده شد. این نوع ساختار به دلیل وجود ناهمواری‌ها و شکستگی‌های متعدد، افزایش سطح تماس و تعداد نقاط فعال سطحی را به همراه خواهد داشت.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از بیوپچار تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، در مقیاس‌های: (a) ۵۰ میکرومتر (b) ۲۰ میکرومتر (c) ۱۰ میکرومتر

$$\rho_A = \frac{m}{v} \quad (1)$$

بر اساس رابطه (۱)، مقادیر ρ_A ، m و v ، به ترتیب نمایانگر چگالی ظاهری برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، جرم بیوپچار برحسب گرم، و حجم اشغال‌شده در استوانه برحسب سانتی‌متر مکعب هستند.

برای محاسبه چگالی حقیقی، ابتدا مقدار مشخصی از بیوپچار وزن شد (m_1). پیکنومتر ۲۵ میلی‌لیتری تا خط نشان مخصوص آن با آب مقطر پر شد و وزن گردید (m_2). بیوپچار وزن‌شده به پیکنومتر دارای آب مقطر افزوده شد و وزن کل آنها یادداشت گردید (m_3). سپس با استفاده از رابطه (۲)، حجم ذرات بیوپچار (V_t) محاسبه شد:

$$V_t = \frac{m_3 - m_2}{\rho_A} \quad (2)$$

با استفاده از مقادیر به دست‌آمده m_1 و V_t ، چگالی حقیقی از طریق رابطه (۳)، محاسبه شد:

$$\rho_T = \frac{m_1}{V_t} \quad (3)$$

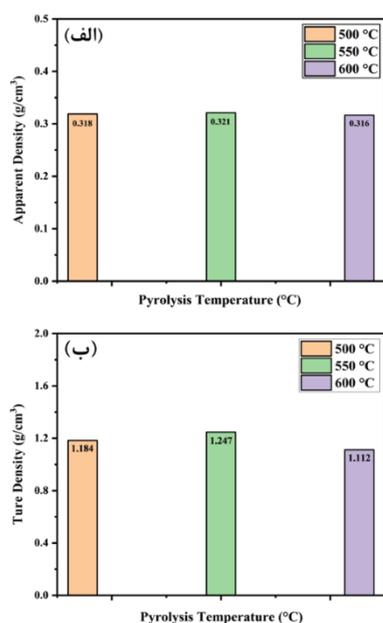
با مشخص شدن مقادیر چگالی ظاهری و حقیقی، مقدار درصد تخلخل کل (P_t) هر یک از بیوپچارها، مطابق با رابطه (۴) به دست آمد (Brewer et al., 2014):

$$P_t = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_T} \quad (4)$$

برای بررسی و مقایسه ریزساختار بیوپچارهای تولیدشده، تصاویر میکروسکوپی با استفاده از دستگاه Cambridge Instruments Stereoscan 360 SEM Microscope System ساخت کشور انگلستان گرفته شد.

به منظور شناسایی گروه‌های عاملی شیمیایی نمونه بهینه بیوپچار، از دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه^۱ (FT-IR) شرکت Bruker، مدل VECTOR 33 (آلمان) استفاده شد. تعداد اسکن‌ها ۴۵ مرتبه و وضوح طیفی 4 cm^{-1} تنظیم گردید. همچنین، برای تعیین فازهای بلوری نمونه بهینه بیوپچار، از دستگاه پراش پرتو ایکس^۲ (XRD) شرکت Phillips، مدل PW3710، کشور هلند استفاده شد. این دستگاه با تابش Cu-K α کار کرده و گام اسکن آن بر روی 0.02° درجه تنظیم شد. به منظور تحلیل و شناسایی پیک‌های الگوی پراش پرتو ایکس، از نرم‌افزار

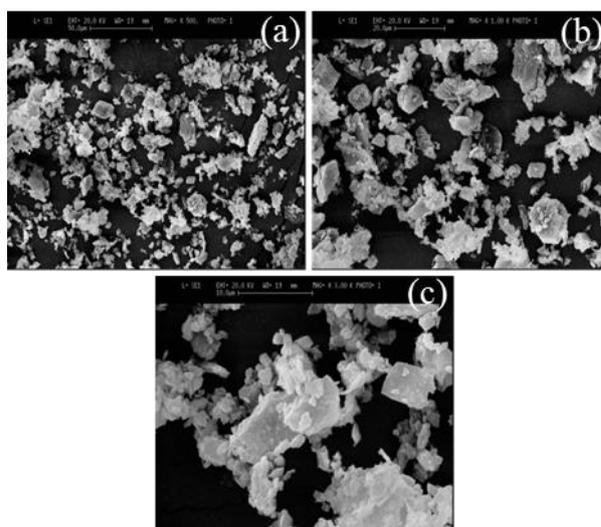
(2012). از آنجاکه این فضاهای خالی در محاسبه چگالی ظاهری لحاظ می‌شوند اما فاقد جرم هستند، مطابق انتظار، مقادیر چگالی ظاهری بیوچارها همواره کمتر از چگالی حقیقی آن‌ها خواهد بود. باتوجه به شکل‌های ۵-الف و ۵-ب، مشاهده می‌شود که بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، دارای چگالی ظاهری (با مقدار ۰/۳۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و چگالی حقیقی (با مقدار ۱/۲۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیشتری نسبت به دو بیوچار تولیدشده در دماهای ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس است. مقادیر چگالی بالاتر این بیوچار نشان‌دهنده ساختار متراکم‌تر و حضور بیشتر کربن پایدار است. در کاربردهای حوزه کشاورزی، این ویژگی موجب می‌شود بیوچار مدت بیشتری در خاک باقی بماند و اثرات بلندمدتی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و مواد مغذی، و ارتقا پایداری کلی خاک ایفاء کند (Lehmann & Joseph, 2012).



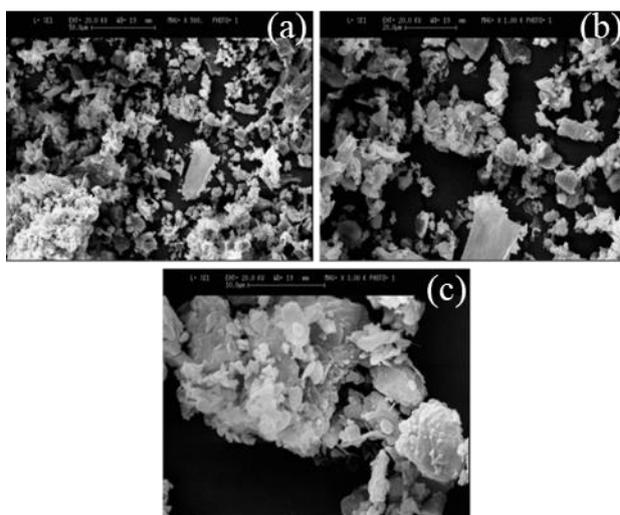
شکل ۵. تغییرات چگالی ظاهری (الف) و حقیقی (ب) بیوچارهای تولیدشده در دماهای مختلف پیرولیز (۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس)

۳-۳- بررسی روند تغییرات تخلخل کل

شکل ۶، درصد تخلخل کل بیوچارهای تولیدشده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. بیشترین تخلخل در دمای ۵۵۰ درجه مشاهده شد (۷۴/۳٪). این موضوع نشان می‌دهد که در این دما، شرایط تجزیه حرارتی به‌گونه‌ای بوده است که ساختار متخلخل بیشتری ایجاد شده است. در دمای ۵۰۰ درجه، احتمالاً تخریب



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، در مقیاس‌های: (a) ۵۰ میکرومتر (b) ۲۰ میکرومتر (c) ۱۰ میکرومتر

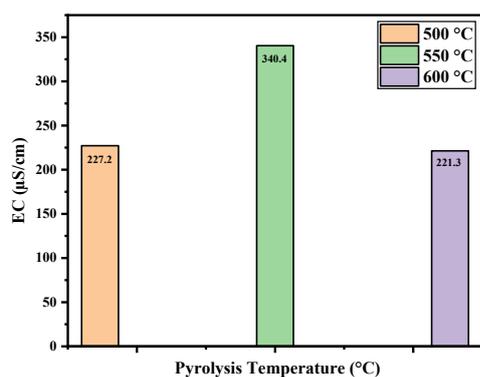


شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از بیوچار تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، در مقیاس‌های: (a) ۵۰ میکرومتر (b) ۲۰ میکرومتر (c) ۱۰ میکرومتر

۳-۲- ارزیابی تغییرات چگالی ظاهری و حقیقی

در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب، به‌ترتیب تغییرات چگالی ظاهری و چگالی حقیقی بیوچار تولیدشده از پس‌ماند برگ چنار در دماهای مختلف پیرولیز (۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) نمایش داده شده است. چگالی ظاهری به‌عنوان نسبت جرم ماده به حجم کلی آن، شامل فضاهای خالی بین ذرات، تعریف می‌شود. درمقابل، چگالی حقیقی بیانگر نسبت جرم ماده به حجم واقعی بخش جامد آن است و فضاهای خالی میان ذرات یا تخلخل‌های درونی را در نظر نمی‌گیرد (Lehmann & Joseph).

تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس نسبت به بیوپچارهای تولید شده در دماهای ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه، نشان داد این نمونه پتانسیل بیشتری برای استفاده در کاربردهایی نظیر تصفیهٔ پساب از طریق فرایندهای الکتروشیمیایی و ساخت الکترودهای سلول های سوختی دارد (Huggins et al., 2014; Zhang et al., 2020).



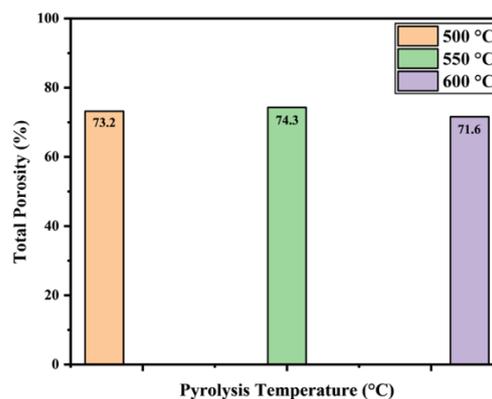
شکل ۷. روند تغییرات هدایت الکتریکی سوسپانسیون بیوپچارهای حاصل از پیرولیز در دماهای مختلف

۳-۵- ارزیابی بیوپچار بهینه از طریق آنالیزهای پراش اشعه ایکس و طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

شکل ۸-الف، طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه بیوپچار بهینه تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس را نشان می دهد. در این طیف، پیک هایی در طول موج های ۸۷۳، ۱۴۱۵، ۱۷۹۷ و 3380 cm^{-1} مشاهده می شود که بیانگر حضور گروه های عاملی شیمیایی مختلف است. این گروه ها به ترتیب طول موج های ذکر شده، شامل C-H (Li et al., 2017)، COOH- (Qiu et al., 2019)، C=O (Sizirci et al., 2021) و OH- (Yang et al., 2020) هستند. وجود گروه های کربوکسیل و هیدروکسیل در ماده، به دلیل قابلیت یونیزه شدن آسان در آب، موجب افزایش غلظت یون های H^+ و OH^- در محلول می شود. بنابراین، با افزایش تعداد این گروه های عاملی، میزان یون های آزاد شده و در نتیجه، هدایت الکتریکی محلول نیز بیشتر خواهد بود.

شکل ۸-ب، الگوی پراش اشعه ایکس بیوپچار بهینه تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس را نشان می دهد. در این الگوی پراش، وجود شش پیک روی سطوح بلوری نمایان است. این پیک ها به ترتیب در زوایای $29/4$ ، $36/1$ ، $39/5$ ، $43/2$ ، $47/5$ و $48/6$ درجه قرار گرفته اند. تحلیل الگوی پراش این ماده نشان

حرارتی کافی برای توسعه کامل تخلخل رخ نداده ($73/2$ ٪)؛ در حالی که در دمای ۶۰۰ درجه، تخریب بیش از حد ساختار سلولی ممکن است منجر به فروریزش یا انسداد برخی از منافذ یا ادغام آن ها شده باشد و در نتیجه تخلخل کاهش یافته است ($71/6$ ٪) و این باور که افزایش دمای پیرولیز همواره منجر به افزایش حجم و میزان تخلخل های موجود در ساختار بیوپچار می شود، صحیح نیست (Leng et al., 2021).



شکل ۶. تغییرات درصد تخلخل کل مربوط به بیوپچارهای تولیدشده در دماهای مختلف پیرولیز (۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس)

۳-۴- بررسی تغییرات هدایت الکتریکی سوسپانسیون بیوپچارها

شکل ۷، تغییرات هدایت الکتریکی سوسپانسیون بیوپچارهای تولیدشده در دماهای مختلف پیرولیز (۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، هدایت الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه، بیشترین مقدار را داشته ($340/4$ میکروزیمنس بر سانتی متر) و نسبت به دماهای ۵۰۰ درجه ($227/2$ میکروزیمنس بر سانتی متر) و ۶۰۰ درجه ($221/3$ میکروزیمنس بر سانتی متر)، افزایش قابل توجهی دارد. این افزایش می تواند ناشی از آزادسازی بیشتر یون های محلول و تشکیل ساختار سطحی مناسب برای افزایش رسانایی در این دما باشد. همچنین، در دماهای بالاتر (۶۰۰ درجه سلسیوس) به دلیل تشکیل ترکیبات معدنی پایدار با قابلیت حل شدن اندک و به دام افتادن یون ها در ماتریس کربنی، نتیجه می شود که تعداد یون های آزاد شده در محلول، کاهش یافته و هدایت الکتریکی نسبت به دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس کمتر شده است (Cantrell et al., 2012). هدایت الکتریکی بالاتر بیوپچار

و محتوای کربن پایدار بیشتری است که این ویژگی‌ها، ماندگاری آن در خاک و اثرات بلندمدت بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و نگهداری رطوبت و مواد مغذی را در کاربردهای کشاورزی افزایش می‌دهد.

- بیشترین تخلخل (۷۴/۳٪) در بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه مشاهده شد که نشان می‌دهد این دما شرایط بهینه‌ای برای تجزیه حرارتی و تشکیل ساختار متخلخل بیوچار فراهم کرده است.
- هدایت الکتریکی سوسپانسیون آبی بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس (۳۴۰/۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) بیشتر از نمونه‌های ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه بود، که این موضوع بیانگر آزادسازی بیشتر یون‌های محلول و تشکیل ساختار سطحی مناسب برای افزایش رسانایی در این دما است.
- به‌طور کلی، بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس با داشتن ویژگی‌های فیزیکی بهتر و عملکرد و ساختار سطحی مطلوب، نسبت به بیوچارهای تولیدشده در سایر دماها از مزیت‌های بیشتری برای کاربردهای محیط‌زیستی و کشاورزی برخوردار است.

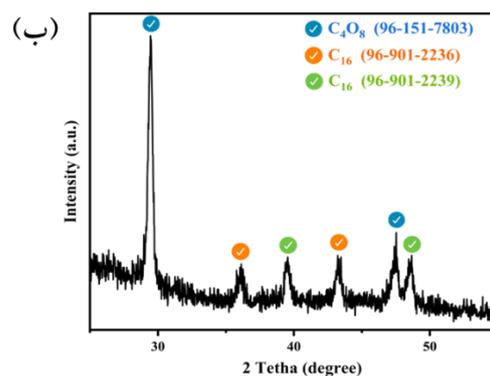
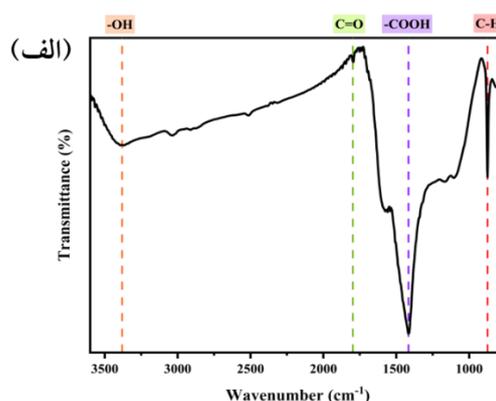
۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این تحقیق، صمیمانه از همکاری پژوهشگاه مواد و انرژی کرج در تأمین تجهیزات و فضاهای آزمایشگاهی، در مسیر اجرای این پژوهش، تشکر می‌نمایند.

مراجع

1. Adeniyi, A. G., Iwuozor, K. O., Adeleke, J., Emenike, E. C., Micheal, K. T., & Ighalo, J. O. (2023). Production and characterization of neem leaves biochar: Effect of two different retort carbonization systems. *Bioresource Technology Reports*, 24, 101597. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101597>
2. Adeniyi, A. G., Iwuozor, K. O., Emenike, E. C., Adeyanju, C. A., & Ogunniyi, S. (2024). Mechanical and microstructural properties of bio-composite produced from recycled polystyrene/chicken feather biochar. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 11(3), 1-8. <https://doi.org/10.30501/jree.2023.384691.1553>
3. Adeniyi, A. G., Iwuozor, K. O., Emenike, E. C., Amoloye, M. A., Adeleke, J. A., Omonayin, E. O., Bamigbola, J. O., Ojo, H. T., & Ezzat, A. O. (2024). Leaf-based biochar: A review of thermochemical conversion techniques and properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106352. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106352>
4. ASTM, D. (2019). 2854-09. Standard test method for apparent density of activated carbon. *ASTM Stand*, 96, 1-3. <https://doi.org/10.1520/D2854-09R19>

داد که پیک‌های موجود در زوایای ۲۹/۴ و ۴۷/۵ درجه مربوط به فاز بلوری C_4O_8 با شبکه بلوری مکعبی، پیک‌های موجود در زوایای ۳۶/۱ و ۴۳/۲ درجه مربوط به فاز بلوری C_{16} با شبکه بلوری تتراگونال، و پیک‌های موجود در زوایای ۳۹/۵ و ۴۸/۶ درجه مربوط به فاز بلوری C_{16} با شبکه بلوری اورتورومبیک می‌باشد.



شکل ۸. تصویر طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (الف) و الگوی پراش اشعه ایکس (ب) بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی و ریزساختاری بیوچار حاصل از پیرولیز پس‌ماند برگ‌های چنار (*Platanus orientalis*) در سه دمای ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش عبارت‌اند از:

- بیوچارهای تولیدشده دارای ساختاری متخلخل با سطوح زبر و شکسته بوده که این ویژگی افزایش سطح تماس و تعداد نقاط فعال سطحی را به‌همراه دارد.
- بیوچار تولیدشده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، به‌دلیل چگالی ظاهری و حقیقی بالاتر، دارای ساختاری متراکم‌تر

21. Liu, X., Huang, P., Ma, W., Jin, F., & Tai, L. (2025). Unveiling adsorption mechanisms and regeneration challenges of durian peel biochar for ciprofloxacin removal: Batch experiments and DFT study. *Journal of Water Process Engineering*, 75, 107991. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107991>
22. Pathak, H. K., Seth, C. S., Chauhan, P. K., Dubey, G., Singh, G., Jain, D., Upadhyay, S. K., Dwivedi, P., & Khoo, K. S. (2024). Recent advancement of nano-biochar for the remediation of heavy metals and emerging contaminants: mechanism, adsorption kinetic model, plant growth and development. *Environmental Research*, 255, 119136. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119136>
23. Pourrajabian, A., Ghasemzadeh, M., Dehghan, M., & Rahgozar, S. (2024). Recycling Technologies and Waste Management of Wind Turbine Composite Blades. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 13(3), 28-39. <https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473762.1305>
24. Qiu, G., Zhao, Y., Wang, H., Tan, X., Chen, F., & Hu, X. (2019). Biochar synthesized via pyrolysis of *Broussonetia papyrifera* leaves: mechanisms and potential applications for phosphate removal. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(7), 6565-6575. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04095-w>
25. Shakerzadeh, S., Mobasherpour, I., Salahi, E., Razavi, M., Sabzehmeidani, M. M., & Takalo, M. (2025). *Platanus orientalis* L. leaves residue-derived biochar: investigating the effects of synthesis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 15305-15310. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-06320-8>
26. Shi, Z., Jin, Y., Han, T., Yang, H., Gond, R., Subasi, Y., Asfaw, H. D., Younesi, R., Jönsson, P. G., & Yang, W. (2024). Bio-based anode material production for lithium-ion batteries through catalytic graphitization of biochar: the deployment of hybrid catalysts. *Scientific Reports*, 14(1), 3966. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54509-8>
27. Sizerici, B., Fseha, Y. H., Yildiz, I., Delclos, T., & Khaleel, A. (2021). The effect of pyrolysis temperature and feedstock on date palm waste derived biochar to remove single and multi-metals in aqueous solutions. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00083-x>
28. Tan, Y., Wan, X., Zhou, T., Wang, L., Yin, X., Ma, A., & Wang, N. (2022). Novel Zn-Fe engineered kiwi branch biochar for the removal of Pb (II) from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127349. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127349>
29. Vuppaladadiyam, A. K., Vuppaladadiyam, S. S. V., Sikarwar, V. S., Ahmad, E., Pant, K. K., Pandey, A., Bhattacharya, S., Sarmah, A., & Leu, S.-Y. (2023). A critical review on biomass pyrolysis: Reaction mechanisms, process modeling and potential challenges. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101236. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101236>
30. Yadav, S. P. S., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>
31. Yang, Z., Liu, X., Zhang, M., Liu, L., Xu, X., Xian, J., & Cheng, Z. (2020). Effect of temperature and duration of pyrolysis on spent tea leaves biochar: physicochemical properties and Cd (II) adsorption capacity. *Water Science and Technology*, 81(12), 2533-2544. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.309>
32. Zhang, H., Chen, C., Gray, E. M., & Boyd, S. E. (2017). Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. *Biomass and Bioenergy*, 105, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.024>
33. Zhang, T., Liu, Y., Yang, L., Li, W., Wang, W., & Liu, P. (2020). Ti-Sn-Ce/bamboo biochar particle electrodes for enhanced electrocatalytic treatment of coking wastewater in a three-dimensional electrochemical reaction system. *Journal of cleaner production*, 258, 120273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120273>
34. Zou, X., Debiagi, P., Amjed, M. A., Zhai, M., & Faravelli, T. (2024). Impact of high-temperature biomass pyrolysis on biochar formation and composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 179, 106463. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106463>
5. Azni, M. A., Md Khalid, R., Hasran, U. A., & Kamarudin, S. K. (2023). Review of the effects of fossil fuels and the need for a hydrogen fuel cell policy in Malaysia. *Sustainability*, 15(5), 4033. <https://doi.org/10.3390/su15054033>
6. Balmuk, G., Videgain, M., Manyà, J. J., Duman, G., & Yanik, J. (2023). Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105858>
7. Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L. E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C. A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66, 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>
8. Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>
9. del Carmen Recio-Ruiz, M., Ruiz-Rosas, R., García-Mateos, F. J., Valero-Romero, M. J., Rosas, J. M., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2025). An integrated approach to the valorization of pyrolysis products from lignocellulosic residues and by-products. *Biomass and Bioenergy*, 196, 107676. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107676>
10. Emenike, E. C., Iwuozor, K. O., Ighalo, J. O., Bamigbola, J. O., Omonayin, E. O., Ojo, H. T., Adeleke, J., & Adeniyi, A. G. (2024). Advancing the circular economy through the thermochemical conversion of waste to biochar: a review on sawdust waste-derived fuel. *Biofuels*, 15(4), 433-447. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2255007>
11. Fakhar, A., Canatoy, R. C., Galgo, S. J. C., Rafique, M., & Sarfraz, R. (2025). Advancements in modified biochar production techniques and soil application: a critical review. *Fuel*, 400, 135745. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135745>
12. Han, F., An, S.-y., Liu, L., Ma, L.-q., Wang, Y., & Yang, L. (2023). Simultaneous enhancement of soil properties along with water-holding and restriction of Pb-Cd mobility in a soil-plant system by the addition of a phosphorus-modified biochar to the soil. *Journal of Environmental Management*, 345, 118827. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118827>
13. Huggins, T., Wang, H., Kearns, J., Jenkins, P., & Ren, Z. J. (2014). Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells. *Bioresource technology*, 157, 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.058>
14. Iwuozor, K. O. (2019). Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. *Advanced Journal of Chemistry-Section A*, 2(2), 105-127. <https://doi.org/10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127>
15. Kwarcianny, R., Fiedur, M., & Saletnik, B. (2024). Opportunities and Threats for Supercapacitor Technology Based on Biochar—A Review. *Energies*, 17(18), 4617. <https://doi.org/10.3390/en17184617>
16. Lehmann, J., & Joseph, S. (2012). *Biochar for environmental management: science and technology*. Routledge. https://books.google.com/books?id=w-CUtyJfcC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
17. Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the total Environment*, 763, 144204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
18. Li, B., Yang, L., Wang, C.-q., Zhang, Q.-p., Liu, Q.-c., Li, Y.-d., & Xiao, R. (2017). Adsorption of Cd (II) from aqueous solutions by rape straw biochar derived from different modification processes. *Chemosphere*, 175, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.061>
19. Li, X., Wu, Q., Chen, D., Tamjidur, R. S., Fan, P., Wang, G., & Zhang, W. (2025). Efficient chromium Cr (VI) removal from wastewater through modified cycad's leaf biochar: insights into adsorption-reduction mechanisms and kinetic analysis. *Biomass and Bioenergy*, 200, 107994. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107994>
20. Liu, S., Cen, B., Yu, Z., Qiu, R., Gao, T., & Long, X. (2025). The key role of biochar in amending acidic soil: reducing soil acidity and improving soil acid buffering capacity. *Biochar*, 7(1), 52. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00432-8>