https://doi.org/10.22034/jrenew.2026.219649

سال سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1405، ص ص 142- 152

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: 1403/02/10

تاریخ پذیرش: 1404/02/05

بررسی وضعیت پسماندهای کشاورزی و ارائه راهکارهای نوین دفع

هیمن خودکام[1]، راضیه پوردربانی[2*]، بهمن نجفی[3]

- دانشجوی دکتری انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

2- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

3- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

* اردبیل، صندوق پستی 11367-56199، r_pourdarbani@uma.ac.ir

چکیده

پسماندهای جنگلی در سراسر جهان برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب پسماندهای جنگلی می‌تواند تا 50 درصد خواص مکانیکی پانل‌های چوبی را بهبود بخشد. بریکت‌های تولیدی حاوی شاخه‌ها زمان سوختن طولانی‌تری نسبت به بریکت‌های تهیه‌شده از چوب فراوری‌شده تنه درختان دارند. محتوای بالاتر لیگنین در این مواد باعث افزایش استحکام اصطکاکی و فشاری می‌شود. بیوچار به دلیل تخلخل بالا و طبیعت کربن‌دار خود، به‌عنوان یک جاذب منحصربه‌فرد شناخته می‌شود. بیوچار حاصلخیزی خاک، ظرفیت نگهداری آب، سطح pH و میزان مواد آلی خاک را بهبود می‌بخشد. همچنین، بیوچار از شسته شدن مواد مغذی و نفوذ آلاینده‌های آلی و معدنی به خاک جلوگیری می‌کند. بالاترین بازده تولید بیوچار در دماهای پایین و با محتوای لیگنین بالا امکان‌پذیر است. منابع اصلی تولید بیوچار، گیاهان و کودها هستند که بیوچار فراوری‌شده از گیاهان را می‌توان به‌عنوان تهویه کننده خاک استفاده کرد و بیوچارهای فراوری شده از کود را می‌توان هم به‌عنوان تهویه کننده خاک و هم به‌عنوان کود به دلیل انتشار مواد مغذی استفاده نمود. بقایای جنگلی کارایی یکسانی برای تولید بیوگاز ندارند. مقدار متان تولیدی از بقایای چوب سخت چندین برابر بیشتر از بقایای چوب نرم است. تولید اتانول یا بوتانول به نسبت مواد آلی و حضور میکروارگانیسم‌ها بستگی دارد. هزینه آنزیم‌های آبکافت جذابیت فرایند هیدرولیز آنزیمی را علی‌رغم مزایای قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. بقایای جنگلی می‌توانند به‌عنوان بسترهای بالقوه برای رشد حشرات مختلف یا کشت قارچ‌های خوراکی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از بسترهای حاصل از بقایای زراعت جنگلی می‌تواند به مدیریت پایدار جنگل‌ها، حفاظت از محیط‌زیست و تأمین امنیت غذایی جهانی در آینده کمک شایانی کند.

کلیدواژگان: بیوچار، بیوگاز، پسماند کشاورزی، روغن زیستی، فرایند ترموشیمیایی، لیگنین.

Investigating the status of agricultural waste and providing new disposal solutions

Himan Khodkam[1], Razieh Pourdarbani[2*], Bahman Najafi[3]

PhD Student in Renewable Energy, Department of Biosystem Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Professor of Biosystem Engineering, University of MohagheghArdabili, Ardabil, Iran

3- Professor of Biosystem Engineering, University of MohagheghArdabili, Ardabil, Iran

* P.O.B. 56199-11367, Ardabil, r_pourdarbani@uma.ac.ir

Received: 29 April 2024 Accepted: 25 April 2025

Abstract

Forest residues are utilized for various purposes worldwide. Incorporating forest residues into wood-based panels can enhance their mechanical properties by up to 50%. Briquettes made from branches have a longer burn time compared to those produced from processed tree trunks, primarily due to their higher lignin content, which increases frictional and compressive strength. Biochar, a unique adsorbent, is highly valued for its porosity and carbon-rich composition. It enhances soil fertility, water retention, pH levels, and organic matter content. Additionally, biochar helps prevent nutrient leaching and the infiltration of organic and inorganic pollutants into the soil. The highest biochar yields are achieved at low temperatures and with materials rich in lignin. Biochar is primarily derived from plants and fertilizers.

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Plant-based biochar serves as a soil conditioner, while fertilizer-derived biochar can function both as a soil conditioner and a fertilizer, releasing essential nutrients. Forest residues are less efficient for biogas production compared to other applications. Hardwood residues produce significantly more methane than softwood residues. The production of ethanol or butanol depends on the organic matter content and the presence of microorganisms. However, the high cost of hydrolysis enzymes reduces the appeal of the enzymatic hydrolysis process, despite its notable advantages. Forest residues also serve as potential substrates for insect cultivation or edible mushroom farming. Utilizing substrates derived from forestry residues can play a significant role in sustainable forest management, environmental conservation, and global food security in the future.

Keywords: biochar, biogas, agricultural waste, bio oil, thermochemical process, Lignin

1- مقدمه

گزارش منتشرشده توسط فائو [1] نشان می‌دهد که تولید جهانی زیست‌توده چوب به‌صورت خرده‌چوب، چوب با کیفیت پایین با ابعاد نامشخص و بقایای جنگلی، از 507/8 میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۹ فراتر رفته است. این مقدار در مقایسه با سال ۱۹۹۹ که 325/8 میلیون مترمکعب بود، افزایشی معادل ۵۵/۸ درصد را نشان می‌دهد. مجموع برداشت این نوع مواد خام در طول ۲۰ سال گذشته به حدود 9208/5 میلیون مترمکعب رسیده است.

در این دوره بیشترین سهم از زیست‌توده چوب در قاره آمریکا (38/8 درصد)، اروپا (29/1 درصد) و آسیا (26/6 درصد) به ترتیب با 3571/33، 2681/72 و 2446/61 میلیون متر مکعب برداشت شد. 5/5 درصد باقی‌مانده (508/84 میلیون متر مکعب) در اقیانوسیه و آفریقا برداشت شد. کشورهایی که بیشترین میزان زیست‌توده چوب را تولید و استفاده کردند عبارتند از چین، ایالات متحده آمریکا و کانادا که بیش از 4/7 میلیارد متر مکعب برداشت و فراوری می‌شود که بیش از 50 درصد زیست‌توده چوب برداشت شده در سطح جهان بین سال‌های 1999 و 2019 را تشکیل می‌دهد که در جدول ۱ فهرستی از کشورهای برتر در این زمینه ارائه شده است [1].

جدول 1 کشورهای برتر در تولید خرده چوب، ذرات و بقایای چوب در دوره 1999-2019

سهم [درصد]	مقدار تولید [$m^3 \times 10^6$]	کشور
19/0	1750/42	چین
16/8	1546/41	آمریکا
15/9	1463/02	کانادا
4/4	409/66	سوئد
4/3	394/42	استرالیا
4/0	372/33	برزیل
3/9	363/18	روسیه
3/7	343/37	فرانسه
3/3	308/07	فنلاند
2/8	254/57	ژاپن
78/1	7205/44	جمع

بر اساس داده‌های منتشرشده توسط فائو، بیش از ۷۸ درصد از تراشه‌های چوب، ذرات و بقایای آن تنها توسط ۱۰ کشور برداشت و فراوری شده است. آسیا و چین بیش از ۷۱ درصد از زیست‌توده جنگلی را برداشت و فراوری کرده‌اند. در قاره آمریکا، بیش از ۸۴ درصد از زیست‌توده از جنگل‌های ایالات متحده آمریکا و کانادا برداشت شده است. در اروپا، بیشترین مقدار زیست‌توده (بیش از ۲۸ درصد) در سوئد و فنلاند فراوری شد. درحالی‌که در منطقه اقیانوسیه، استرالیا بیشترین مقدار بیومس جنگلی (بیش از ۹۷ درصد) را برداشت و فراوری می‌کند. پیش‌بینی می‌شود که منابع جهانی بقایای جنگل تا سال ۲۰۳۰ به ۲۴ تا ۴۳ اگزاژول در سال برسد [2].

با درنظرگرفتن دستورالعمل‌های فعلی برای مدیریت پایدار جنگل‌ها، دردسترس‌بودن بالقوه زیست‌توده جنگلی به شکل بقایای چوب و کنده‌های درختان در اروپا، حدود ۱۲ درصد از کل زیست‌توده جنگلی برآورد شده است. این مقدار معادل تقریباً ۴۸ میلیون تن ماده خشک در سال ($Tg^{1} \times yr^{-1}$) می‌باشد. تخمین زده می‌شود که از بین ۳۹ کشور اروپایی، ۲۸ کشور عضو اتحادیه اروپا حدود ۸۴ درصد از پتانسیل تولید زیست‌توده جنگلی را دارند. سوئد، آلمان، فرانسه، فنلاند و لهستان به‌تنهایی نزدیک به نیمی از کل پتانسیل زیست‌توده جنگلی اروپا را تشکیل می‌دهند.

با فرض امکان افزایش استفاده از زیست‌توده جنگلی عمدتاً برای تولید انرژی، حدود ۲۶ درصد از زیست‌توده جنگلی بالقوه موجود (یعنی حدود $Tg \times yr^{-1}$ 125-122) ممکن است برداشت و فراوری شود. از سوی دیگر، با فرض حداقل افزایش استفاده از زیست‌توده، این رقم به ۱۹۰ تا ۱۹۵ میلیون تن ماده خشک در سال می‌رسد که حدود ۳۶ درصد از زیست‌توده جنگلی بالقوه موجود را شامل می‌شود. بااین‌حال، اقدامات اخیر صورت‌گرفته توسط نهادهای اتحادیه اروپا باهدف بهبود حفاظت از تنوع زیستی ممکن است دسترسی به زیست‌توده جنگلی را تنها به بقایای چوب محدود کند (که حدود ۱۱ درصد از کل زیست‌توده جنگلی برداشت‌شده را تشکیل می‌دهد) [3].

مساحت جنگل‌های طبیعی جهان با سرعت بسیار بالایی در حال کاهش است، به‌طوری‌که در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰، سالانه حدود ۱۰ میلیون هکتار از جنگل‌ها از بین رفته‌اند. مهم‌ترین دلایل این تخریب، عوامل طبیعی و انسانی هستند، اما سهم عوامل انسانی همواره بیش‌تر از عوامل طبیعی بوده است. بخش قابل‌توجهی از جمعیت جهان برای پخت‌وپز و گرم‌کردن خانه‌های خود به زیست‌توده‌های جنگلی وابسته هستند. به همین دلیل، برداشت هیزم و زیست‌توده به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب جنگل‌ها به‌ویژه در مناطق

[1] Tera gram

جنگلی پرجمعیت شناخته می‌شود. تقریباً یک‌سوم جمعیت جهان به طور مستقیم یا غیرمستقیم برای تأمین معیشت و سایر نیازهای خود به جنگل‌ها و منابع آن وابسته‌اند. سرعت تخریب جنگل‌ها از روند احیای آن‌ها بسیار سریع‌تر است، به‌طوری‌که جنگل‌زدایی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی تغییر کاربری اراضی و تهدیدی جدی برای تنوع زیستی گیاهی و جانوری در جهان شناخته شده است. ازاین‌رو، جنگل‌زدایی به‌عنوان یک چالش جهانی زیست‌محیطی مطرح می‌شود. متأسفانه، ایران از نظر رعایت شاخص‌های پایداری زیست‌محیطی و توسعه پایدار، در رتبه‌های پایین جدول‌های جهانی قرار دارد [۴].

بیشتر خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران کمتر از یک درصد ماده آلی دارند و عمدتاً کمبود ماده آلی عامل محدوده کننده‌ای در این مناطق محسوب می‌شود. کمبود مواد آلی باعث کاهش پایداری ساختمان خاک، پوسته‌پوسته شدن سطح آن و در نهایت تشکیل خاکی سخت و متراکم می‌گردد. اصلاح‌کننده‌های خاک موادی هستند که معمولاً برای بهبود مشکلات شیمیایی و فیزیکی خاک مانند اسیدیته، شوری و فعال‌سازی میکروارگانیسم‌های خاک توصیه می‌شوند. این مواد با افزایش سرعت بازچرخش عناصر در خاک، دسترسی بهتر ریشه‌های گیاهان به عناصر غذایی را فراهم می‌کنند [۵].

بحران زیست‌محیطی ایران یکی از شدیدترین بحران‌های زیست‌محیطی در جهان به شمار می‌رود. کاهش چشمگیر مساحت جنگل‌ها در دهه‌های اخیر گواه این امر است. بر اساس آمارها، سالانه حدود ۱۲۰۰۰ هکتار از جنگل‌های ایران در فاصله سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ تخریب شده است. همچنین، در پنج سال گذشته، حدود ۶۰۰۰۰ هکتار از جنگل‌ها بر اثر آتش‌سوزی، آفات و بیماری‌ها، سدسازی، راه‌سازی، پروژه‌های عمرانی و قاچاق چوب از بین رفته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷ بیش از ۱۱۰۰۰ مورد آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع ایران رخداده است که منجر به تخریب بیش از ۱۲۵۰۰۰ هکتار از این مناطق شده است. در مقایسه با میانگین جهانی، سرانه پوشش جنگلی در جهان حدود 0/62 هکتار است، درحالی‌که این رقم برای ایران تنها 0/17 هکتار برآورد شده است [۶]. این آمارها نشان‌دهنده وضعیت نگران‌کننده‌ای از محیط‌زیست ایران است که نیازمند توجه فوری و اقدامات مؤثر برای حفاظت و احیای منابع طبیعی است.

افزایش تقاضا برای پسماندهای کشاورزی و جنگلی به‌منظور تولید انرژی و ساخت محصولات کاربردی در سراسر جهان روندی روبه‌رشد دارد. به همین دلیل، ضروری است که فناوری‌های نوین برداشت پسماندهای جنگلی توسعه یابند تا کاهش هزینه فراوری، کاهش اثرات زیست‌محیطی و همچنین تولید محصولات کاربردی در صنعت، ساختمان‌سازی و کشاورزی ارائه گردد. تولید بیوچار یکی از مهم‌ترین محصولات تولیدی از پسماندهای کشاورزی بشمار می‌آید که سبب بهبود وضعیت خاک، احیا و همچنین محصولات کشاورزی را از لحاظ کیفیت و کمیت تحت‌تأثیر قرار خواهد داد. باتوجه‌به شرایط ایران، بیوچار یک گزینه امیدوارکننده جهت بهبود خاک و جنگل بشمار می‌آید.

2- تکنولوژی‌های جدید برای برداشت و فراوری پسماند جنگل

بقایای چوب، مواد خام چوبی هستند که توسط ابزارهای فنی مختلف مانند ماشین‌آلات جمع‌آوری و خردکن، در حین برداشت چوب جامد برای مصارف صنعتی تولید می‌شوند. فرایند چوب‌گیری استاندارد (شامل نازک کردن و برش شفاف) از روش‌های دستی و کاملاً مکانیزه استفاده می‌کند. باتوجه‌به تغییرات ناگهانی آب‌وهوایی ناشی از بلایای طبیعی (مانند وزش باد شدید یا بارش برف سنگین)، توصیه می‌شود تاحدامکان از ماشین‌آلاتی استفاده شود که امکان برداشت سریع و ایمن چوب را برای مصارف صنعتی فراهم می‌کنند. بااین‌حال، این فرایند منجر به انباشت مقادیر زیادی چوب غیر قابل تجارت، مانند چوب‌های بی‌کیفیت با ابعاد کوچک، کنده‌های ریشه یا قطعات شکسته می‌شود که می‌توانند به‌عنوان منبعی برای تأمین انرژی مورد استفاده قرار گیرند [7].

متداول‌ترین فناوری مورد استفاده در کشورهایی که بخش عمده‌ای از بقایای جنگلی را برای مقاصد انرژی برداشت می‌کنند، روش برداشت تراشه‌های درختان کامل است. در این روش، با استفاده از اره‌برقی جوان‌ترین بخش‌های درختان برای تولید انرژی از کل مواد اولیه جدا می‌شوند. این بخش‌های جوان درختان به انبارهای جنگلداری منتقل شده و در آنجا توسط دستگاه‌های خردکن به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند و سپس، مواد خام خرد شده به نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی[1] ارسال می‌شوند. روش‌های زیر برای تبدیل بقایای جنگل‌ها به خرده‌های چوب مورد استفاده قرار می‌گیرند [8]:

خردکردن در اطراف جاده: شامل خردکردن مداوم باقیمانده‌ها (شاخه‌ها، درختان یا درختان با قطر کوچک) در طول سال با استفاده از خردکن‌های سوار بر کامیون و انتقال مواد خرد شده به مرکز دفع است.

خردکردن در جایگاهی متغیر: مقادیر بیشتری از بقایای جنگل (از جمله کنده‌های ریشه‌کن شده و بخش‌هایی از درختان بی‌کیفیت) را مورد استفاده قرار می‌دهند. به روش‌های مختلف ناخالصی‌ها را جدا و سپس خرد می‌کند. در این روش از ماشین‌های کارآمدتر استفاده می‌کنند.

خردکردن در جایگاه ثابت: ابتدا پسماندها در محلی مشخص جمع‌آوری و سپس از خردکن‌های ثابت جهت خردکردن مواد استفاده می‌کنند.

خردکردن در نیروگاه: شامل بسته‌بندی بقایای جنگل و خردکردن آنها در محوطه‌های ذخیره‌سازی در مجاورت نیروگاه‌های سیکل ترکیبی است.

در بین روش‌های اشاره شده، با احتساب زمان، هزینه‌های جمع‌آوری و انتقال می‌توان روش خردکردن در نیروگاه را به‌عنوان بهینه‌ترین راه‌حل انتخاب نمود.

2-1- جهت استفاده از پسماند جنگل و مواد خام تولید شده از مواد کامپوزیتی بر پایه چوب

بقایای جنگل برای تولید کامپوزیت‌های مبتنی بر چوب (مانند تخته سه‌لا، تخته تراشه‌ای جهت‌دار، تخته نئوپان و تخته فیبر) استفاده می‌شود؛ زیرا خواص فیزیکی این مواد باعث کاهش اثرات رطوبت و آب می‌گردد. در مقایسه با تخته‌های ساخته‌شده از چوب جامد، جذب آب و تورم در این کامپوزیت‌ها به طور محسوسی کمتر است [9]. مطالعه ایواکیری و همکاران نشان داد که تولید پانل‌های چوبی با استفاده از خرده‌های چوب به‌دست‌آمده از بقایای جنگل (تا ۵۰ درصد) منجر به محصولات نهایی با خواص مکانیکی بهبودیافته یا قابل قبول می‌شود [10]. بنابراین، کامپوزیت‌های مبتنی بر چوب به‌عنوان

[1] Combined Heat and Power (CHP)

مواد غیرساختاری و ساختاری در کاربردهای داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته بقایای جنگل تنها منبع مواد خام برای تولید کامپوزیت‌های چوبی نیستند بلکه از ضایعات ساختمانی و ضایعات حاصل از فراوری چوب در کارخانه‌های چوب‌بری (مانند تراشه‌ها، خاک اره و الیاف چوب) نیز برای این منظور به‌کار می‌روند [11]. در برخی از پانل‌های کامپوزیتی مبتنی بر چوب، مواد خام حاصل از ضایعات تا ۵۰ درصد حجم محصول را تشکیل می‌دهند و به این ترتیب جایگزین چوب جامد خردشده می‌شوند. این جایگزینی عمدتاً به دلایل اقتصادی صورت می‌گیرد، زیرا استفاده از ضایعات هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد [12].

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های چوب پلاستیک[1] توجه فزاینده‌ای را در صنایع هوافضا و خودرو به خود جلب کرده‌اند. همچنین آنها باهدف محدودکردن تولید و استفاده از مواد مبتنی بر پتروشیمی برای حفاظت از محیط‌زیست قوانین سخت‌گیرانه وضع نموده و به طور گسترده در صنایع ساختمانی و بسته‌بندی استفاده می‌شوند [13]. در پژوهشی گزارش شده است که WPC دوام بالا، خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی را در مقایسه با مواد اولیه (پلیمرهای ترموپلاستیک و الیاف چوبی که برای پر کردن استفاده می‌شوند) نشان می‌دهند [14]. بنابراین، پیش‌بینی شده است که بازار جهانی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک[2] تا سال 2022 بیش از 8/5 میلیارد دلار خواهد بود و میانگین نرخ رشد سالانه بیش از 12 درصد در 5 سال گذشته مشاهده شده است [15]. بااین‌حال، باید توجه داشت که تولید WPCها از تراشه‌های خالص و خاک اره تولید شده در طول فراوری چوب جامد صنعتی مناسب‌تر از بقایای جنگلی غنی از پوست هستند [16] زیرا الیاف بقایای جنگل به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی و تراکم فیبر نسبت به الیاف چوب سخت‌تر هستند [17].

فراوری بقایای جنگل به اشکال مختلف (مانند تراشه‌های چوب، شاخه‌های نازک یا برگ‌ها) امکان بهره‌برداری بهینه از خواص آن‌ها را در تولید مواد پلیمری سلولزی خاص فراهم می‌کند. پسماندهای جنگلی به دلیل محتوای قابل‌توجه لیگنین در شاخه‌ها و برگ‌ها، از ارزش کالری بالاتری برخوردار هستند و ازاین‌رو می‌توانند به‌عنوان زیست‌توده با پتانسیل بالا برای استفاده به‌عنوان سوخت جامد در نظر گرفته شوند [18].

در پژوهشی بر اهمیت کامپوزیت‌های پلیمری ساخته‌شده از الیاف طبیعی به‌دست‌آمده از پسماندهای کشاورزی تأکید شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که این کامپوزیت‌ها می‌توانند به‌عنوان مصالح ساختمانی جایگزین چوب در ساخت‌وساز مسکن کم‌هزینه مورد استفاده قرار گیرند. با افزودن مواد شیمیایی می‌توان مقاومت آن‌ها را در برابر پیری تسریع شده ناشی از تأثیر آب، حمله حشرات، آفات و مواد شیمیایی بهبود بخشید. این اقدامات ممکن است استحکام کامپوزیت‌ها را افزایش دهد و آن‌ها را به‌عنوان موادی قابل‌قبول برای کاربردهای مختلف از جمله تخته‌های قالب‌بندی، تراس و مصالح سقفی یا پارکت مطرح کند. علاوه بر این، کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل مزایای زیست‌محیطی، نسبت به کامپوزیت‌های مبتنی بر الیاف شیشه برتری دارند. بااین‌حال، باید توجه داشت که اخیراً مشاهده شده است که الیاف طبیعی مشتق‌شده از پسماندهای کشاورزی به دلیل تفاوت در منشأ، سن، شرایط رشد، روش‌های استحصال و درجه حساسیت به عوامل خارجی مختلف باعث ایجاد تغییراتی در خواص آن‌ها می‌شود [19]. باتوجه‌به دوام و ملاحظات زیست‌محیطی می‌توان نتیجه گرفت که کامپوزیت‌های پلیمری ساخته‌شده از پسماندهای کشاورزی بهترین گزینه برای استفاده هستند.

ساخت کامپوزیت‌ها از ضایعات چوب موجب صرفه‌جویی در مصرف چوب و استفاده بهینه‌تر از این محصول می‌شود که علاوه بر کاهش قیمت تولید کامپوزیت، آلایندگی محیطی را نیز کاهش می‌دهد. افزایش تقاضا برای کامپوزیت‌ها و محدودیت در میزان پسماند باعث تحول در فرایند تولید این ماده گردید و منجر به استفاده از پسماندهای ساختمانی در ساخت کامپوزیت‌ها شد. پیشرفت‌های علمی و فناوری نیز امکان بهره‌برداری از این مواد بلااستفاده و مخرب محیط‌زیست را فراهم کرده و به کاهش هزینه‌های تولید کمک شایانی نموده است. امروزه، به دلیل مقاومت بالا و قیمت کم از این محصولات در ساخت منازل مسکونی استفاده گسترده‌ای می‌شود.

2-2- پسماندهای جنگل به عنوان مواد اولیه در فرآیندهای تولید سوخت چوب

پسماندهای جنگلی به‌ویژه ضایعات چوبی به شکل تراشه، مواد اولیه مناسبی برای تولید گرما و برق هستند. این ضایعات به‌صورت بریکت برای احتراق در دیگ‌های مناسب آماده می‌شوند. بزرگ‌ترین صادرکنندگان بریکت اتحادیه اروپا، آمریکا و کانادا هستند. مصرف جهانی بریکت روبه‌افزایش بوده و در حال حاضر بیش از 20 میلیون تن تخمین زده می‌شود [9]. بریکت به‌عنوان شکلی مطلوب‌تر از سوخت زیستی، استانداردهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌ای که برای سوخت‌های زیستی تعیین شده است، رعایت می‌کند [20]؛ بنابراین، نوع ماده خام نقش اصلی را در تولید سوخت زیستی ایفا می‌کند. در پژوهشی، بریکت‌های ساخته شده از پسماندهای چوبی و پسماندهای صنعتی (مانند خاک‌اره) مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند و نتایج نشان داد که نوع ماده خام نسبت به تراکم بریکت‌ها تأثیر بیشتری بر خواص احتراق دارد. علاوه بر این، محققان دریافتند که بریکت‌های حاوی پوست تقریباً 50 درصد زمان سوختن طولانی‌تری نسبت به بریکت‌های ساخته شده از خاک‌اره دارند، درحالی‌که بریکت‌های ساخته شده از شاخه‌ها حدود 15 درصد زمان سوختن طولانی‌تری نسبت به بریکت‌های تهیه شده از چوب فراوری شده از تنه درخت نشان دادند. فرایند ساخت بریکت تحت‌تأثیر عواملی مانند محتوای لیگنین و خاکستر در چوب مورد استفاده برای تولید بریکت قرار می‌گیرد [21]. محتوای بالاتر لیگنین و خاکستر که معمولاً در شاخه‌ها با طول عمر کمتر یافت می‌شود، باعث افزایش استحکام اصطکاکی و فشاری بریکت‌ها می‌شود [22].

تقاضا برای پسماندهای جنگلی و ضایعات چوبی به‌عنوان مواد اولیه در تولید بریکت و سایر اشکال سوخت زیستی در حال افزایش است. این افزایش تقاضا نه‌تنها به دلیل مزایای زیست‌محیطی این منابع، بلکه به‌خاطر کارایی و مقرون‌به‌صرفه بودن آن‌ها به‌عنوان منابع تجدیدپذیر است. باتوجه‌به رشد روزافزون نیاز به انرژی‌های پاک و پایدار، استفاده از پسماندهای جنگلی به‌عنوان یک منبع انرژی جایگزین، نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند.

تقاضا برای پسماندهای جنگلی جهت مقاصد انرژی در سراسر جهان به طور پیوسته در حال افزایش است [23]. از دیگر سو مدام هزینه‌های جمع-

[1] Wood-plastic composite (WPC)

آوری و حمل و نقل این مواد خام افزایش می‌یابد [24]. همین امر ما را ملزم جستجوی فن‌آوری جدید برای استفاده از پسماند جنگل نموده است تا در دسترس بودن را افزایش، هزینه‌های فراوری را کاهش و مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی را افزایش دهد [25].

یکی از راه‌حل‌های مؤثر، فراوری مستقیم پسماندها به محصولاتی مانند بیوچار، بریکت و چوب‌های خردشده با استفاده از فناوری‌های تبدیل زیست‌توده متحرک است. تولید بریکت باعث کاهش مقدار زیادی از مواد سمی که احتمال پوسیدگی جنگل را دارند، را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، تبدیل بقایای جنگل به بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای جذب کربن و بهبود بهره‌وری خاک‌های جنگلی مورد استفاده قرار گیرد. در فرایند تولید بریکت، نوع ماده اولیه مورد استفاده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری که محتوای لیگنین در مواد اولیه رابطه مستقیمی با زمان سوختن بریکت دارد.

3- پسماند جنگل به‌عنوان ماده خام در فرآیندهای ترموشیمیایی

فرایندهای ترموشیمیایی چندمرحله‌ای مانند کربونیزاسیون هیدروترمال، شکستن، پیرولیز [1] و گازی‌سازی می‌توانند زیست‌توده را (در شکل پسماند جنگلی) به گاز، ترکیبات شیمیایی و انرژی تبدیل کنند [8]. این فرآیندها در راکتورهایی با طرح‌های مختلف و با پارامترهای فیزیکی متفاوت (زمان، دما و سرعت افزایش آن، واکنش اتمسفر اطراف) انجام می‌شوند و اشکال مختلفی از محصولات نهایی مانند گازها (سینگاز)، مایعات (روغن‌های زیستی) و جامدات (هیدروچار، زیست توده شکسته شده یا بیوچار) تولید می‌کنند.

سینگاز (تشکیل شده از گازیفیکاسیون [2] یا پیرولیز) در تولید سوخت‌های مایع استفاده می‌شوند. این سوخت‌ها شامل متانول یا سایر هیدروکربن‌های چنداتمی است که از طریق واکنش‌های شیمیایی با استفاده از فرایند سنتز فیشر - تروپش تولید می‌شوند [26]. گاز سنتز را می‌توان در سلول‌های سوختی هیدروژنی برای تولید الکتریسیته استفاده کرد که توسعه برخی از صنایع هیدروژنی مبتنی بر زیست‌توده جنگلی را تسهیل خواهد کرد [27].

روغن‌های زیستی به‌دست‌آمده از مایع‌سازی یا از طریق پیرولیز متوسط و سریع از نظر خواص فیزیکی - شیمیایی با سوخت‌های مبتنی بر نفت تفاوت دارند. بااین‌حال، روغن‌های زیستی خام به دلیل محتوای بالای آب، ویسکوزیته، خاکستر، اسیدیته و همچنین ارزش حرارتی پایین ناشی از محتوای بالای اکسیژن برای کاربردهای سوخت نامطلوب هستند؛ بنابراین، آنها باید با روش‌هایی مانند میکروامولسیون، پیرولیز یا استریفیکاسیون ارتقا یابند [28]. این روش‌ها امکان استفاده از روغن‌های زیستی به عنوان سوخت برای احتراق در دیگ‌های بخار، توربین‌های گازی و تولید مواد شیمیایی را فراهم می‌سازند [29]. امکان توسعه بازار برای روغن‌های زیستی تولید شده از زیست‌توده جنگلی با بکارگیری تکنیک‌ها و ابزارهای تحلیلی پیشرفته وجود دارد [30].

منشأ بیوچار به قبایل بومی مناطق آمازون، معروف به "ترا پرتا" برمی‌گردد. مطالعات نشان داده‌اند که این خاک‌ها به دلیل دارابودن سطح بالایی از مواد آلی پایدار، بیوچار و مواد مغذی مشتق‌شده از منابع معدنی و آلی، بسیار حاصلخیز هستند [31]. در قرن نوزدهم، بیوچار به‌عنوان یک ماده بهبوددهنده خاک برای افزایش تولید محصولات کشاورزی در اروپا و آمریکای شمالی مورد استفاده قرار گرفت [32].

بیوچار، ماده جامد غنی از کربن پایدار است که از انواع مختلف زیست-توده به‌وسیله پیرولیز تحت شرایط اکسیژن محدود در دمای 300-1000 درجه سانتیگراد به دست می‌آید [33]. بیوچار یک ماده جامد کربن‌دار متخلخل که طی سه مرحله پیرولیز، کربنیزاسیون [3] و گازسازی تولید می‌گردد. این واکنش‌های فیزیکوشیمیایی هم‌زمان انجام می‌شوند و زیست‌توده را به زغال و گاز تبدیل می‌کنند.

بر اساس تعریف بین‌المللی، بیوچار غنی از کربن آلی است که تا حد زیادی در طی پیرولیز مواد اولیه گیاهی و پسماند تولید می‌شود. بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک می‌تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم انتشار کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای را از خاک کاهش دهد. بیوچار ظرفیت نگهداری مواد مغذی را افزایش، نیاز کود را کاهش، آب‌وهوا و اثرات زیست‌محیطی را بر زمین‌های زراعی کاهش می‌دهد. استانداردهای گواهی اروپایی بیوچار [4] (EBC)، بیوچار را به‌عنوان یک ماده زغالی شکل که تحت شرایط کنترل‌شده پیرولیز از زیست‌توده حاصل می‌شود، تعریف می‌کند که می‌تواند برای اهدافی که شامل کانی‌سازی سریع آن به CO_2 نمی‌شود، مورد استفاده قرار گیرد [34].

بیوچار ذرات حرارتی خاصی هستند که از نظر محیطی پایدار، دارای کیفیت بالا و می‌توانند برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند. بااین‌حال، EBC استفاده از محصولات بیوچار به‌دست‌آمده از طریق فرایندهای دیگر مانند کربن‌سازی هیدروترمال، شکستن [5] و کک‌سازی [6] را توصیه نمی‌کند. اساساً بیوچار و زغال‌چوب یک ماده هستند که خواص ساختاری و فیزیکی - شیمیایی مشابهی از خود نشان می‌دهند؛ اما در کاربردهایشان متمایز می‌شوند. اصطلاح بیوچار جدید است و برای نشان‌دادن این واقعیت مطرح شد که از مواد بیولوژیکی تولید می‌شود و می‌توان آن را در خاک استفاده کرد؛ درحالی‌که زغال‌چوب یک منبع انرژی تجدیدپذیر است. سایر اصطلاحات مورد استفاده برای بیوچار شامل آگریچار، آگری کربن، بیو کربن، کربن سیاه است. بیوچار و زغال‌چوب مشابه هیدروچار هستند که به‌صورت دوغاب در آب توسط کربنیزاسیون هیدروترمال زیست‌توده تحت‌فشار تولید می‌شود. بااین‌حال، بیوچار و هیدروچار در خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت هستند [35].

اجزای تشکیل‌دهنده بیوچار شامل یک تا 15 درصد آب، نیم تا 5 درصد مواد معدنی، 50 تا 90 درصد کربن و صفر تا 40 درصد مواد فرار است. بیوچار حداقل از چهار نوع کربن تشکیل شده است.

1 pyrolysis
2 gasification
3 carbonization
4 European Biochar certification

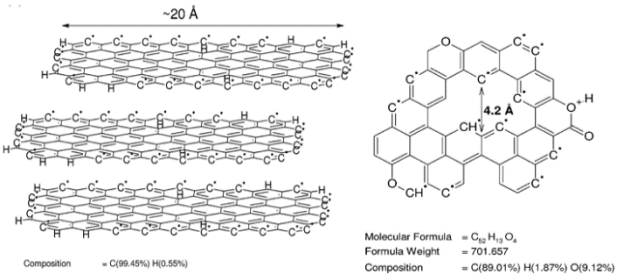
[5] قبل از سوزاندن زیست‌توده آن را خشک می‌کنند. این فرایند شیمیایی خشک‌سازی (torrefaction) نامیده می‌شود. در طول واکنش، زیست‌توده تا حدود ۲۰۰ تا ۳۲۰ درجه سلسیوس (۳۹۰ تا ۶۱۰ درجه فارنهایت) گرم می‌شود. زیست‌توده به‌قدری کامل خشک می‌شود که توانایی جذب رطوبت یا پوسیدگی را از دست می‌دهد.

[6] کک با حرارت دادن زغال در دماهای بالا برای مدت طولانی تولید می‌شود. این فرآیند به عنوان "تقطیر حرارتی" یا "کک سازی" شناخته می‌شود. زغال سنگ معمولاً به مدت 15 تا 18 ساعت در کوره‌های بلندی که برای تولید کک استفاده می‌شود، در معرض تقطیر حرارتی قرار می‌گیرد. این فرآیند ممکن است تا 36 ساعت ادامه یابد.

- کربن فوق متحرک[1]: کربنی که در طی چند ساعت تا چند روز معدنی می‌شود و به دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌گردد.
- کربن متحرک[2]: کربنی که معدنی شدن آن چند هفته تا چند ماه طول می‌کشد.
- کربن ناپایدار: کربنی که در طی ماه‌ها تا چند سال معدنی می‌شود.
- کربن پایدار: کربنی که زمان طولانی (بیش از 100 سال) برای معدنی شدن نیاز دارد [36].

4- ماده خام اولیه بیوچار

برای تولید بیوچار می‌توان از هر نوع ماده خام اولیه استفاده نمود که به‌طورکلی این منابع را می‌توان به زیست‌توده قبل از برداشت و زیست‌توده بعد از برداشت تقسیم کرد [37]. این گروه‌ها شامل مواد مختلفی مانند محصولات انرژی‌زا (سوسن، بید و کاج)، زیست‌توده کشاورزی (کلزا، آفتابگردان و ساقه ذرت)، پسماندهای جنگلی، پسماندهای زیست تخریب‌پذیر شهری (مانند پسماندهای سبز، پسماندهای مواد غذایی، مقوای مستعمل) هستند. ضایعات فراوری محصولات کشاورزی (مانند جو دوسر پس از تخمیر، پوست غلات، دانه انگور، پوست پرتقال، پوست شاه بلوط، نارگیل، آسیاب زیتون)، محصولات جانبی و ضایعات حیوانی، مواد و بقایای زیست تخریب‌پذیر صنعتی (مانند کاغذ باطله). هاضمات حاصل از هضم بی‌هوازی، سوخت متراکم حاصل از زباله، مواد چوبی، لجن فاضلاب شهری، بستر و کود مرغی، کود دامی و زیست‌توده جلبکی [38-40]. ساختار بیوچار به دلیل تنوع در مواد خام اولیه متفاوت است و به‌طور کلی ساختار اصلی آن از دو بخش تشکیل شده است: ورقه‌های گرافن کریستالی انباشته و ساختارهای معطر و بی‌شکل که به‌طور تصادفی مرتب شده‌اند [36]. شکل 1 ساختار بیوچار را نشان می‌دهد.



شکل 1 ساختار بیوچار. سمت راست مدل گرافیتی و سمت راست ساختار معطر حاوی رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کربن را نشان می‌دهد

5- عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار

ساختار و میزان خلل‌وفرج از ویژگی‌های فیزیکی بیوچار بشمار می‌روند که به طور مستقیم و غیرمستقیم بر خصوصیات خاک، آب و گیاه تأثیر می‌گذارد. فراهم‌آوردن شرایطی مناسب برای زیستگاه میکروارگانیسم‌های خاک جهت رشد و نمو است [36].

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار تحت‌تأثیر عوامل مختلفی ازجمله نوع مواد اولیه، شرایط واحد پیرولیز، سرعت پیرولیز، اندازه ذرات ماده اولیه و فناوری پیرولیز، پارامترهای فرایند اعمال شده و مدت‌زمان پیرولیز است.

1 labile super
2 labile

دامنه گسترده فرایند پیرولیز منجر به تشکیل بیوچارهایی می‌شود که از نظر ترکیب عنصری و خاکستر، جرم مخصوص، تخلخل، توزیع اندازه منافذ، سطح ویژه، خصوصیات شیمیایی سطح، جذب و دفع آب و یون‌ها، pH و یکنواختی ساختمان فیزیکی بسیار متفاوت هستند. ترکیبات شیمیایی زیست‌توده نقش مستقیمی بر خصوصیات فیزیکی بیوچار تولیدی دارد. [5، 41]. استفاده از مواد اولیه با محتوای لیگنین بالا می‌تواند منجر به بالاترین بازده تولید بیوچار در دماهای پایین‌تر شود [42].

بیوچار وقتی در خاک‌های کشاورزی به کار برده می‌شود در معرض فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی قرار می‌گیرد، بنابراین پایداری بیوچار به کار برده شده بسیار مهم است. در واقع شاخص پایداری کربن در بیوچار تولیدی نسبت به درصد کربن بیوچار از اهمیت بیشتری برخوردار است [45].

در طی تبدیل حرارتی مواد اولیه انتخابی، بیوچار از واکنش اکسیژن کم یا بدون اکسیژن با روغن زیستی (مخلوط هیدروکربن‌ها)، گاز سنتز[3] (مخلوط هیدروکربن‌های گازی) تولید می‌شود. دماهای اعمال شده برای تولید بیوچار بین 100 تا 1000 درجه سانتیگراد است [46]. با افزایش دمای تولید بیوچار از 200 به 300 درجه سانتی‌گراد، مواد آلی پایدار افزایش می‌یابد. مواد آلی پایدار در واقع باقی‌مانده ماده قابل احتراقی است که مواد آلی آن اکسید شده است. با افزایش دمای تولید بیوچار، ماده آلی قابل اکسید و احتراق هر دو کاهش می‌یابند.[45]. بازده محصولات پیرولیز توسط پارامترهای حالت یا فرایند اعمال شده از جمله دما، نرخ گرمایش و زمان ماند تعیین می‌شود که در جدول 2 تشریح شده است. به‌عنوان‌مثال، تبدیل زیست‌توده از طریق پیرولیز آهسته می‌تواند منجر به حدود 35 درصد بیوچار، 30 درصد روغن زیستی و 35 درصد گاز سنتز شود [47].

جدول 2 تجزیه در اثر حرارت زیست‌توده - بازده معمول محصولات به دست آمده با حالت‌های مختلف [43،44]

حالت	درجه‌حرارت ℃	زمان ماند	مایع (درصد)	سینگاز (درصد)	بیوچار (درصد)
پیرولیز سریع	1000-300	کمتر از 2 ثانیه	75	13	12
پیرولیز متوسط	500	12-10 ثانیه	50	30	20
پیرولیز آهسته	1000-100	30-5 دقیقه	30	35	35

گستردگی و ارزانی منابع اولیه از ویژگی‌های مهم تولید بیوچار است و به‌طورکلی به دودسته پسماندهای قبل و بعد از استفاده می‌توان تقسیم نمود که در هر دو حالت یا ترکیبی از هر دو، امکان تولید بیوچار وجود دارد. عواملی همچون شرایط و فناوری تولید و خواص اولیه مواد در تولید بیوچار تأثیر دارند. لیگنین رابطه مستقیمی با بازده تولید دارد و به طور چشمگیری میزان بازده را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بیوچار با افزایش ظرفیت نگهداری مواد مغذی، نیاز کودی را کاهش می‌دهد. استفاده کمتر از کود سبب ارگانیک

[3] گاز سنتز به انگلیسی (Synthesis gas): به مخلوط گازی اطلاق می‌شود، که ترکیبی از هیدروژن و کربن منوکسید به نسبت‌های مختلف است. گاز سنتز به‌عنوان یک محصول میانی در صنعت پتروشیمی برای تولید سوخت، سنتز محصولات پرارزش و بسیاری موارد دیگر استفاده می‌شود.

بودن محصول خواهد شد و از طرفی استفاده از کودهای شیمیایی بر اکوسیستم تأثیر منفی خواهد داشت.

6- کاربردهای بالقوه بیوچار

مفهوم استفاده از بیوچار به‌عنوان ابزاری برای رسیدگی به مسائل زیست‌محیطی با مشکلات زیر مرتبط است: تخریب خاک و ناامنی غذایی، تغییرات آب‌وهوا، تولید انرژی پایدار و مدیریت پسماند [48]. بیوچار در تعدادی از کاربردها مانند دامپروری، تهویه خاک، ساختمان سازی، آلودگی زدایی، تولید کمپوست و بیوگاز، تصفیه فاضلاب و آب آشامیدنی، منسوجات و سلامت استفاده کاربرد دارد [49]. همچنین می‌تواند به‌عنوان زیست‌محیطی سبز در خاک‌ها برای مدیریت آب و همچنین در خاک‌های آلوده استفاده شود [46]. علاوه بر این، بیوچار به دلیل مساحت سطح و حجم منافذ زیاد می‌تواند به‌عنوان زیستگاه میکروارگانیسم‌ها برای تحریک فعالیت میکروبی خاک عمل کند [50].

بیوچار به دلیل خواص منحصربه‌فرد (سطح ویژه، ریز تخلخل و ظرفیت جذب) می‌تواند در تصفیه خاک، آب‌های زیرزمینی و به‌عنوان رسانه فلتر برای آب‌های سطحی مورد استفاده قرار گیرد. بیوچار به دلیل سطح ویژه بالا (تخلخل) و طبیعت بسیار کربناته به‌عنوان یک جاذب منحصربه‌فرد شناخته می‌شود. کاربرد آن در خاک حتی در مقادیر کم، می‌تواند جذب را افزایش داده و در نتیجه دسترسی زیست آلاینده‌ها به میکروارگانیسم‌های موجود در خاک، گیاهان یا کرم‌های خاکی را کاهش دهد. علاوه بر این، بیوچار ظرفیت نگهداری مواد مغذی و همچنین توانایی خاک برای حفظ و آزادسازی آهسته مواد مغذی گیاه را افزایش می‌دهد [51].

در ایران کاهش میزان سرانه آب تجدیدپذیر بر بخش‌های مختلف ازجمله بخش کشاورزی تأثیر چشمگیری داشته است. مقابله با این چالش تنها با مدیریت و بهینه‌سازی مصرف آب قابل‌حل می‌باشد که اخیراً روش کم آبیاری جهت مقابله با این مشکل پیشنهاد شده است. کم آبیاری یک روش مدیریتی پویا و کارا جهت مدیریت منابع آبی است که یک راهکار بهینه برای عمل آوردند محصولات در این شرایط می‌باشد. این روش باعث کمبود آب در محصول شده و کیفیت و کمیت محصول تولیدی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. برای جبران این کمبود از بیوچار استفاده می‌شود؛ زیرا خواص اصلی بیوچار جذب آب است. بیوچار باعث می‌شود خاک همیشه مرطوب و گیاه بی‌آب نباشد. در پژوهشی اثرات بیوچار در سطح‌های مختلف بر روی محصول ذرت را بررسی کردند. نتایج نشان داد، استفاده از 10 تن بیوچار در مزرعه باعث کاهش مصرف 25 درصد آب شد بدون اینکه کیفیت و کمیت محصول تحت تنش قرار بگیرد [52].

در پژوهشی بیوچار فعال حاصل از فراوری بقایای کارخانه‌های چوب‌بری را با فاضلاب تماس دادند که کاهش قابل‌توجهی در غلظت آلاینده‌ها مشاهده شد [53]. بیوچار حاصل از بقایای جنگل دو برابر تخلخل کمتر (حجم منافذ کل و مساحت سطح) دارد [54]. بیوچارهای مبتنی بر بقایای جنگل در مقایسه با کربن‌های فعال تجاری میزان تخلخل بسیار بالاتری دارند که می‌توان آنها را به طور گسترده در صنعت انرژی زیستی به کار برد. علاوه بر این، با سخت‌تر شدن قوانین حاکم بر غلظت آلاینده‌های ناشی از فاضلاب رها شده اصلاح خواص فیزیکی - شیمیایی بیوچار گزینه خوبی باشد [9].

خواص بیوچار نقش مهمی در کاربردهای کشاورزی دارد که اعم است از محتوای مواد مغذی، ترکیب عنصری، محتوای خاکستر و فراریت، توانایی جذب مولکول‌های آلی و معدنی مختلف، مساحت سطح، تخلخل و اندازه ذرات و چگالی ظاهری [42]. بیوچارهای تولید شده از گیاه را می‌توان به‌عنوان تهویه کننده خاک استفاده کرد، درحالی‌که بیوچارهای فراوری شده از کود را می‌توان هم به‌عنوان تهویه کننده خاک و هم به‌عنوان کود به دلیل انتشار مواد مغذی استفاده کرد [55].

بیوچار با بهبود تخلخل در ذخیره انرژی یا جذب آلاینده‌های آلی و معدنی مفید است و به حفظ میکروارگانیسم‌های کافی در خاک و حذف آلاینده‌ها در آب‌های سطحی کمک کند. اگر منابع تولید بیوچار گیاهان باشد فقط سیستم تهویه خاک را بهبود می‌بخشد.

6-1- بیوچار برای احیاء اراضی

بیوچار حاصلخیزی، ظرفیت نگهداری آب، pH و مواد آلی خاک را بهبود می بخشد و همچنین از شسته شدن مواد مغذی و نفوذ آلاینده‌های آلی و معدنی جلوگیری می‌کند. این ویژگی بیوچار می‌تواند برای مقابله با تخریب زمین و همچنین برای احیای زمین‌های آلوده و تخریب شده استفاده شود. تعدادی از مطالعات اثرات بیوچار بر روی خاک‌های آلوده، از جمله اصلاح خاک‌های آلوده به ترکیبات آلی و معدنی را تجزیه‌وتحلیل کرده‌اند [56].

در پژوهشی تأثیر بیوچار بر تحرک، قابلیت جذب و سمیت آلاینده‌های معدنی و آلی را در یک خاک‌آلوده چند عنصری بررسی گردید و نتایج نشان داد که افزودن بیوچار منجر به کاهش 10 برابری کادمیوم [1] (Cd) در آب حفره‌ای و کاهش بیش از 50 درصدی هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای مشهود بود که به کاهش سمیت گیاهی کمک می‌کند [57]. در پژوهشی دیگر اثر بیوچار را بر بهبود پسماندهای آلوده به فلزات سنگین برای فناوری تثبیت گیاهی مورد مطالعه قرار گرفت. آنها پسماندهای آلوده را با بیوچار بقایای درخت آلو با نسبت‌های 1درصد، 5 درصد و 10 درصد مخلوط کردند که افزایش pH، حفظ مواد مغذی از نظر ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، ظرفیت نگهداری آب و کاهش قابلیت جذب Cd، Pb، Tl و Zn را مشاهده کردند [58]. بر اساس نتایج، به این نتیجه رسیدیم که افزودن بیوچار می‌تواند پایداری پسماندهای آلوده را افزایش داده و امکان تشکیل پوشش سبز را در فرایند تثبیت گیاهی فراهم کند. در مطالعه‌ای پتانسیل کود مرغی و بیوچارهای حاصل از پسماند سبز [2] را در کاهش قابلیت جذب و سمیت گیاهی فلزات سنگین مورد مطالعه قرار دادند و خاطرنشان کردند که این بیوچار در تثبیت فلزات در خاک موثر است [59].

6-2- بیوچار برای احیای جنگل نواحی تخریب شده

[1] کادمیم (Cadmium): عنصر شیمیایی است که در جدول تناوبی با نشان Cd و عدد اتمی ۴۸ قرار گرفته‌است. کادمیم عنصری نسبتاً کمیاب، نرم، رنگ سفید مایل به آبی و فلز واسطه سمی است.

[2] پسماند سبز یا زباله سبز که به عنوان "پسماند زیست‌شناختی" نیز شناخته می‌شوند، هر گونه زباله آلی است که می‌تواند کمپوست شود. معمولاً از زباله‌های باغ‌ها مانند بریده‌ها یا برگ‌های چمن و پسماندهای آشپزخانه خانگی یا صنعتی تشکیل می‌شود. زباله‌های سبز شامل چیزهایی مانند برگ‌های خشک، کاه کاج یا یونجه نمی‌شود.

اصلاحات مبتنی بر بیوچار در مناطقی اعمال می‌شود که هزاران هکتار از زمین‌ها توسط معادن شن و ماسه روباز تخریب می‌شود. این عمل منجر به تغییر چشمگیر چشم‌انداز و تخریب محیط طبیعی، بهره‌برداری بیش از حد منابع جنگلی و کاهش کیفیت منابع آبی می‌شود. خاک‌های این مناطق به دلیل ویژگی‌های نامطلوب شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خود، چالش بزرگی برای احیاء هستند. ما فرض می‌کنیم که بیوچار با تأثیر بر میکروارگانیسم‌ها می‌تواند توسعه و کیفیت خاک را با بهبود خواص بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی آن و تسریع جانشینی افزایش دهد.

طبق قانون لهستان، زمین‌هایی که برای اهداف مختلف استخراج می‌شوند (به‌عنوان‌مثال برای به‌دست‌آوردن زغال‌سنگ یا مواد معدنی) باید عملیات احیاء (با آهک، کود یا با پوشش گیاهی مجدد) دریافت کنند. معمولاً اصلاح ارگانیک برای احیاء با استفاده از بستر جنگلی محلی با افزودن کود و کود سبز انجام می‌شود. جنگل‌کاری اراضی احیا شده روندی کند و گاه ناموفق است. همچنین با محدودیت آب و مواد مغذی به‌دست‌آمده از مواد آلی خاک (کاوش‌های پس از استخراج شن و ماسه) همراه است [57].

تا کنون کاربرد بیوچار به‌عنوان یک روش احیا شناخته نشده است. علاوه بر این، این مفهوم اغلب توسط جوامع محلی از جمله دانشمندان، مدیران و شهروندان ناپسند است. مطالعات انجام شده در زامبیا و اندونزی نشان داد که استفاده از بیوچار باعث افزایش pH و CEC خاک و همچنین اشباع پایه می‌شود. مشخص شد که افزودن چهار تن بیوچار در هکتار اثرات مشهودی بر عملکرد محصول دارد. علاوه بر افزایش pH و محتوای مواد مغذی (مانند پتاسیم، منیزیم و کلسیم) در خاک، ظرفیت نگهداری آب، تخلخل و CEC را بهبود بخشید که در یک چشم‌انداز بلندمدت مهم هستند. بیوچار نیز ممکن است اثرات منفی بر خاک داشته باشد. به‌عنوان‌مثال، خواص قلیایی آن ممکن است منجر به شرایط نامطلوب برای کاشت کاج یا آلودگی خاک شود. باتوجه‌به اثرات مثبت بیوچار، می‌توان این روش را برای بهبود کیفیت خاک‌های شنی که فقیرترین بخش خاک است، توصیه کرد [60].

یکی از عوامل اصلی در مورد پتانسیل بیوچار که باید بررسی شود، توانایی آن در بهبود کیفیت احیای جنگل و پتانسیل جذب کربن است. باتوجه‌به دانش و تجربیات فعلی کشاورزی، افزودن بیوچار به‌تنهایی یا به‌صورت مخلوط با کود سبز به یک بستر بازیافتی می‌تواند خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن را بهبود بخشد و بر کیفیت آب تأثیر بگذارد و همچنین محتوای کربن تثبیت‌شده را افزایش دهد. رشد ساختمان‌سازی، استخراج معادن و استفاده از چوب روند صعودی تخریب محیط‌زیست را به همراه دارد. کاشت نهال و پوشش گیاهی با صرف هزینه گزافی همراه است و روند آرامی را به دنبال دارد. باتوجه‌به تحقیق و پژوهش‌های انجام شده می‌توان اذعان داشت که بیوچار با اعمال تغییراتی در خواص خاک سبب بهبود عملکرد خواهد شد و می‌توان در مناطق کم‌بارش، خاک‌های شنی یا در معادن و محل استخراج شن و ماسه استفاده نمود تا از کاهش سطح زیر کشت جلوگیری شود و محصول با کیفیت تحویل گردد.

7- پسماندهای جنگل به‌عنوان ماده خام در فرآیندهای بیوشیمیایی

برای تولید سوخت زیستی از بقایای جنگل می‌توان از دو روش استفاده کرد. یکی هضم بی‌هوازی است که محصول نهایی آن متان است. بیوگاز می‌تواند برای تولید گرما و برق استفاده شود. محصول زائد حاصل از هضم بی‌هوازی، دوغاب است که به‌عنوان کود آلی استفاده می‌شود [8]. بااین‌حال، همه بقایای جنگل کارایی یکسانی برای تولید بیوگاز ندارند. مقدار متان به دست آمده از بقایای چوب سخت چندین برابر بیشتر از بقایای چوب نرم است. بنابراین در مناطقی که بیشتر چوب برداشت‌شده نرم است، شاید تولید بیوگاز از نظر اقتصادی چشمگیر نباشد. علاوه بر این، تبدیل پسماندهای جنگل به بیوگاز به روش‌های رادیکال‌تری در مقایسه با فراوری بقایای کشاورزی نیاز دارد [61].

در مقابل، تخمیر بر اساس هیدرولیز آنزیمی زیست‌توده چوب منجر به تولید اتانول یا بوتانول می‌شود. شکل‌گیری این نوع محصول نهایی با نسبت مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها (آنزیم‌ها و باکتری‌ها) تعیین می‌شود. بهینه‌ترین پارامترها در تخمیر بقایای زیست‌توده جنگل برای تولید اتانول و بوتانول تنها پس از 36 تا 60 ساعت قابل دستیابی هستند [62]. علاوه بر این، آنزیم‌های هیدرولیتیک (آبکافت) مورد استفاده در تخمیر گران هستند. این ویژگی‌های منفی جذابیت این فرایند را علیرغم مزایای قابل توجهی مانند عدم نیاز به خشک کردن زیست‌توده، دمای پایین فرایند و امکان دستیابی به سوخت‌های زیستی با خواص مختلف را کاهش می‌دهد [63].

8- بقایای جنگل به‌عنوان یک ماده خام مفید در تولید غذا و خوراک

بقایای جنگل بستر مناسبی برای پرورش حشرات خوراکی است. در پژوهشی نشان دادند که حشرات می‌توانند نه‌تنها در کنترل آفات و کنترل زیستی، بلکه برای اهداف غذایی یا خوراک (مراحل زندگی مناسب سوسک‌ها، موریانه‌ها، مورچه‌ها و پروانه‌ها) در کشت‌های مصنوعی مبتنی بر بقایای جنگل‌ها استفاده شوند [64]. کشت قارچ خوراکی بر روی بسترهای حاصل از بقایای زراعت جنگلی نشان دهنده یک سیستم یکپارچه با دفع پسماند است که به دستیابی تولید پایدار، بهبود سلامت انسان و سودمندی محیط‌زیست کمک می‌کند [65].

بقایای جنگل می‌تواند بسترهای بالقوه‌ای را برای رشد حشرات مختلف فراهم کند. ازاین‌رو، پرورش این مواد بر روی بسترهای آماده شده مناسب ممکن است مدیریت پایدار جنگل، حفاظت از محیط‌زیست و امنیت غذایی جهانی را در آینده ارتقا دهد. بااین‌حال، تحقیقات گسترده‌ای برای تجزیه‌وتحلیل استفاده آینده برخی از گونه‌های حشرات برای اهداف غذایی و خوراک بر اساس بقایای جنگل موردنیاز است.

9- نتیجه

پسماندهای جنگلی (شامل خرده چوب و بقایای چوب) بدون شک یک ماده خام طبیعی و تجدیدپذیر هستند که می‌توانند در سراسر جهان برای اهداف متنوعی مورد استفاده قرار گیرند. باتوجه‌به ضرورت حفاظت از آب‌وهوا و محیط‌زیست، بخشی از این ضایعات چوبی می‌توانند به طور موفقیت‌آمیزی جایگزین مواد خام فسیلی در تولید انرژی و سوخت شوند. البته بقایای جنگلی کارایی یکسانی در تولید بیوگاز ندارند؛ اما درهرحال، استفاده از آن‌ها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و قابل‌قبول است. بااین‌وجود، میزان تولید بیوگاز از بقایای چوب سخت بسیار بیشتر از بقایای چوب نرم است.

استفاده از پسماندهای جنگلی تا 50 درصد در ساخت پانل‌های چوبی نه‌تنها مفید است، بلکه استقامت این پانل‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. پانل‌های چوبی در ساخت سقف، کف آشپزخانه و دیوارها به‌منظور زیبایی و کاهش

وزن سازه کاربرد دارند. برای افزایش مقاومت در برابر آب، جلوگیری از حمله حشرات و همچنین افزایش طول عمر این پانل‌ها، از مواد شیمیایی به‌عنوان بهینه‌ساز استفاده می‌شود.

سالانه هزاران تن پسماند لیگنین و سلولز از هرس درختان در سطح کشور تولید می‌شود که می‌تواند نقش مؤثری در تأمین ماده آلی خاک‌های کشاورزی و مرتعی ایفا کند. این مواد به‌عنوان منبعی بالقوه برای بهبود ماده آلی خاک‌های کشاورزی و مرتعی محسوب می‌شوند. علاوه بر این، استفاده از آسان‌ترین منابع در شرایط کنترل شده می‌تواند باعث کاهش آلودگی هوا ناشی از سوزاندن غیراصولی بقایای چوب در مناطقی شود که بیشترین حجم چوب جامد برداشت می‌شود.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار تحت‌تأثیر عوامل مختلفی ازجمله نوع مواد اولیه، شرایط واحد پیرولیز، سرعت پیرولیز، اندازه ذرات ماده اولیه و فناوری پیرولیز، پارامترهای فرایند اعمال شده و مدت‌زمان پیرولیز است. بیوچار وقتی در خاک‌های کشاورزی به کار برده می‌شود در معرض فرایندهای بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی قرار می‌گیرد، بنابراین پایداری بیوچار به کار برده شده بسیار مهم است. در واقع شاخص پایداری کربن در بیوچار تولیدی نسبت به درصد کربن بیوچار از اهمیت بیشتری برخوردار است. از سوی دیگر، در مناطقی که قبلاً توسط فعالیت‌های معدنی و صنعتی تخریب شده‌اند، استفاده از بقایای جنگل‌ها به‌عنوان ماده خام می‌تواند با تحت‌تأثیر قراردادن ظرفیت نگهداری آب، pH و مواد آلی خاک به احیای جزئی یا احیای خواص ازدست‌رفته محیط طبیعی (آب، خاک و هوا) کمک کند. بقایای جنگل می‌تواند بستری برای کشت قارچ خوراکی باشد که به مدیریت پایدار جنگل، حفاظت از محیط‌زیست و امنیت غذایی جهانی کمک می‌کند.

10- مراجع

[1] B. Mouillé, G. Dauphin, L. Wiersma, S. D. Blacksell, F. Claes, W. Kalpravidh, S. Hietala, A tool for assessment of animal health laboratory safety and biosecurity: the safety module of the Food and Agriculture Organization's Laboratory Mapping Tool, *Tropical Medicine and Infectious Disease*, Vol. 3, No. 1, pp. 33-44, 2018.

[2] A. Favero, A. Daigneault, B. Sohngen, J. Baker, A system-wide assessment of forest biomass production, markets, and carbon, *GCB Bioenergy*, Vol. 15, No. 2, pp. 154-165, 2023.

[3] P. J. Verkerk, J. B. Fitzgerald, P. Datta, M. Dees, G. M. Hengeveld, M. Lindner, S. Zudin, Spatial distribution of the potential forest biomass availability in Europe, *Forest Ecosystems*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–11, 2019.

[4] M. Savari, H. E. Damaneh, H. E. Damaneh, Factors involved in the degradation of mangrove forests in Iran: A mixed study for the management of this ecosystem, *Journal for Nature Conservation*, Vol. 66, No. 1, pp. 126153-126161, 2022.

[5] A. Mahmoodian Choplou, H. Niknahad Gharmakher, H. Yousefi, Biochar production from peach trees pruned foliage and its qualitative properties at different temperatures, *Journal of Water and Soil Conservation*, Vol. 27, No. 3, pp. 105-124, 2020. (in Persian)

[6] M. Savari, B. Khaleghi, Factors influencing the application of forest conservation behavior among rural communities in Iran, *Environmental and Sustainability Indicators*, Vol. 21, No. 1, pp. 100325-100334, 2024.

[7] M. Njenga, M. Iiyama, Y. Terada, D. Kitenge, J. K. Gitau, R. Kinuthia, R. Mendum, "The Problem is a Lack of Firewood": Charcoal briquettes for cooking energy in refugee and host communities, *Social Sciences & Humanities Open*, Vol. 9, No. 1, pp. 100852-1008531, 2024.

[8] A. Tolessa, Bioenergy production potential of available biomass residue resources in Ethiopia, *Journal of Renewable Energy*, Vol. 2023, No. 1, pp. 2407300-2407309, 2023.

[9] F. L. Braghiroli, L. Passarini, Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities, *Current Forestry Reports*, Vol. 6, No. 1, pp. 172–183, 2020.

[10] I. T. Amarasinghe, Y. Qian, T. Gunawardena, P. Mendis, B. Belleville, Composite panels from wood waste: A detailed review of processes, standards, and applications, *Journal of Composites Science*, Vol. 8, No. 10, pp. 417, 2024.

[11] M. T. Ter-Mikaelian, J. Chen, S. M. Desjardins, S. J. Colombo, Can Wood Pellets from Canada's Boreal Forest Reduce Net Greenhouse Gas Emissions from Energy Generation in the UK?, *Forests*, Vol. 14, No. 6, pp. 1090-1099, 2023.

[12] C. R. P. Narciso, N. D. Nogueira, J. F. Mendes, T. M. C. Eugênio, A. de Lima Felix, R. F. Mendes, Development of iron ore tailings based wood-cement composite panels, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 30, No. 54, pp. 115381-115395, 2023.

[13] Q. Song, F. Kong, B. F. Liu, X. Song, H. Y. Ren, Biochar-based composites for removing chlorinated organic pollutants: Applications, mechanisms, and perspectives, *Environmental Science and Ecotechnology*, Vol. 1, No. 1, pp. 100420-100429, 2024.

[14] T. A. Yeshiwas, B. S. Yigezu, Y. M. Desalegn, Investigation on the mechanical properties of wood-plastic composites for the application of ceiling panels, *Materials Research Express*, Vol. 11, No. 8, pp. 85304-85312, 2024.

[15] F. L. Braghiroli, L. Passarini, Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities, *Current Forestry Reports*, Vol. 6, No. 1, pp. 172–183, 2020.

[16] S. Migneault, A. Koubaa, P. Perré, Effect of fiber origin, proportion, and chemical composition on the mechanical and physical properties of wood-plastic composites, *Journal of Wood Chemistry and Technology*, Vol. 34, No. 4, pp. 241–261, 2014.

[17] M. Saddem, A. Koubaa, H. Bouaff, S. Migneault, B. Riedl, Effect of fber and polymer variability on the rheological properties of wood polymer composites during processing, *Polymer Composites*, Vol. 40, No. 1, pp. 609–616, 2019.

[18] R. Moriana, F. Vilaplana, M. Ek, Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties, *Cellulose*, Vol. 22, No. 1, pp. 3409–3423, 2015.

[19] R. Singh, B. Singh, M. Gupta, H. Tarannum, Composite building materials from natural fibers/agro-forest residues, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, Vol. 27, No. 2, pp. 137–149, 2021.

[20] M. Njenga, M. Iiyama, Y. Terada, D. Kitenge, J. K. Gitau, R. Kinuthia, R. Mendum, "The Problem is a Lack of Firewood": Charcoal briquettes for cooking energy in refugee and host communities, *Social Sciences & Humanities Open*, Vol. 9, No. 1, pp. 100852-100862, 2024.

[21] C. Rhén, M. Öhman, R. Gref, I. Wästerlund, Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 31, No. 1, pp. 66–72, 2007.

[22] Q. N. Nguyen, A. Cloutier, A. Achim, T. Stevanovic, Fuel properties of sugar maple and yellow birch wood in relation with tree vigor, *BioResources*, Vol. 11, No. 2, pp. 3275–113288, 2016.

[23] K. Wang, X. Xu, R. Huo, H. Fang, X. Chen, Flexural reinforcement of wood plastic composite panels by bonding glass fiber reinforced polymer sheets and embedding bars, *Polymer Composites*, Vol. 45, No. 16, pp. 14595-14607, 2024.

[24] A. R. Kizha, H. S. Han, Processing and sorting forest residues: Cost, productivity and managerial impacts, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 93, No. 1, pp. 97–106, 2016.

[25] H. S. Han, A. Jacobson, E. T. Bilek, J. Sessions, Waste to Wisdom: Utilizing forest residues for the production of bioenergy

[44] D. Mohan, C. U. Pittman Jr, P. H. Steele, Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review, *Energy & fuels*, Vol. 20, No. 3, pp. 848–889, 2006.
[45] L. D. Hafshejani, A. A. Naseri, A. Hooshmand, A. S. Mohammadi, F. Abbasi, Prediction of nitrate leaching from soil amended with biosolids by machine learning algorithms, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 102783-102792, 2024. (in Persian)
[46] M. Ahmad, A. U. Rajapaksha, J. E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, Y. S. Ok, Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review, *Chemosphere*, Vol. 99, No. 1, pp. 19–33, 2014.
[47] F. L. Braghiroli, H. Bouafif, C. M. Neculita, A. Koubaa, Performance of physically and chemically activated biochars in copper removal from contaminated mine effluents, *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 230, No. 1, pp. 1–14, 2019. (in Persian)
[48] W. M. Lewandowski, E. Radziemska, M. Ryms, P. Ostrowski, Nowoczesne metody termochemicznej konwersji biomasy w paliwa gazowe, ciekłe i stałe, *Proceedings of ECOpole*, Vol. 4, No. 2, pp. 453–547, 2010.
[49] B. Garcia, O. Alves, B. Rijo, G. Lourinho, C. Nobre, Biochar: production, applications, and market prospects in Portugal, *Environments*, Vol. 9, No. 8, pp. 95-104, 2022.
[50] P. Srinivasan, A. K. Sarmah, R. Smernik, O. Das, M. Farid, W. Gao, feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: production, characterization and potential applications, *Science of the total environment*, Vol. 512, No. 1, pp. 495–505, 2015.
[51] X. Cui, J. Yuan, X. Yang, C. Wei, Y. Bi, Q. Sun, X. Han, Biochar application alters soil metabolites and nitrogen cycle-related microorganisms in a soybean continuous cropping system, *Science of The Total Environment*, Vol. 917, No. 1, pp. 170522-170531, 2024.
[52] S. K. Mohanty, R. Valenca, A. W. Berger, K. M. Iris, X. Xiong, T. M. Saunders, D. C. Tsang, Plenty of room for carbon on the ground: Potential applications of biochar for stormwater treatment, *Science of the total environment*, Vol. 625, No. 1, pp. 1644–1658, 2018.
[53] N. Anderson, J. G. Jones, D. Page-Dumroese, D. McCollum, S. Baker, D. Loeffler, W. Chung, A comparison of producer gas, biochar, and activated carbon from two distributed scale thermochemical conversion systems used to process forest biomass, *Energies*, Vol. 6, No. 1, pp. 164–183, 2013.
[54] M. Uchimiya, I. M. Lima, K. T. Klasson, L. H. Wartelle, Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: roles of natural organic matter, *Chemosphere*, Vol. 80, No. 8, pp. 935–940, 2010.
[55] H. Fakhrabadi, S. C. Khosh, The effect of low irrigation and biochar on quantitative and qualitative properties of basil medicinal plant, *Iran Irrigation and Drainage Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 941-954, 2021. (in Persian)
[56] J. Tang, W. Zhu, R. Kookana, A. Katayama, Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil, *Journal of bioscience and bioengineering*, Vol. 116, No. 6, pp. 653–659, 2013.
[57] L. Beesley, E. Moreno-Jiménez, J. L. Gomez-Eyles, Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil, *Environmental pollution*, Vol. 158, No. 6, pp. 2282–2287, 2010.
[58] G. Fellet, L. Marchiol, G. Delle Vedove, A. Peressotti, Application of biochar on mine tailings: effects and perspectives for land reclamation, *Chemosphere*, Vol. 83, No. 9, pp. 1262–1267, 2011.
[59] J. H. Park, G. K. Choppala, N. S. Bolan, J. W. Chung, T. Chuasavathi, Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals, *Plant and soil*, Vol. 348, No. 1, pp. 429–439, 2011.
[60] A. Mohsenzadeh, A. Jeihanipour, K. Karimi, M. J. Taherzadeh, Alkali pretreatment of softwood spruce and hardwood birch by NaOH/thiourea, NaOH/urea, and biobased products, *Applied engineering in agriculture*, Vol. 34, No. 1, pp. 5–10, 2018.
[26] J. G. Speight, Unconventional gas, *Natural gas*, Vol. 1, No. 1, pp. 59-98, 2019.
[27] A. G. Capodaglio, S. Bolognesi, Ecofuel feedstocks and their prospects, *In Advances in eco-fuels for a sustainable environment*, Vol. 1, No. 1, pp. 15-51, 2019.
[28] B. Najafi, R. Ebrahimzade, A. Hajiri, Effect of Ethanol, Biodiesel and Diesel Blend Fuel on Performance and Pollutants Parameters of Diesel Engine, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 43, No. 1, pp. 11–17, 2011.
[29] B. Karkach, M. Tahiri, A. Haibi, M. Bouya, F. Kifani-Sahban, Review on Fast Pyrolysis of Biomass for Biofuel Production from Date Palm, *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 18, pp. 10463-10472, 2023.
[30] A. P. Pinheiro Pires, J. Arauzo, I. Fonts, M. E. Domine, A. Fernandez Arroyo, M. E. Garcia-Perez, M. Garcia-Perez, Challenges and opportunities for bio-oil refining: A review, *Energy & fuels*, Vol. 33, No. 6, pp. 4683–4720, 2019.
[31] B. Glaser, J. J. Birk, State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio), *Geochimica et Cosmochimica acta*, Vol. 82, No. 1, pp. 39–51, 2012.
[32] C. J. Barrow, Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture, *Applied Geography*, Vol. 34, No. 1, pp. 21–28, 2012.
[33] Z. Bis, Biowęgiel–powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości, *Czysta energia*, Vol. 12, No. 1, pp. 28-31, 2012.
[34] S. Shackley, S. Carter, T. Knowles, E. Middelink, S. Haefele, S. Sohi, S. Haszeldine, Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues, *Energy Policy*, Vol. 42, No. 1, pp. 49–58, 2012.
[35] I. Bargmann, M. C. Rillig, W. Buss, A. Kruse, M. Kuecke, Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley, *Journal of agronomy and crop science*, Vol. 199, No. 5, pp. 360–373, 2013.
[36] M. Afarashte, D. Kolivand, The effect of biochar in increasing the resistance of plants to pathogens, *Biosafety*, Vol. 14, No. 2, pp. 17-30, 2022. (in Persian)
[37] A. Sharma, V. Chhabra, A Review on the Applications of Biochar in Agricultural Farms: A Low Carbon Emission Technology, *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, Vol. 27, No. 7, pp. 480-492, 2024.
[38] W. Zhang, S. Mao, H. Chen, L. Huang, R. Qiu, Pb (II) and Cr (VI) sorption by biochars pyrolyzed from the municipal wastewater sludge under different heating conditions, *Bioresource technology*, Vol. 147, No. 1, pp. 545–552, 2013.
[39] P. Mohanty, S. Nanda, K. K. Pant, S. Naik, J. A. Kozinski, A. K. Dalai, Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood: effects of heating rate, *Journal of analytical and applied pyrolysis*, Vol. 104, No. 1, pp. 485–493, 2013.
[40] R. E. Masto, S. Kumar, T. K. Rout, P. Sarkar, J. George, L. C. Ram, Biochar from water hyacinth (Eichornia crassipes) and its impact on soil biological activity, *Catena*, Vol. 111, No. 1, pp. 64–71, 2013.
[41] A. Khadem, review of biochar effects on soil physical, chemical, and biological properties, *Land Management Journal*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-30, 2017. (in Persian)
[42] W. Kwapinski, C. M. Byrne, E. Kryachko, P. Wolfram, C. Adley, J. J. Leahy, M. H. Hayes, Biochar from biomass and waste, *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 1, No. 1, pp. 177–189, 2010.
[43] H. Chaudhary, J. Dinakaran, K. S. Rao, Comparative analysis of biochar production methods and their impacts on biochar physico-chemical properties and adsorption of heavy metals, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 113003-113014, 2024.

NaOH/urea/thiourea, and NaOH/PEG to improve ethanol and biogas production, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 87, No. 8, pp. 1209–1214, 2012.

[61] L. Matsakas, U. Rova, P. Christakopoulos, Strategies for Enhanced Biogas Generation through Anaerobic Digestion of Forest Material: An Overview, *BioResources*, Vol. 11, No. 2, pp. 5482–5499, 2016.

[62] S. Nanda, A. K. Dalai, J. A. Kozinski, Butanol and ethanol production from lignocellulosic feedstock: biomass pretreatment and bioconversion, *Energy Science & Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 138–148, 2014.

[63] C. S. Knoll, B. M. Wong, D. N. Roy, The chemistry of decayed aspen wood and perspectives on its utilization, *Wood science and technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 439–448, 1993.

[64] V. Varelas, M. Langton, Forest biomass waste as a potential innovative source for rearing edible insects for food and feed–A review, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 41, No. 1, pp. 193–205, 2017.

[65] J. D. Valenzuela-Cobos, F. Guevara-Viejó, A. Grijalva-Endara, P. Vicente-Galindo, P. Galindo-Villardón, Production and Evaluation of Pleurotus spp. Hybrids Cultivated on Ecuadorian Agro-Industrial Wastes: Using Multivariate Statistical Methods, *Sustainability*, Vol. 15, No. 21, pp. 15546-15556, 2023.