

بررسی ویژگی‌های خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی مختلف

چکیده

با توجه به جایگاه ویژه زیست‌توده در تأمین انرژی در دنیای امروز و گسترش روزافزون استفاده از این منابع تجدیدپذیر، پیش‌بینی می‌شود که تولید خاکستر در آینده افزایش یابد. از این رو اهمیت مدیریت و بازیافت خاکستر زیست‌توده با اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی بیش از پیش آشکار شده است. در این مطالعه ویژگی‌های خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، از دو روش کوره الکتریکی و سوزاندن در هوای آزاد برای تهیه خاکستر از شش نوع زیست‌توده لیگنوسلولزی شامل پوسته شالی، کاه گندم، سرشاخه درختان، پسماند MDF، الیاف بازیافت شده از پسماند MDF و خمیر کاغذ باطله استفاده شده. مقدار، ابعاد، رنگ، pH و ترکیب شیمیایی حاصل از زیست‌توده‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. کمترین مقدار خاکستر در الیاف بازیافتی و بیشترین مقدار خاکستر در پوسته شالی مشاهده شده. تمام خاکسترها قلیایی بودند. رنگ خاکستر به دست آمده از روش کوره الکتریکی روشن‌تر از هوای آزاد بود. کمترین ابعاد ذرات خاکستر مربوط به خاکستر خمیر کاغذ روش کوره الکتریکی و بزرگ‌ترین ابعاد مربوط به خاکستر سرشاخه حاصل از روش هوای آزاد بود. ترکیبات شیمیایی خاکسترها با هم متفاوت بود. اطلاعات به دست آمده در تعیین کاربرد مناسب برای خاکسترها مفید می‌باشد.

واژگان کلیدی: پسماند، سیلیس، احتراق، بازیافت، تثبیت خاک، بتون.

بیبا معزی پور*

^۱ استادیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مسئول مکاتبات:

b.moezzi pour@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۰۶

مقدمه

در دو دهه اخیر، استفاده از منابع تجدیدپذیر در تأمین انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تبدیل مستقیم زیست‌توده به انرژی از طریق احتراق در سراسر جهان امری متداول است [۱]. زیست‌توده ترکیب ناهمگنی از مواد آلی و غیرآلی به شکل سیال و جامد است که ترکیبات سلولزی و لیگنوسلولزی دارند و حاصل فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی هستند. زیست‌توده لیگنوسلولزی شامل مخلوطی از پلیمرهای طبیعی از جمله لیگنین (۱۰ تا ۳۰ درصد)، سلولز (۳۰ تا ۵۰ درصد) و همی سلولز (۱۵ تا

۳۵ درصد) با بیش از دو گروه هیدروکسیل در هر مولکول است [۲]. سالانه ۰/۷۴ کیلوگرم پسماند جامد به طور روزانه در جهان تولید می‌شود [۲]. چوب و سایر مواد زیست‌توده لیگنوسلولزی در دسته‌بندی پسماند جامد قرار می‌گیرند. در ترکیب کلی پسماندها ۴۴ درصد مواد سبزی و ارگانیک، ۱۹ درصد کاغذ و مقوا و ۲ درصد چوب وجود دارد [۲]. تنها حدود ۲۰ درصد از این پسماند بازیافت می‌شود و بخشی نیز حدود ۱۷/۸ درصد سوزانده می‌شوند و مابقی در لندفیل دفن می‌شوند. خاکستر باقیمانده از سوزاندن پسماند لیگنوسلولزی غیر قابل اجتناب است و اطمینان از دفن

آب شده است [۱۲]. علاوه بر این خاکستر چوب در تصفیه پساب نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. ترکیب شیمیایی ماده اولیه لیگنوسولوزی تعیین‌کننده ویژگی‌ها و کاربردهای خاکستر تولید شده است. به طور مثال برای جایگزینی سیمان ماده ای با مقدار سیلیس بالا مورد نیاز است. در بین پسماند کشاورزی پوسته شالی بیشترین میزان سیلیس را دارد [۱۴]. بر اساس استاندارد ASTM خاکستر پوسته شالی را می‌توان از پوزولانهای مصنوعی به شمار آورد. چرا که با استفاده از مخلوط پوسته شالی و اهک به نسبت مساوی و پختن آن در کوره مناسب در دمای ۶۰۰ درجه و نگهداری ۴ ساعت می‌توان نوعی ماده چسبناک هیدرولیکی مشابه سیمان تولید کرد که نوعی پوزولان است. سیلیس فعال موجود در خاکستر پوسته شالی در ساختار ماتریسی بتن شرکت کرده و علاوه بر افزایش مقاومت بتن باعث دوام بیشتر آن می‌شود [۱۵]. استفاده از کربنات پتاسیم و کربنات کلسیم موجود در خاکستر به عنوان کاتالیزور نیز از دیگر کاربردهای خاکستر مواد لیگنوسولوزی محسوب می‌شود [۱۶]. خاکستر حاصل از زیست توده لیگنوسولوزی حاوی مقادیر قابل توجهی از Fe_2O_3 ، Al_2O_3 ، SiO_2 ، P_2O_5 ، K_2O ، CaO ، MgO ، Na_2O و SO_3 است که بسته به نوع ماده اولیه این ترکیبات مقادیر متفاوتی دارند [۱۱].

دما، مدت زمان سوختن، متراکم بودن مواد و مقدار لیگنین نیز از جمله عوامل مؤثر بر ویژگی‌های خاکستر حاصل از پسماند لیگنوسولوزی است [۱۶]. بر همین اساس برای یافتن کاربرد مناسب ویژگی‌های خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های مختلف باید مورد بررسی قرارگیری. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکستر چوب پیش‌از این مورد بررسی قرار گرفته است [۱، ۴ و ۱۷]. اما مطالعه جامع‌تر روی ویژگی‌های خاکستر حاصل از سایر مواد لیگنوسولوزی ضروری است. هدف از این مطالعه بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکستر تهیه‌شده از زیست توده‌های لیگنوسولوزی مختلف است. همچنین تأثیر روش خاکستری بر ویژگی‌های خاکستر حاصل مورد بررسی قرار گرفتند.

مناسب خاکستر حاصل از احتراق یا استفاده از آن در کاربردهای جدید و بازیافت آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [۲]. خاکستر از فراوان‌ترین پسماند تولید شده در صنایع چوب و البته مهم‌تر از آن در مراکز تولید انرژی از زیست توده است و در محیط به شدت تجمع می‌یابد [۳]. سالانه در سراسر دنیا حدود ۱۰۰۰۰ تن خاکستر تولید می‌شود. در حین احتراق در نتیجه اکسیداسیون، خاکستر چوب ایجاد شده تمام مواد مغذی معدنی خود به جز ترکیبات نیتروژن که عمدتاً به گاز آزاد می‌شوند را حفظ می‌کند [۴]. خاکستر مواد لیگنوسولوزی می‌تواند در کاربردهای مختلف از جمله تهیه کود (مخصوصاً کود پتاس)، تقویت بتون و سیمان، مواد چسبنده، ساخت سرامیک و ژئوپلی‌مر، تولید کاتالیزور، ژئولیت، نانوسیلیکا، تثبیت خاک، تصفیه پساب، حذف کدورت آب و .. مورد استفاده قرار گیرد [۳-۹]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای خاکستر در کشاورزی و جنگلداری است. در تحقیقات مختلف اثبات شده که خاکستر چوب به خوبی به عنوان عامل قلیاکننده عمل می‌کند و با توجه به اینکه حاوی مقادیر قابل توجهی از مواد مغذی مورد نیاز گیاهان از جمله کلسیم، پتاسیم و ریز مغذی هاست استفاده از آن در خاک یک روش مناسب برای بازیابی عناصر غذایی از دست رفته است [۱۰ و ۱۱]. یکی دیگر از کاربردهای خاکستر مواد لیگنوسولوزی استفاده در ساخت ژئوپلیمرهاست. ژئوپلیمرها یکی از بهترین گزینه‌ها برای جایگزینی سیمان در بتون هستند. استفاده از سیمان در صنایع ساختمان سازی باعث تصاعد چشم‌گیر تولید دی‌اکسید کربن می‌شود. با استفاده از ژئوپلیمرها علاوه بر حفظ و حتی بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتون، تولید دی‌اکسید کربن تا ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. در تحقیقات پیشین از مواد طبیعی مثل خاکستر پوسته شالی و خاکستر نخل روغنی، باگاس نیشکر و ساقه ذرت در تولید ژئوپلیمر استفاده شده که منجر به بهبود ویژگی‌های بتون شده است [۳]. Pourhooshyar و همکاران (۱۳۹۲) تأثیر استفاده از خاکستر پوسته شالی و الیاف لیگنوسولوزی در ساخت بلوکهای چوب سیمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که استفاده از خاکستر پوسته شالی به مقدار ۲۵ درصد وزنی سیمان سبب کاهش جذب

مواد و روش‌ها

- ۲- باقی ماندن مواد در دمای 250°C به مدت ۱ ساعت
- ۳- حرارت‌دهی مواد از 250°C تا 575°C به مدت ۳۰ دقیقه
- ۴- باقی ماندن مواد در دمای 575°C به مدت ۲ ساعت
- ۵- تکرار دو مرتبه مراحل فوق
- در روش دوم از سوختن در هوای آزاد برای خاکستری‌گیری استفاده شده و دمای آتش در حین سوختن با استفاده از ترمومتر لیزری EOSUN اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری دما برای هر نمونه سه مرتبه تکرار شد. در مجموع با توجه به عوامل متغیر شامل نوع ماده لیگنوسلولزی و روش خاکستری‌گیری ۱۲ تیمار حاصل شد که کد تیمارها در جدول ۱ تعریف شده است.

به‌منظور تهیه خاکستر از شش نوع زیست‌توده لیگنوسلولزی مختلف شامل خمیرکاغذ باطله، سرشاخه حاصل از هرس درختان، کاه گندم، پسماند MDF، الیاف بازیافت شده از پسماند MDF و پوسته شالی استفاده شده. مواد در داخل آون با دمای 100°C به مدت ۲۴ ساعت خشک شده و به‌منظور جلوگیری از جذب رطوبت، داخل کیسه نگهداری شدند. پیش از خاکستری‌گیری مواد توزین شدند و از هر ماده 100 گرم نمونه در نظر گرفته شد. برای خاکستری‌گیری از دو روش استفاده شد. در روش اول طبق استاندارد ASTM E 1755 از کوره الکتریکی استفاده شده که در این روش مراحل کار به شرح ذیل می‌باشد:

۱- حرارت‌دهی مواد به مدت یک ساعت از صفر تا 250°C

۲۵۰

جدول ۱- کدهای تعریف شده برای تیمارهای مختلف

ردیف	نوع زیست‌توده لیگنوسلولزی مورد استفاده	روش خاکستری‌گیری	کد مربوطه
۱	خمیرکاغذ باطله	هوای آزاد	A-Pulp
۲	پسماند MDF	هوای آزاد	A-MDF
۳	الیاف بازیافت شده از پسماند MDF	هوای آزاد	A-Waste fiber
۴	کاه گندم	هوای آزاد	A-Wheat straw
۵	سرشاخه درختان	هوای آزاد	A-Branch
۶	پوسته شالی	هوای آزاد	A-rice husk
۷	خمیرکاغذ	کوره الکتریکی	O-Pulp
۸	پسماند MDF	کوره الکتریکی	O-MDF
۹	الیاف بازیافت شده از پسماند MDF	کوره الکتریکی	O-Waste fiber
۱۰	کاه گندم	کوره الکتریکی	O-Wheat straw
۱۱	سرشاخه درختان	کوره الکتریکی	O-Branch
۱۲	پوسته شالی	کوره الکتریکی	O-rice husk

خنک شود. سپس نمونه توزین شد. مقدار خاکستر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{X} 100 \frac{\text{وزن خاکستر}}{\text{وزن اولیه نمونه}}$$

(۱)

pH نمونه‌ها، پس از ترکیب خاکستر در آب مقطر به نسبت ۱:۱۰ توسط دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری pH سه مرتبه تکرار شد.

بررسی ویژگی‌های خاکستر حاصل از

زیست‌توده‌های مختلف

برای تعیین مقدار خاکستر هر یک از زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی از روش ASTM D2017 (1998) استفاده شد. به این ترتیب که 1 گرم از نمونه داخل بوتله چینی که از پیش توزین شده بود، قرار داده شد و داخل کوره الکتریکی با دمای 760°C تا خاکستری‌گیری کامل باقی‌ماند. پس از آن بوتله چینی به داخل دسیکاتور منتقل شد تا

دمایی) و در روش هوای آزاد برای هر یک از مواد لیگنوسولوزی اندازه گیرید. میانگین حداکثر دمای حین سوختن برای پوسته شالی، کاه گندم، خمیر کاغذ، چوب سرشاخه، پسماند MDF و الیاف بازیافتی به ترتیب ۴۵۴، ۴۵۲، ۳۲۷، ۴۳۸، ۳۸۲ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای اشتعال در خاکستری به روش هوای آزاد کمتر از دمای خاکستری در کوره الکتریکی است. بیشترین دمای اشتعال مربوط به پوسته شالی و کمترین دما مربوط به خمیر کاغذ باطله است. ویژگی‌های فیزیکی خاکستر شامل مقدار خاکستر، pH، و کد رنگی خاکستر در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقدار خاکستر حاصل از روش هوای آزاد بیشتر از روش کوره الکتریکی است و نوع ماده لیگنوسولوزی نیز در مقدار خاکستر حاصل تأثیر دارد به نحوی که بیشترین مقدار خاکستر از پوسته شالی و کمترین مقدار خاکستر از الیاف بازیافتی در کوره الکتریکی به دست آمد. پیش از این نیز گزارش شده که در میان زیست‌توده‌های لیگنوسولوزی بیشترین میزان خاکستر از پوسته شالی به دست می‌آید. ۱۹]. در مطالعات پیشین، مقدار خاکستر چوب ۱ درصد، کاه گندم ۷/۴ درصد و پوسته شالی ۲۳ درصد گزارش شده است [۱].

بر اساس نتایج مربوط به اندازه‌گیری pH که در جدول ۲ ارائه شده است، بیشترین مقدار pH (۱۰/۷۱) در الیاف بازیافتی به روش کوره الکتریکی و کمترین مقدار pH (۸/۴۶) در خاکستر حاصل از پوسته شالی به روش هوای آزاد مشاهده شد. در غالب موارد pH در خاکستر حاصل از روش کوره الکتریکی بیشتر از روش هوای آزاد است.

رنگ خاکستر به روش مانسل تعیین شد. در این روش مقایسه چشمی رنگ نمونه با کارت‌های رنگی دفترچه مانسل انجام می‌شود [۱۸]. در روش مانسل رنگ با سه جزء هیو^۱ والیو^۲ و کروما^۳ تعریف می‌شود. هیو معیاری است از ترکیب نورهای رنگی که به چشم دیده می‌شود. در این روش پنج هیو اصلی شامل قرمز (R)، زرد (Y)، سبز (G)، آبی (B) و ارغوانی (P) می‌باشد که با احتساب پنج هیو حد واسط بین هر دورنگ اصلی، در مجموع ده هیو به دست می‌آید، به طور مثال زرد سبز (YR). والیو معرف درجه روشنایی یا تیرگی رنگ می‌باشد. والیو در مقیاس عددی از سیاه خالص (صفر) تا سفید خالص (۱۰) گسترده است. کروما خلوص نسبی یا در واقع قدرت طیف رنگی را بیان می‌کند و نشان‌دهنده درجه اشباع خاکستری به‌وسیله طیف رنگی است. رنگ هر ماده در واقع از اثر متقابل انرژی و ماده و بازتاب آن به دست می‌آید و به عواملی مثل ترکیب شیمیایی، پستی و بلند و اندازه ذرات ماده بستگی دارد [۱۸].

برای اندازه‌گیری ابعاد ذرات خاکستر ابتدا به‌وسیله میکروسکوپ نوری موتیک اقدام به تصویربرداری با بزرگ‌نمایی ۴۰x شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار Image J ابعاد ذرات اندازه‌گیری شدند. از هر نمونه خاکستر ۱۰ تصویر تهیه شده و در مجموع ابعاد ۱۰۰ عدد از ذرات شامل طول و ضخامت، برای هر نمونه خاکستر اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی ساختار شیمیایی و گروه‌های عاملی نمونه‌های خاکستر از آزمون طیف‌سنجی با مادون‌قرمز در محدوده طول موج ۴۰۰-۴۰۰۰ 1/cm استفاده شده. بدین منظور از دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز مدل Spectrum RX I ساخت شرکت Perkin Elmer استفاده شد. تهیه نمونه‌ها به روش قرص برمید پتاسیم انجام شد.

نتایج و بحث

یکی از عوامل مهم مؤثر بر ویژگی‌های خاکستر دمای اشتعال است که در کوره الکتریکی ثابت بود (طبق برنامه

¹ Hue

² Value

³ Chroma

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی مختلف

کد رنگی	pH	مقدار خاکستر (درصد)	نوع خاکستر
5GY/6	۹/۳	۱۶	A-Pulp
10Y/3	۹/۱۲	۲۰	A-MDF
10 GY/3	۸/۹۸	۱۰/۵	A-Waste fiber
5G/4	۹/۴۹	۱۶	A- Wheat straw
5G/5	۱۰/۰۵	۶	A-Branch
5GY/4	۸/۴۶	۵۰/۸	A- Rice husk
N/9.5	۱۰/۴۵	۱۴/۲۷	O-Pulp
5Y7/1	۹/۵۶	۸/۸۱	O-MDF
5Y6/1	۱۰/۷۱	۱/۷۱	O-Waste fiber
10GY/5	۱۰/۳	۱۲/۲۱	O- Wheat straw
5G/6	۱۰/۳۳	۶/۷۴	O-Branch
N/9.25	۸/۶۹	۲۲/۴۳	O- Rice husk

همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود رنگ، خاکستر زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی حاصل از روش سوختن در هوای آزاد به شکل واضحی تیره‌تر از خاکسترهای حاصل از روش کوره الکتریکی است. رنگ تیره خاکستر نشان‌دهنده مقدار زیاد زغال نسوخته، سوختن ناقص مواد آلی و درصد کربن بالا و مواد معدنی زیاد در پسماند احتراق می‌باشد [۲۰]. همچنین ابعاد مواد اولیه در رنگ خاکستر تأثیرگذار است و هر اندازه مواد ریزتر باشند خاکستر حاصل رنگ روشن‌تری خواهد داشت [۲۰]. افزایش دما و زمان سوختن نیز منجر به تولید خاکستر با رنگ روشن‌تر می‌شود. تولید خاکستر سفیدرنگ نتیجه افزایش درجه حرارت، اکسیداسیون بیشتر و کاهش ترکیبات آلی است که دلیل آن سوختن کامل مواد قابل‌اشتعال است [۱۹]. در روش کوره الکتریکی زمان بیشتر و دمای بالاتری برای خاکسترگیری استفاده شده است که منجر به سوختن کامل‌تر و کاهش مقدار کربن و در نتیجه رنگ تیره‌تر خاکسترهای به‌دست‌آمده می‌شود [۲۰]. رنگ خاکستر یک شاخص برای تعیین شدت سوختن و ترکیب شیمیایی موجود در آن است. خاکستر تولید شده در

pH خاکستر نتیجه تجمع مجموع عناصر کلسیم، پتاسیم و منیزیم است. با افزایش میزان حرارت و شدت سوختن مقدار pH موجود در خاکستر نیز افزایش می‌یابد. [۱۹] همان‌طور که نتایج نشان داد، در روش کوره الکتریکی دما بالاتر از روش هوای آزاد است و همین امر سبب شده pH در خاکسترهای حاصل از روش الکتریکی بالاتر از روش سوختن در هوای آزاد شود. هر چقدر مواد بیشتر بسوزند خاکستر حاصل قلیایی‌تر است [۲۰]. به طور کلی pH خاکستر حاصل از مواد لیگنوسلولزی ۹ تا ۱۳ گزارش شده است [۳ و ۱۱]. هر چقدر ابعاد خاکستر ریزتر باشد میزان قلیائیات آن نیز بیشتر است [۲]. برای حذف فسفات از پساب pH پایین و برای حذف گوگرد pH بالای خاکستر ارجحیت دارد [۱].

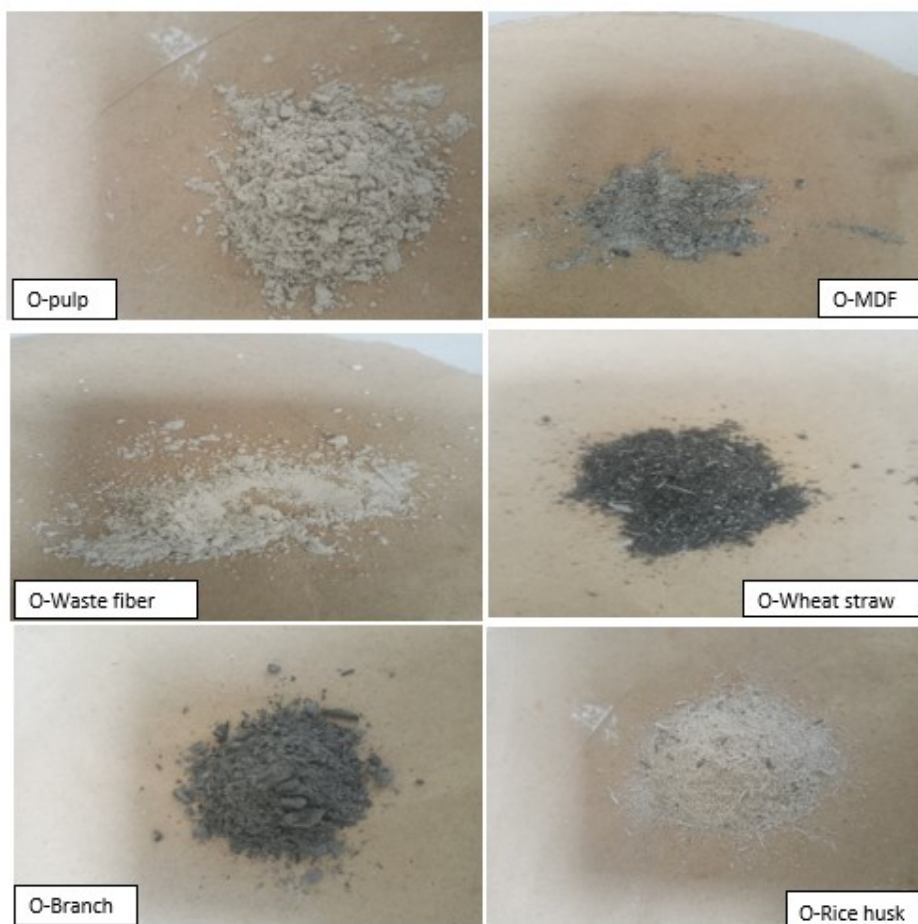
رنگ نمونه‌های خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های مختلف در شکل‌های ۱ و ۲ قابل‌مشاهده است و کد رنگی شناسایی شده به روش مانسل برای نمونه‌های خاکستر و مقدار خاکستر هر کدام از زیست‌توده‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

مشاهده شود؛ یعنی ساختار خاکستر کریستالی‌تر است که رنگ خاکستر هم روشن‌تر می‌شود و این نوع خاکستر برای حذف فلزات سنگین از آب بسیار مناسب است [۱، ۳ و ۲۰]. کریستال‌های ریز با ابعاد حدود ۱ تا ۲ میکرون بعضاً در یک بعد در دامنه نانومواد نیز قرار می‌گیرند. هر چقدر رنگ خاکستر روشن‌تر باشد ابعاد آن نیز ریزتر است [۲].

دماهای پایین‌تر معمولاً تیره‌تر، درشت‌تر و کمتر متراکم است. اما در احتراق با شدت بیشتر یا دمای بالاتر خاکستر سفیدرنگ حاصل می‌شود. با افزایش شدت احتراق و دمای آن معمولاً نیتروژن و کربن کاهش می‌یابد و کلسیم، پتاسیم، منیزیم و pH و بعضاً فسفر افزایش می‌یابد. افزایش دمای سوختن می‌تواند منجر به افزایش کلسیم و منیزیم شود. هر چقدر کلسیت (CaCO_3) بیشتر



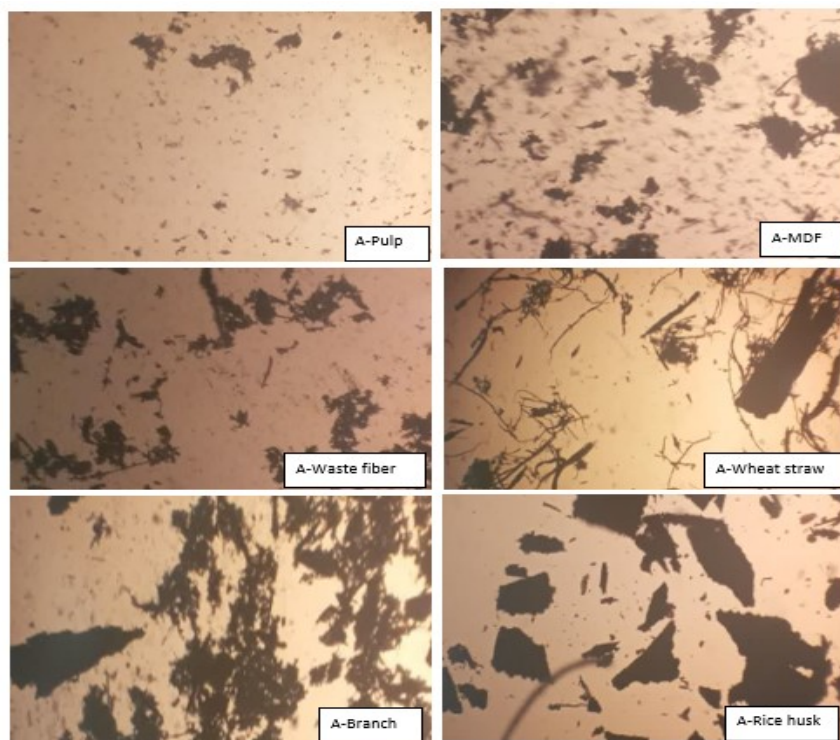
شکل ۱- رنگ نمونه‌های خاکستر حاصل از مواد لیگنوسلولزی مختلف به روش سوزاندن در هوای آزاد



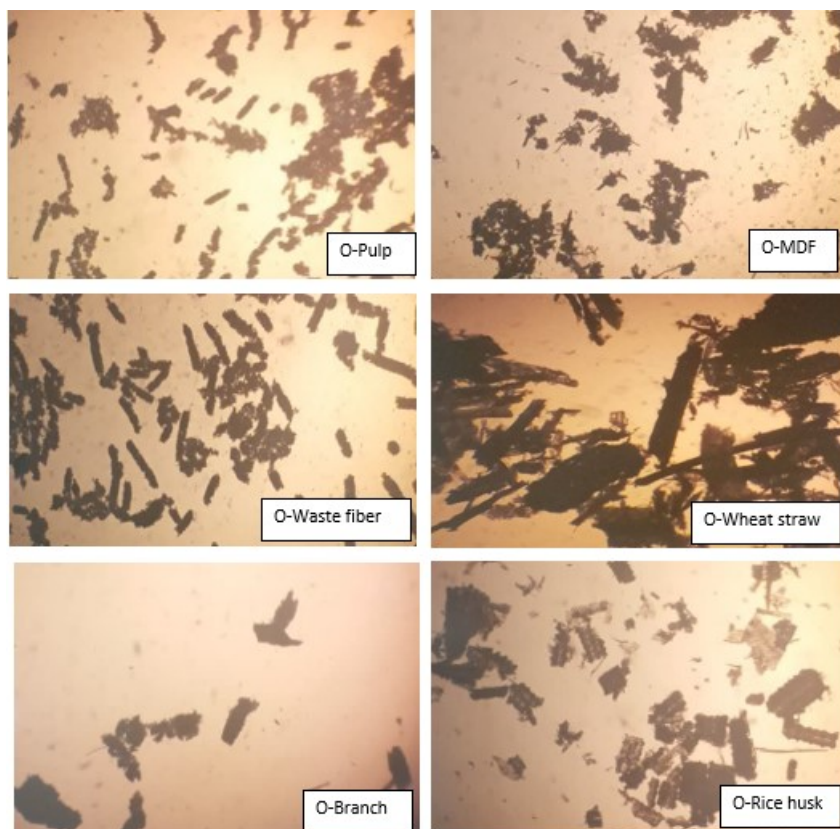
شکل ۲- رنگ نمونه‌های خاکستر حاصل از مواد لیگنوسلولزی مختلف به روش کوره الکتریکی

ابعاد کوچکتر از 0.088mm هستند خاکسترها دارای ذرات با شکل نامنظم از قطر 10 میکرون تا بیش از 1 میلی‌متر می‌باشند که در تحقیقات قبلی مشابه چنین نتیجه‌ای گزارش شده است [۹].

به منظور اندازه‌گیری ابعاد ذرات خاکستر از نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپی تهیه شده که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. نتایج مربوط به اندازه‌گیری ابعاد ذرات خاکستر در جدول ۳ ارائه شده است. بیشتر ذرات دارای



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی ذرات خاکستر حاصل از زیست توده‌های لیگنوسلولزی مختلف به روش سوزاندن در هوای آزاد



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی ذرات خاکستر حاصل از زیست توده‌های لیگنوسلولزی مختلف به روش کوره الکتریکی

از زیر ۱۰ میکرون تا بیش از ۱mm متغیر می‌باشد [۹]. در تحقیق دیگری نیز ابعاد ذرات خاکستر زیر ۱۰۰ میکرون گزارش شد در ضمن ذراتی که شکل هندسی منظم‌تری دارند در مقایسه با ذرات بی‌شکل حاوی مقدار بیشتری از کلسیم می‌باشند [۲]. کمترین طول ذرات خاکستر مربوط به نمونه خاکستر خمیرکاغذ حاصل از روش کوره الکتریکی و بیشترین طول ذرات مربوط به خاکستر سرشاخه به‌دست‌آمده از روش سوزاندن در هوای آزاد بود. پراکنش ذرات ریز در خاکستر چوب نشان می‌دهد که این نوع خاکستر مناسب برای تولید بهبود دهنده‌های خاک است و البته چنین ذراتی قابلیت جذب بالاتری دارند و در مباحث تصفیه پساب و حذف آلاینده‌ها مناسب‌ترند [۲]. در کاربرد ترکیب با سیمان و تهیه بتون نیز ابعاد ذرات خاکستر از اهمیت زیادی برخوردار است و باید تا حد ممکن ریز (کمتر از ۲۰۰ میکرون) باشد تا روی مقاومت خمشی اثر منفی نداشته باشد [۱ و ۲].

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های خاکستر ذرات بی‌شکل فراوانی وجود دارند. شکل ذرات در نمونه‌های خاکستر متفاوت است و در بعضی نمونه‌ها مثل خاکستر حاصل از MDF ذرات مربعی و کروی شکل هستند و در نمونه‌های خاکستر الیاف بازیافتی و خمیرکاغذ حالت میله‌ای شکل و منظم‌تر دارند. ابعاد ذرات خاکستر از زیر ۱۵ میکرون تا بیش از ۴ میلی‌متر متغیر است. میانگین طول و ضخامت ذرات خاکستر حاصل از مواد لیگنوسلولوزی مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد ذرات خاکستر در روش کوره الکتریکی تا حدودی کوچکتر از ابعاد ذرات خاکستر تهیه شده از سوختن در هوای آزاد است. بیشترین میانگین ابعاد ذرات مربوط به خاکستر به دست آمده از کاه گندم در کوره الکتریکی و کمترین میانگین ابعاد ذرات مربوط به خاکستر خمیرکاغذ در هوای آزاد است.

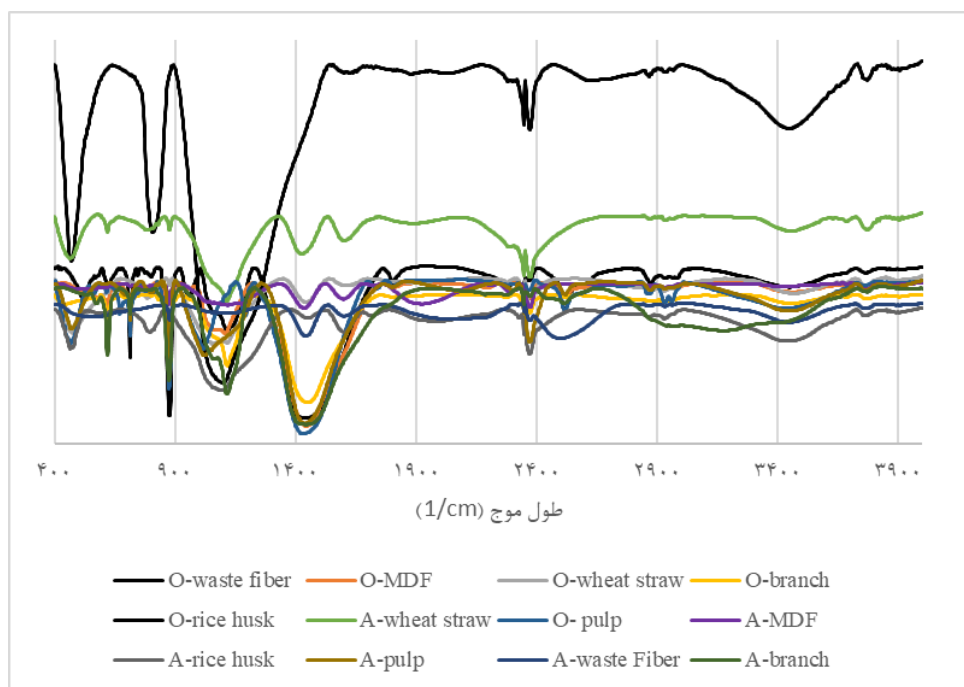
در تحقیقات پیشین نیز به شکل کروی و نامنظم ذرات خاکستر اشاره شده و گزارش شده که ابعاد ذرات خاکستر

جدول ۲- ابعاد ذرات خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های لیگنوسلولوزی مختلف

نمونه خاکستر	طول (میکرون)	قطر (میکرون)
A-pulp	۴۰/۲	۲۰/۶
A-MDF	۷۲۸	۳۱۷/۴۷
A-Waste fiber	۹۴/۸	۱۷/۸۲
A-Wheat straw	۳۲۶/۴	۲۳۰/۴
A-branch	۱۵۷۰	۵۰۱/۶۶
A-Rice husk	۱۲۹۲	۵۳۷
O-pulp	۳۱/۴	۱۴/۷۱
O-MDF	۳۷۹/۱۸	۲۸۸
O-Waste fiber	۸۷/۸	۱۵/۹۸
O-Wheat straw	۴۲۴/۴	۳۸۴/۴۴
O-branch	۸۷۲/۵	۳۶۲/۵
O-Rice husk	۷۶۲/۲۲	۲۶۰

طیف‌های حاصل از FT-IR نمونه‌های خاکستر زیست‌توده در شکل ۵ نشان داده شده و تحلیل نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

به‌منظور بررسی گروه‌های عاملی و ترکیب شیمیایی نمونه‌های خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های لیگنوسلولوزی مختلف از روش طیف‌سنجی با مادون‌قرمز استفاده شد.



شکل ۵- طیف FT-IR خاکستر حاصل از مواد لیگنوسولوزی مختلف به دو روش هوای آزاد و کوره الکتریکی

جدول ۳- گروه‌های عاملی شناسایی شده در طیف FT-IR نمونه‌های خاکستر حاصل از مواد لیگنوسولوزی مختلف

منبع	نمونه‌های مربوطه	گروه عاملی	طول موج (1/cm)
[۱۱]	A waste fiber و A-MDF بسیار شدید	گروه‌های هیدروکسیل	۳۶۴۳
[۱۱]		گروه‌های هیدروکسیل	۳۴۱۶
[۲۱]	در A waste fiber و A-MDF بسیار شدید	ارتعاشات کششی C-H	۲۹۲۶
[۲۱]		CO ₃	۱۷۹۵
	Rice husk و Waste fiber- MDF		۱۵۹۸
[۲۱ و ۱۱]	A-wheat straw, A-MDF, A-Rice husk, A-waste fiber	مولکول‌های آب	۱۶۰۰-۱۶۵۲
[۲۱ و ۱۱]	در A-MDF خیلی شدید در O-Wheat straw و O-rice husk شدت این پیک کم است	ارتعاش کششی C=O ترکیبات کربنات	۱۴۲۳-۱۴۳۳
[۶]	در wheat straw شدید است	ارتعاش خمشی CaCO ₃	۱۴۰۷
[۶]		ارتعاش کششی پروفوسفات P-O	۱۱۲۴
[۲۱]	در همه نمونه‌ها پیک بزرگ و شدید به جز O-pulp	ارتعاش کششی Si-O	۱۱۱۷
[۱۱]		ارتعاشات ساختار آلومینیوم - سیلیکات	۱۱۱۰
[۲۱ و ۶]	در همه دیده می‌شود در پوسته شالی خیلی شدید است	ارتعاش کششی Si-O-Si	۱۰۸۰-۱۰۹۲
[۶]	در همه دیده می‌شود در O-rice husk خیلی شدید است	ارتعاش کششی CaCO ₃	۸۷۳
[۱۱]		ارتعاش کششی Si-O-Si	۷۹۶
[۶]	در A-waste fiber و A-MDF	ارتعاش کششی CaCO ₃	۷۱۲

۶۸۰	سیلیکا - کائولیت	در تمام نمونه‌ها تقریباً یکسان	[۱۱]
۶۲۴	K-O و Mg-O	در تمام نمونه‌ها تقریباً یکسان	[۲۱]
۵۷۱	ارتعاش کششی Al-Si-O	در تمام نمونه‌ها تقریباً یکسان	[۱۱]
۵۱۳-۵۳۰	سیلیکا - کائولیت	در تمام نمونه‌ها تقریباً یکسان	[۶]
۴۶۷	ارتعاش خمشی سیلیکا	O- wheat straw	[۱۱]

مقادیر بالایی از سیلیس، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن و مقادیر کم کربن هستند در کاربردهای ساختمانی قابل استفاده هستند [۱]. خاکستر پوسته شالی قابلیت جذب بالایی دارد و به عنوان جاذب آلاینده‌های آب و هوا عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهد [۱]. همچنین همان‌طور که نتایج نشان داد خاکستر پوسته شالی قلیائیت بالایی دارد و می‌تواند برای اصلاح خاک استفاده شود. خاکستر سر شاخه با داشتن ۱۱ تا ۱۴ درصد اکسید پتاسیم (بسته به نوع گونه چوبی) در تولید کود پتاس و تقویت خاک در کشاورزی کاربرد دارد [۳] و همچنین مقدار اکسید آهن در این ماده بالای ۲/۶ درصد است که باعث ایجاد خاصیت مغناطیسی در آن می‌شود [۱].

خاکستر کاه گندم و کاغذباطله مقادیر نسبتاً بالایی از سیلیس، اکسید کلسیم و کربنات کلسیم را در خود دارند (تقریباً ۲۵ تا ۲۷ درصد) [۱ و ۴]. خاکستری که حاوی اکسید کلسیم بالایی باشد می‌تواند در واکنش‌های تراکمی استری کردن در تولید بیودیزل و تولید استر متیل اسیدهای چرب به عنوان کاتالیزور عمل کند [۱]. خاکستر کاه گندم در سنتز سیلیس بسیار مورد توجه می‌باشد [۴]. خاکستر پسماند MDF کمترین مقدار سیلیس و مقادیر مناسبی از اکسید کلسیم (۲۲ درصد) دارد که علاوه بر استفاده به عنوان کاتالیزور برای تولید زئولیت نیز گزینه مناسبی به شمار می‌رود [۱ و ۲۲]. خاکستر الیاف بازیافت شده از پسماند MDF در اثر مراحل شستشو و حذف رزین دچار تغییر در ساختار شیمیایی می‌شوند و مقادیر کمتری از اکسید کلسیم را در خود دارند [۲۲]. با توجه به ابعاد ریز و قلیائیت بالا این نوع خاکستر در اصلاح اسیدیته خاک گزینه مناسبی محسوب می‌شود.

در کل با توجه به نتایج می‌توان گفت که بین دمای احتراق، ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی خاکستر ارتباط وجود دارد. به این ترتیب که هر چقدر دمای احتراق بیشتر باشد و سوختن کامل‌تر انجام شود مقدار کربن

در کل در نمونه‌های خاکستر حاصل از روش هوای آزاد پیک‌ها بیشتر و شدیدتر از روش کوره الکتریکی بودند، چرا که در روش کوره الکتریکی به دلیل سوختن کامل‌تر و در مدت زمان طولانی‌تر برخی ترکیبات حذف شده و از دسترس خارج می‌شوند. در خاکستر حاصل از پوسته شالی و کاه گندم پیک $1/cm$ ۱۰۵۳ و ۱۱۱۱ در روش هوای آزاد خیلی بزرگ و شدید بود. که علت آن وجود مقدار زیادی از سیلیس است. در الیاف بازیافتی تعداد و شدت پیک‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای در روش هوای آزاد بیشتر از روش کوره الکتریکی است. پیک‌های ۱۱۰۰-۱۰۸۰، ۸۰۰-۷۹۰ و ۴۶۰ نشان‌دهنده وجود سیلیس و گروه‌های عاملی مربوط به آن است که در تمام نمونه‌ها مشاهده شد. بر اساس نتایج جدول ۴ که در انطباق با نتایج تحقیقات پیشین است، بیشترین مقدار سیلیس در خاکستر پوسته شالی و پس از آن در کاه گندم وجود دارد و کمترین مقدار سیلیس در خاکستر پسماند MDF وجود دارد [۱، ۴، ۲۰ و ۲۲]. برای کاربردهای ساختمانی (در ترکیب با سیمان و بتون) و ساخت زئولیمر خاکستر مورد استفاده باید خاصیت پوزولانی داشته باشد که نیازمند وجود مقادیر بالایی از سیلیس است [۱]. بیشترین مقدار اکسید منیزیم و اکسید سدیم در خاکستر کاغذباطله وجود دارد و بیشترین مقدار اکسید کلسیم در خاکستر کاغذباطله و پسماند MDF وجود دارد. هر چقدر مقدار سیلیس و کربنات کلسیم در خاکستر بیشتر باشد، نشان‌دهنده کریستالینه بیشتر است و خاصیت قلیایی خاکستر بیشتر می‌شود. چنین خاکستری برای خنثی‌سازی خاک‌های اسیدی مناسب است [۱ و ۴]. همچنین، قلیائیت و وجود کلسیم، پتاسیم، کربن، سدیم و فسفر، خاکستر را برای کاربردهای کشاورزی مناسب می‌سازد [۱]. بر اساس مطالعات انجام شده خاکستر پوسته شالی ۷۰ تا ۸۰ درصد سیلیس و خاکستر کاغذباطله ۵۰ درصد اکسید آلومینیوم دارد، خاکسترهایی که حاوی

مثال در کاربردی مانند تقویت سیمان و بتون ابعاد ذرات از اهمیت بسزایی برخوردار است و ذرات با ابعاد ریز مناسب می‌باشند. همچنین درصد بالای سیلیس به دلیل ایجاد خاصیت پوزولانی در چنین کاربردهایی حائز اهمیت است. در مورد کاربردهای کشاورزی و اصلاح خاک، قلیائیت از اهمیت زیادی برخوردار است و البته مقدار پتاسیم خاکستر برای استفاده به عنوان کود و تقویت‌کننده خاک اهمیت زیادی دارد. در کاربردهای زیست محیطی و استفاده از خاکستر به عنوان جاذب آلاینده‌ها و فلزات سنگین، ظرفیت جذب و تخلخل در اولویت می‌باشد و برای استخراج نانو سیلیکا و سیلیس مسلماً مقدار سیلیس خاکستر مورد توجه است. برای سنتز ژئولیت و کاتالیزورها وجود کلسیت در ترکیبات شیمیایی خاکستر ضرورت دارد. با توجه به نتایج این تحقیق بر اساس بازدهی مقدار خاکستر به‌دست‌آمده، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، در بین مواد زیست‌توده لیگنوسلولزی مختلف، خاکستر پوسته شالی در دامنه گسترده‌ای از کاربردها قابل‌استفاده می‌باشد. هم چنین، خاکستر کاغذباطله و کاه گندم از ویژگی‌های مناسب برای استفاده در کاربردهای ساختمانی و کشاورزی برخوردارند. با توجه به این که در کوره الکتریکی فرایند سوختن به‌صورت کامل‌تر رخ می‌دهد، خاکستر حاصل از این روش از ویژگی‌های کاربردی مطلوب‌تری در مقایسه با روش هوای آزاد برخوردار است. بدین ترتیب مطالعاتی از این‌دست شناسایی کاربردهای مناسب برای خاکستر انواع مختلف زیست‌توده را فراهم می‌سازد.

کمتر و مقدار ترکیبات معدنی بیشتر می‌شود. از طرفی هر چقدر میزان سیلیس و کلسیت در خاکستر بیشتر باشد، کریستالیت‌ها خاکستر بیشتر می‌شود، در نتیجه ابعاد آن ریزتر و رنگ آن روشن‌تر خواهد بود و قلیائیت آن نیز افزایش می‌یابد. ویژگی‌های خاکستر در درجه اول به نوع ماده لیگنوسلولزی و ترکیبات شیمیایی آن بستگی دارد و در مراتب بعدی دما، مدت زمان و روش خاکستری نیز روی ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی خاکستر تأثیر می‌گذارد. ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی خاکستر زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی با هم متفاوت‌اند و هر کدام در کاربردهای مشخصی قابل‌استفاده هستند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده خاکستر پوسته شالی بیشترین کاربرد را دارد و روش کوره الکتریکی برای دستیابی به خاکستر با ویژگی‌های کاربردی مناسب‌تر از روش هوای آزاد است.

نتیجه‌گیری

بررسی ویژگی‌های نمونه‌های خاکستر حاصل از مواد لیگنوسلولزی مختلف نشان‌دار که بسته به نوع ماده لیگنوسلولزی ویژگی‌های خاکستر حاصل متفاوت خواهد بود و همچنین روش خاکستری و در واقع این که خاکستری در هوای آزاد انجام شده باشد یا در کوره الکتریکی می‌تواند روی ویژگی‌های خاکستر تأثیر بسزایی داشته باشد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده نوع زیست‌توده و روش خاکستری روی ترکیب شیمیایی خاکستر، رنگ، pH و ابعاد ذرات خاکستر مؤثر است؛ بنابراین شناسایی ویژگی‌های خاکستر حاصل از زیست‌توده‌های مختلف می‌تواند در انتخاب کاربرد مناسب آن مفید باشد. به طور

منابع

- [1] Munawar, M., Khoja, A. H., Naqvi, S.R., Mehran, M. T., Hassan, M., Liaquat, R. and Dawood, U. F., 2021. Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111451: 1-30.
- [2] Awoyale, A., Lokhat, D. and Okete, P., 2021. Investigation of the effects of pretreatment on the elemental composition of ash derived from selected Nigerian lignocellulosic biomass, *Scientific Reports* (11): 1-16.
- [3] Serafimova, E., Maldenov, M., Mihailova, I. and Pelovski, Y., 2011. Study on the characteristics of waste wood ash, *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 46 (1): 31-34.
- [4] Voshell, S., Mkela, M. and Dahlolli, M., 2018. A Review of biomass ash properties towards treatment and recycling, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96:479-486.

- [5] Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C. and Verloo, M.G., 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview, *Bioresources Technology*, 77(3):287-295.
- [6] Zajac, G., Szyszczak, J., Dudziak, A., Kurance, A. and Wasilewski, J., 2017. Ash composition and deposition tendencies of selected biomass types, IX International scientific symposium "Farm machinery and process management in sustainable agriculture, Lublin, Poland: 438- 443.
- [7] Rostamian, R., Khalilzadeh, M. and Zareyee, D., 2022. Wood ash biocatalyst as a novel green catalyst and its application for the synthesis of benzochromene derivatives, *Scientific Reports*, 12:1145:1-13.
- [8] Eliche-Quesada, D., Felipe-Sesé, M. A., López-Pérez, J.A. and Infantes-Molina, A., 2017. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks, *Ceramics International*, 43: 463-475.
- [9] Fusade, L., Viles, H., Wood, C. H. and Burns, C., 2019. The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings, *Construction and Building Materials*, 212: 500-513.
- [10] Levai, L., Veres, S., Bakonyi, N. and Gajdos, E., 2008. Can wood ash and bio-fertilizer play a role in organic agriculture, *Agronomski Glasnik*, 3: 263-272.
- [11] Kalembkiewicz, J., Galas, D. and Sitarz-Palczak, E. 2018. The Physicochemical Properties and Composition of Biomass Ash and Evaluating Directions of its Applications, *Pol. J. Environ. Stud*, 27(6): 1-11.
- [12] Pourhooshyar Ziabari, K., Torkaman, J., Ashori, A. and Hamzeh, Y., 2013. Fabrication of cement blocks using rice husk ash and lignocellulosic fibers, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28(3): 393-404. (In Persian)
- [13] Mosoarca, G., Vancea, C., Popa, S., Boran, S. and Tanasie, C., 2020. A green approach for treatment of waste water with manganese using wood ash, *J chem Technol Biotechnol*, 95: 1781-1789.
- [14] Martinez-Garcia, R., Jgadesh, P., Ziad, O. and Serbanoiu, A. 2022. The present state of the use of waste wood ash as an eco-efficient construction material: A Review, *Materials*, 15(5349):1-20.
- [15] Smółka-Danielowska, D. and Jabłońska, M., 2022. Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19:5359-5372
- [16] Misra, M., Ragland, K. and Baker, A., 1993. Wood ash composition as a function of furnace temperature, *Biomass and Bioenergy* (4)2: 103-116.
- [17] Feriancová, A., Pajtášová, M., Moricová, K. and Pecušová, B., 2020. Using of wood ash as the alternative filler for preparation of rubber mixtures, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 776 (2020) 012087*: 1-12.
- [18] Munsell, A. H., 1988. *Munsell, a color notation*, 15th ed, Macbeth, Div of Kollmorgen, Baltimore.
- [19] Etiegni, L. and Cambell, A.G., 1991, Physical and chemical characteristics of wood ash, *Bioresource Technology* (37): 173-178.
- [20] Saeedi, S., Hosseini, V. and Mohammadi Samani, K., 2022, Comparison of ash properties from burning litter and branches of *Quercus infectoria Oliv*, *Iran J. Appl. Ecol*, 10(4):81-94. (In Persian).
- [21] Nikolić, N.M., Kandić, A., Trivunac, K., Mirković, M., Vukanac, I.S., Nenadović, S. and Kljajević, L., 2022, Radiological and Structural Characterization of Raw and Alkali-Activated Wood Ash and Metakaolin Blends, *Sustainability*, 14:1-13.
- [22] Pan, L. and Yong, J., 2019. Evaluating the effects of KCl on thermal behavior and reaction kinetics of Medium Density Fiberboard pyrolysis, *Materials*, 12(1826): 1-18.

Investigating the Characteristics of Ash Obtained from Different Lignocellulosic Biomass

Abstract

Considering the pivotal role of biomass in contemporary energy provision and the escalating utilization of these renewable resources, a corresponding increase in ash production is anticipated in the future. Consequently, the significance of biomass ash management and recycling, pertaining to environmental and economic considerations, has become increasingly evident. In this study, we investigated the properties of ash derived from various lignocellulosic biomasses. To this end, ash was prepared from six types of lignocellulosic biomass—rice husk, wheat straw, tree branches, MDF waste, recycled fibers from MDF waste, and waste paper pulp—using two methods: electric furnace and open-air combustion. We examined the content, dimensions, color, pH, and chemical composition of the different biomasses. The lowest ash content was observed in recycled fibers, while the highest was found in rice husk. All ashes exhibited alkaline properties. Ashes produced by the electric furnace method displayed brighter coloration compared to those from open-air combustion. The smallest ash particle dimensions were associated with pulp ash from the electric furnace method, while the largest were linked to branch ash obtained through the open-air method. Additionally, the chemical compositions of the ashes varied. The insights gleaned from this study are instrumental in determining suitable applications for the ashes.

Keywords: Wastes, silica, incineration, recycling, soil stabilization, concrete.

B. Moezzi-pour^{1*}

¹ Assistant Professor, Department of Wood & Paper Technology, Faculty of Agriculture & Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Corresponding author:
b.moezzi-pour@uma.ac.ir

Received: 2023/02/03
Accepted: 2024/03/25