



Investigation on the relationship between anisotropy and the electrical resistance of Spruce (*Picea abies*) carbonized wood

Mozhdeh Mashkour^{1*}

1- 1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Paper Science and Engineering, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: m.mashkour@gau.ac.ir

Received: September 2025

Accepted: December 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Today, there is an increasing effort to find and use biomass fuels as renewable energy sources with the aim of replacing conventional fossil fuels. Biochar is a porous material, very heterogeneous, and carbon rich, which is produced by biomass pyrolysis under an environment with anoxic conditions or limited oxygen. Among the recent applications for this material is its use as an electrode material in supercapacitors with the purpose of energy storage. The electrical conductivity of the electrode material is a very important factor for the efficiency of this tool. In this research, the relationship between the structural anisotropy of spruce wood and the pyrolysis temperature was investigated on the electrical resistance of carbon electrodes derived from it.

Methodology: Radial and tangential samples were prepared separately from the sections without defects and knots of the spruce wood. Radial and tangential samples of spruce wood were pyrolyzed at three different temperatures (700, 800 and 900 °C to investigate the effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of biochar. 4-point probe technique was used to measure electrical resistance. Raman spectroscopy was used to investigate the degree of graphitization and X-ray diffraction (XRD) was used to investigate the effect of pyrolysis temperature on the crystallinity of biochar samples obtained from spruce wood. The surface chemistry and functional groups of the samples were investigated by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy.

Results: The results showed that the pyrolysis temperature had a significant negative effect on the yield and porosity of the prepared biochar and a significant positive effect on its density. Also, the cutting type had no effect on the efficiency and density of biochar. According to the results, the shrinkage in three directions followed a similar pattern to that of wood. In all three temperatures in this study, the highest and lowest shrinkage values were belonged to the tangential and axial directions, respectively. Also, the results of SEM images of the cross-sectional surface of the produced spruce biochar samples showed that the anatomical characteristics of wood were preserved in the biochar. The Raman spectroscopy results indicated a higher degree of graphitization with an increase in pyrolysis temperature, which led to a decrease in electrical resistance, or in other words, an increase in electrical conductivity. For both the radial and tangential sample types, the electrical resistance decreased significantly ($p > 0.05$) with increasing temperature; in other words, electrical conductivity increased with temperature. The highest electrical resistance value (5.46 Ω) was related to the tangential direction relative to the charcoal

rings in the tangential sample at 700°C, and the lowest value (0.05 Ω) was related to the direction perpendicular to the charcoal rings in the radial sample at 900°C.

Conclusion: In general, the increase in pyrolysis temperature and the greater graphitization of the wood led to a decrease in the electrical resistance of the wood biochar, or in other words, an increase in its electrical conductivity. Furthermore, wood anisotropy (the difference between radial and tangential directions) did not have a significant effect on the electrical resistance of the resulting biochar at temperatures above 700°C.

Keywords: Biochar, Radial cut, Tangential cut, Anisotropy, Pyrolysis.

بررسی ارتباط بین هرسونایکسانی ساختاری و مقاومت الکتریکی چوب نوئل (*Picea abies*)

کربونیزه شده

مژده مشکور^{۱*}

۱- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: M.Mashkour@gau.ac.ir

تاریخ پذیرش: آذر ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: امروزه تلاش فزاینده‌ای برای یافتن و استفاده از سوخت‌هایی با منشأ زیست‌توده، به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر با هدف جایگزینی با سوخت‌های فسیلی معمول وجود دارد. زغال زیستی ماده‌ای متخلخل، ناهمگن و غنی از کربن است که توسط پیرولیز زیست‌توده در شرایط محیطی فاقد اکسیژن و یا با اکسیژن محدود تولید می‌شود. پیرولیز، اصلی‌ترین روش تبدیل گرمایی-مکانیکی غیرهوازی مورد استفاده برای تبدیل زیست‌توده به سوخت مایع، گازها و زغال می‌باشد. پیرولیز زیست‌توده در شرایط متفاوتی به لحاظ دما، سرعت گرمادهی و زمان‌های ماندگاری انجام می‌شود. این شرایط باعث ایجاد تنوع گسترده در بازده و ویژگی‌های زغال زیستی تولید شده می‌شود. شرایط پیرولیز، حتی در صورت استفاده از ماده یکسان، موجب ایجاد زغال زیستی با ویژگی‌های متفاوتی می‌شود که نوع مصرف و کاربرد متفاوتی دارند. از جمله کاربردهای اخیر برای این ماده به‌کارگیری آن به‌عنوان ماده الکتروود در ابر خازن‌ها با هدف ذخیره انرژی می‌باشد. رسانایی الکتریکی ماده الکتروود فاکتور بسیار مهمی برای کارایی این ابزار است. در این پژوهش، به بررسی ارتباط بین هرسونایکسانی ساختاری چوب نوئل و دمای پیرولیز بر مقاومت الکتریکی الکتروودهای کربنی مشتق شده از آن، پرداخته شد.

مواد و روشها: از بخش‌های بدون عیب و گره چوب نوئل، نمونه‌های شعاعی و مماسی به‌طور جداگانه تهیه شد. برای بررسی اثر دمای پیرولیز روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی، نمونه‌های شعاعی و مماسی چوب نوئل در سه دمای متفاوت ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پیرولیز شدند. از روش پراب ۴ نقطه برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی استفاده شد. از طیف‌سنجی رامان (Raman) برای بررسی درجه گرافیتی شدن و از آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) برای بررسی اثر دمای پیرولیز بر درجه بلورینگی نمونه‌های زغال زیستی حاصل از چوب نوئل استفاده شد. بررسی شیمی سطح و گروه‌های عاملی نمونه‌ها توسط طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) انجام شد.

نتایج: نتایج نشان داد که دمای پیرولیز بر بازده و تخلخل زغال زیستی تهیه‌شده، اثر معنی‌دار منفی و بر دانسیته آن اثر معنی‌دار مثبت داشت. همچنین نوع برش اثر معنی‌داری بر بازده و دانسیته زغال نداشت. با توجه به نتایج، هم‌کشیدگی در سه جهت از الگوی مشابه چوب تبعیت نمود. در هر سه دما بیشترین و کمترین هم‌کشیدگی به ترتیب مربوط به نمونه‌های مماسی و محوری بود. همچنین نتایج تصاویر SEM از سطح مقطع عرضی نمونه‌های تولیدشده زغال نوئل نشان داد که ویژگی‌های آناتومیکی چوب در زغال حاصله حفظ شده است. نتایج آزمون رامان نشان‌دهنده گرافیتی شدن بیشتر با افزایش دمای پیرولیز بود که این امر به کاهش مقاومت الکتریکی یا به عبارتی افزایش هدایت الکتریکی منجر شد. در مورد هر دو نوع نمونه شعاعی و مماسی، با افزایش دما مقاومت الکتریکی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) کاهش یافت و به عبارت دیگر با افزایش دما، هدایت الکتریکی افزایش یافت. بیشترین مقادیر مقاومت الکتریکی ($5/46 \Omega$) مربوط به جهت مماس با دوایر زغال حاصل از نمونه مماسی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین آن ($0.1/0.5 \Omega$) مربوط به جهت عمود بر دوایر زغال حاصل از نمونه شعاعی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد بود.

نتیجه گیری: به طور کلی، افزایش دمای پیرولیز و گرافیتی شدن بیشتر چوب موجب کاهش مقاومت الکتریکی زغال و به عبارت دیگر افزایش هدایت الکتریکی آن شد. همچنین، هرسونایکسانی چوب، در دماهای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی گراد اثر معنی داری بر مقاومت الکتریکی زغال حاصل از آن نداشت.

واژه های کلیدی: زغال زیستی، برش شعاعی، برش مماسی، هرسونایکسانی، پیرولیز.

مقدمه

امروزه با افزایش نیاز به تولید انرژی از سوخت های فسیلی، مسائل زیست محیطی زیادی پدید آمده است که توسعه پایدار را با چالش روبرو کرده است. تلاش فزاینده- ای برای یافتن و استفاده از سوخت های با منشأ زیست- توده به عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر با هدف جایگزینی سوخت های فسیلی معمول وجود دارد. زیست توده گیاهی از طریق فرآیند فتوسنتز دی اکسید کربن را جذب و ذخیره می کند. معمولاً ۵۰٪ وزن خشک زیست توده گیاهی، مانند چوب و ضایعات کشاورزی، شامل کربن است. کربن موجود در زیست توده، از طریق کربونیزه کردن حفظ و زغال زیستی غنی از کربن ساخته می شود [۱]. زغال زیستی ماده ای متخلخل، بسیار ناهمگن و غنی از کربن است که توسط پیرولیز زیست توده در شرایط محیطی فاقد اکسیژن و یا با اکسیژن محدود تولید می- شود [۲، ۳]. پیرولیز، اصلی ترین روش تبدیل گرمایی- مکانیکی غیرهوازی مورد استفاده برای تبدیل زیست توده به سوخت مایع، گازها و زغال می باشد [۳]. پیرولیز زیست توده در شرایط متفاوتی به لحاظ دما، سرعت گرمادهی و زمان های ماندگاری انجام می شود. این شرایط باعث ایجاد تنوع گسترده در بازده و ویژگی های زغال زیستی تولید شده می شود [۴، ۵]. پیرولیز آهسته، روش سنتی تولید زغال سنگ است؛ در حالی که پیرولیز سریع برای تولید سوخت های مایع به کار می رود [۶]. شرایط پیرولیز، حتی در صورت استفاده از ماده یکسان، موجب ایجاد زغال زیستی با ویژگی های متفاوتی می شود که نوع مصرف و کاربرد متفاوتی دارند [۷]. به طور کلی، پیرولیز می تواند با توجه به نوع فرآورده مورد نظر به آهستگی و یا با سرعت انجام شود. سرعت گرمادهی در حین پیرولیز یکی از فاکتورهای تأثیرگذار روی کیفیت و کمیت زغال زیستی تولید شده می باشد [۸، ۹].

زغال زیستی مشتق شده از چوب به سبب ساختار اجزاء خود، ذاتاً متخلخل است. همچنین این زغال زیستی به شدت کربونیزه شده (حدود ۹۰ درصد وزن آن شامل کربن است)، در شرایط محیطی به لحاظ شیمیایی پایدار است. زغال زیستی مذکور به سبب ساختار متخلخل و مقدار بسیار زیاد کربن به طور سنتی به عنوان سوخت جامد، پیش ماده کربن فعال و افزودنی خاک برای بهبود حاصلخیزی خاک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰]. همچنین کاربردهای اخیر یافت شده برای این مواد به عنوان ماده الکتروود در ابر خازن ها با هدف ذخیره انرژی و باتری دیونیزاسیون خازنی می باشد [۱۱، ۱۲]. ابر خازن ها در مقایسه با باتری ها سریع تر شارژ و تخلیه می- شوند و ماندگاری بیشتری دارند. رسانایی الکتریکی ماده الکتروود فاکتور بسیار مهمی برای کارایی این ابزار است. مطالعات مختلفی در ارتباط با رابطه بین زغال های زیستی مختلف و شرایط پیرولیز آن ها انجام شده است [۶، ۱۳- ۱۶]. Chaves Fernandes و همکاران (۲۰۲۰)، پژوهشی در ارتباط با اثر دمای پیرولیز روی ویژگی های زغال زیستی مشتق شده از چوب اکالیپتوس انجام دادند. ایشان گزارش کردند که بین دمای پیرولیز با هدایت الکتریکی و کربن عنصری ارتباط مستقیمی وجود دارد. همچنین ارتباط منفی بین دمای پیرولیز با بازده، مقدار مواد فرار، اکسیژن عنصری، هیدروژن عنصری، سطح ویژه، خصلت آروماتیکی، شاخص های آب دوستی و قطبیت وجود دارد [۱۷]. Gabhi و همکاران (۲۰۲۰) در کار مطالعاتی شان بر روی دو گونه افرا قندی و کاج سفید، گزارش کردند که افزایش دمای پیرولیز در هر دو گونه مورد مطالعه، موجب افزایش هدایت الکتریکی، مقدار کربن، بازده و هم کشیدگی و کاهش تخلخل شد. [۱۸]. Handiso

یعنی از تغییرات طبیعی کمتری برخوردار باشد [۱۸]. با وجود مطالعات متعدد درباره اثر دمای پیرولیز بر ویژگی‌های زغال زیستی [۳،۹]، تاکنون پژوهشی در مورد تأثیر هرسونایکسانی چوب بر مقاومت الکتریکی زغال آن گزارش نشده است. در این پژوهش، ارتباط بین هرسونایکسانی ساختاری چوب و دمای پیرولیز بر مقاومت الکتریکی الکترودهای کربنی مشتق شده از آن، مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده نمودن نمونه‌های زغال زیستی

چوب

انتخاب چوب، برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی زغال زیستی تهیه‌شده از آن مثل دانسیته، تخلخل، هم کشیدگی بسیار مهم است. در این مطالعه چوب نوئل وارداتی (*Picea abies*) به‌عنوان پیش‌ماده چوبی به سبب خوش‌رفتار بودن در فرآیند پیرولیز انتخاب شد. نوئل، چوبی سوزنی‌برگ با دانسیته ۰/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. از بخش‌های بدون عیب و گره چوب، برش‌های شعاعی و مماسی به‌طور جداگانه با ابعاد $۰/۵ \times ۳۰ \times ۳۰$ میلی‌متر تهیه شد. از هر برش به تعداد ۹ نمونه تهیه شد.

شرایط پیرولیز

برای جلوگیری یا به حداقل رساندن ترک طی فرآیند پیرولیز، نمونه‌های چوبی مورد نظر در آن با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ روز خشک شدند. برای بررسی اثر دمای پیرولیز روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی، نمونه‌های شعاعی و مماسی چوب نوئل در سه دمای متفاوت ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد پیرولیز شدند. هر یک از نمونه‌های شعاعی و مماسی با ۳ تکرار در هر دما پیرولیز شدند. مدت زمان مورد نظر برای حرارت‌دهی نمونه‌های چوب نوئل در هر یک از دماهای پیرولیز یک ساعت و سرعت گرمادهی طی فرآیند پیرولیز برای همه نمونه‌ها ۵ درجه سانتی‌گراد در دقیقه بود. پیرولیز در یک کوره افقی از جنس استیل ضدزنگ تحت اتمسفر خلأ گاز آرگون انجام شد. پس از اتمام پیرولیز، نمونه‌ها از کوره خارج شد و برای چند دقیقه در دسیکاتور قرار گرفت و سپس وزن و ابعاد نمونه-

همکاران (۲۰۲۴) مطالعه‌ای در ارتباط با اثر دمای پیرولیز روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی تهیه‌شده از چوب کاج انجام دادند. مطالعات سطح ویژه (جذب گاز) نشان داد که سطح ویژه و حجم منافذ زغال زیستی با افزایش دمای پیرولیز، افزایش می‌یابد. در مقابل، مشخص شد که اندازه منافذ در دماهای بالا کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش دمای پیرولیز منجر به افزایش دانسیته و کاهش بازده زغال زیستی می‌شود [۱۹]. Abdallah و همکاران (۲۰۲۵)، در پژوهش خود اثر دمای پیرولیز بر قابلیت استفاده از زغال زیستی مشتق شده از چوب سدر به عنوان یک ماده الکتروود پایدار را برای ابرخازن‌ها بررسی نمودند. زغال‌های زیستی مشتق شده از چوب سدر در دماهای مختلف ۸۰۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید شدند و به طور کامل از نظر ویژگی‌های ساختاری، فیزیکوشیمیایی و الکتروشیمیایی، شامل سطح ویژه، آب‌گریزی، هدایت الکتریکی و گروه‌های عاملی سطحی، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای پیرولیز، مقاومت الکتریکی زغال زیستی کاهش یافت. همچنین زغال چوب سدر تولیدشده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد (BC900)، در مقایسه با سایر زغال‌های چوب تولیدشده در محدوده دمایی ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، دارای ویژگی‌های بهینه‌ای از نظر هدایت الکتریکی، آب‌گریزی و تخلخل بود [۲۰].

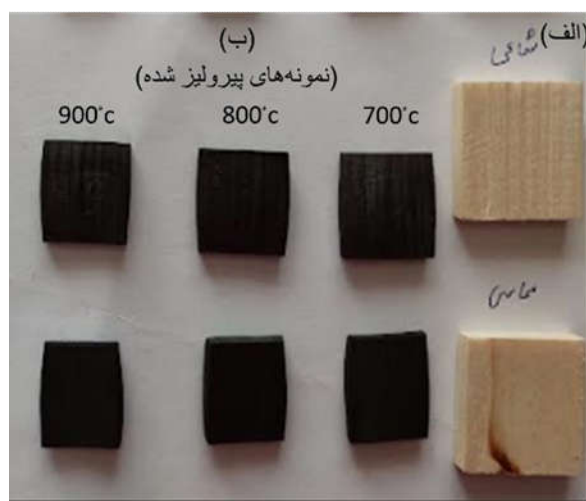
چوب یک ماده هرسونایکسان است، زیرا اجزای سلولی مختلف آن در جهات متفاوت قرار گرفته‌اند. برخی موازی با محور طولی (فیبرها و آوندها) و عده‌ای (پره‌های چوبی) در جهت عمود بر محور طولی درخت قرار گرفته‌اند. مواد هرسونایکسان دارای خواص فیزیکی جهت‌دار هستند، که به این معنی است که پاسخ فیزیکی این مواد مستقیماً به مسیری که در آن عمل می‌کنند وابسته است. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد هرسونایکسان در هر جهت متفاوت می‌باشد [۲۱]. در طی فرآیند پیرولیز، انتظار می‌رود که ویژگی‌های آناتومیکی و ساختاری چوب حفظ شوند، در حالی که ترکیب شیمیایی آن به طور کامل تغییر می‌کند. به دلیل حذف بیشتر اتم‌هایی مانند هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن، انتظار می‌رود که بر غال زیستی کاملاً کربونیزه شده، تغییرپذیری کمتری در ویژگی‌های خود نسبت به ماده اولیه چوبی داشته باشد،

شدند (جدول ۱). همچنین تصاویر مربوط به نمونه ها قبل و بعد از پیرولیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

ها اندازه گیری شد. زغال های زیستی تولید شده با شرایط یکسان به لحاظ دمای پیرولیز و نوع برش در زیپ کیف- های جدا قرار داده شدند و به صورت اختصاری نام گذاری

جدول ۱- زغال های زیستی تولید شده

برش نمونه	دمای پیرولیز (T)	علامت اختصاری
شعاعی	۷۰۰	R700
شعاعی	۸۰۰	R800
شعاعی	۹۰۰	R900
مماسی	۷۰۰	T700
مماسی	۸۰۰	T800
مماسی	۹۰۰	T900



شکل ۱- نمونه های شعاعی و مماسی چوب نوئل (الف) پیش از پیرولیز (ب) پس از پیرولیز در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد

اندازه گیری خواص فیزیکی

ویژگی های ابعادی نمونه های چوبی اولیه و نمونه های پیرولیز شده با استفاده از یک کولیس دیجیتالی اینسایز (شرکت اینسایز، چین) با دقت تا ۰/۰۱ میلی متر تعیین شد. اندازه گیری هر نمونه سه بار تکرار شد و مقادیر میانگین گزارش شد (جدول ۲). خواص فیزیکی نمونه های زغال زیستی شامل دانسیته، تخلخل، بازده زغال زیستی و هم کشیدگی آن ها اندازه گیری شد.

دانسیته توده ای (D) نمونه ها با تقسیم جرم بر حجم توده ای نمونه ها محاسبه شد. حجم توده ای نمونه ها با اندازه گیری ابعاد فیزیکی نمونه ها به دست آمد [۲۲].

$$D=M/V \quad (۱)$$

تخلخل (Φ) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد که در آن ρ_{BC} دانسیته زغال برحسب گرم بر سانتی متر مکعب و ρ_{AC} دانسیته کربن آمورف که برابر ۱/۸ است، می باشد (۱۸)

$$\Phi=1 - \rho_{BC}/\rho_{AC} \quad (۲)$$

بازده کربن از رابطه (۲) محاسبه شد که در آن جرم نمونه ها قبل از کربونیزه شدن (M_{ow}) و پس از کربونیزه شدن (M_{cw}) برای تعیین بازده اندازه گیری شد.

$$(\%) = M_{cw}/M_{ow} \times 100 \quad (۳)$$

هم کشیدگی شعاعی، مماسی و محوری نمونه ها که در طول فرآیند کربونیزاسیون رخ داد، با اندازه گیری هر یک از ابعاد قبل از کربونیزاسیون ($D(OW)$) و ابعاد پس از

آنالیز طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز (FTIR)

برای بررسی شیمی سطح و گروه‌های عاملی نمونه‌ها از روش طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز با دستگاه Avatar 360, Thermo Nicolet Co. مدل ساخت کشور آمریکا استفاده شد. برای انجام این آزمون ابتدا نمونه‌های کربونیزه با استفاده از هاون آزمایشگاهی به‌صورت پودری تبدیل شدند. قرص کوچکی از نمونه و برمید پتاسیم (KBr) تهیه شد. این آزمون در عدد موجی بین $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ و با قدرت تفکیک طیفی 1 cm^{-1} و ۳۲ اسکن بر دقیقه انجام شد.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

در این مطالعه، از روش پراب ۴ نقطه‌ای برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی استفاده شد. این روش در آغاز توسط Frank Wenner (۱۹۱۵) برای اندازه‌گیری دقیق رسانایی حالت جامد توسعه داده شد. این روش امکان تعیین رسانایی یک ماده جامد را بدون دخالت مقاومت‌های تماسی مزاحم فراهم می‌کند. در طول ۱۰۰ سال گذشته، این روش اصلاح شد و برای تحقیقات بنیادی و کاربردی در علم مواد و صنایع نیمه‌هادی به یک ابزار پرکاربرد تبدیل شد [۲۳].

تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و آنالیز واریانس دوطرفه و در نهایت مقایسه و گروه‌بندی میانگین‌ها به کمک آزمون دانکن در سطح معنی‌داری ۵ درصد ($p < 0.05$) انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و ریخت‌شناسی نمونه‌های

زغال زیستی

ویژگی‌های فیزیکی

بازده زغال زیستی، بخش باقیمانده از زیست‌توده خشک بعد از فرآیند پیرولیز می‌باشد. بین دمای پیرولیز و بازده زغال همبستگی منفی معنی‌داری ($R = -0.88$) وجود

کربونیزاسیون D(CW) و با استفاده از رابطه زیر (۴) برآورد شد.

$$(4) \quad \text{هر یک از ابعاد} = \frac{(D(OW) - D(CW))}{D(OW)} \times 100 = \text{هم کشیدگی در}$$

تشخیص نمونه‌های زغال زیستی

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

جهت بررسی ساختار زغال‌های زیستی و عکس‌برداری میکروسکوپی از میکروسکوپ الکترونی روبشی Pemtron scanning electron microscope (PS-230 (Korea) با ولتاژ ۱۰ کیلوولت استفاده شد. برای این منظور نمونه‌های پیرولیز شده در دماهای مختلف توسط دستگاه پوشاننده یون آبا لایه نازکی از فلز پلاتین (Pt) پوشش دهی شدند. برای آنالیز مرفولوژی سطح و ساختار متخلخل از تصاویر SEM با بزرگنمایی‌های مختلف استفاده شد.

طیف‌سنجی رامان (Raman spectroscopy)

طیف‌سنجی رامان برای بررسی درجه گرافیتی شدن و نیز ماهیت مواد کربنی انجام شد. این آنالیز با استفاده از میکروسکوپ رامان هم‌اکنون مدل TakRam N1-541 ساخت شرکت تکسان ایران در بازه $100-2500 \text{ cm}^{-1}$ و در طول موج 532 nm صورت گرفت. نمونه‌های مورد نیاز برای این آزمون، به‌صورت توده‌ای آماده شد.

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

این آزمون با استفاده از دستگاه پراش‌سنج بروکرگساخت کشور آلمان انجام شد. قبل از آزمون، نمونه‌های کربونیزه با استفاده از هاون آزمایشگاهی به پودری تبدیل شدند. تابش پرتو با طول‌موج 0.15 nm در بازه 5° تا 70° با گام 0.02° و با نرخ روبش 5° min^{-1} صورت گرفت. از نمونه‌های چوب قبل و بعد از پیرولیز در دماهای مختلف (۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) پرتو ایکس گرفته شد تا درجه بلورینگی آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

² Ion sputter

³ Bulk

⁴ D8-Advance Bruker

⁵ 4-point probe technique

(۲۰۲۴) هم‌راستا بوده است [۱۹]. نوع برش اثر معنی‌داری بر دانسیته نداشت. همچنین میزان تخلخل با استفاده از رابطه ۲ [۱۸] محاسبه شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما میزان تخلخل به‌طور معنی‌داری با ضریب همبستگی $R = -0/۸۳$ کاهش یافت.

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش دمای پیرولیز هم کشیدگی در هر سه جهت محوری، شعاعی و مماسی زغال افزایش یافت؛ بطوریکه بین دمای پیرولیز و هر سه نوع هم کشیدگی همبستگی مثبت معنی‌داری وجود دارد ($R = 0/۸۸$ محوری)، ($R = 0/۸۷$ شعاعی) و ($R = 0/۵۵$ مماسی). با توجه به نتایج، هم کشیدگی در سه جهت از الگویی مشابه چوب تبعیت می‌کند. در هر سه دما بیشترین و کمترین هم کشیدگی به ترتیب مربوط به جهت مماسی و محوری می‌باشد. به‌مانند نتایج بازده که از دمای ۸۰۰ به ۹۰۰ تغییر معنی‌داری نداشت و تقریباً ثابت بود؛ افزایش دانسیته و هم کشیدگی نیز در این محدوده دمایی بسیار اندک و تقریباً ثابت بود. این امر به دلیل تغییرات ساختاری در ماتریس کربنی پس از کربونیزه شدن می‌باشد [۱۸]. اثرات متقابل دما و برش برای دانسیته، تخلخل و بازده معنی‌دار نبود، در حالی که برای هم‌کشیدگی‌های محوری، شعاعی و مماسی معنی‌دار بود (جدول ۳ و شکل ۲)

داشت و با افزایش دمای پیرولیز بازده کاهش یافت (جدول ۲). روند این نتایج با نتایج Handiso و همکاران (۲۰۲۴) هم‌راستا بوده است [۱۹]. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بازده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۲۵ درصد بود و با افزایش دما به ۲۲-۲۳٪ کاهش یافت. کاهش بازده در این محدوده دمایی به سبب تجزیه حرارتی مواد لیگنوسولوزی و خروج بخار آب، خاکستر و مواد فرار می‌باشد [۲۴]. افزایش دما از ۸۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد اثر معنی‌داری بر بازده نداشت که احتمالاً به سبب تکمیل فرآیند کربونیزه شدن می‌باشد. همچنین نوع برش اثر معنی‌داری بر بازده کربن نداشت. نتایج مشابهی در ارتباط با دیگر مواد پیرولیز شده در دماهای مختلف توسط دیگر محققین گزارش شده است [۲۵-۲۸]. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های زغال زیستی تهیه‌شده از چوب نوتل در دماهای پیرولیز مختلف در جدول ۳ موجود است. همچنین جدول ۴ همبستگی آماری ویژگی‌های فیزیکی و دمای پیرولیز را نشان می‌دهد.

بین دانسیته زغال و دمای پیرولیز همبستگی معنی‌دار مثبت ($R = 0/۸۴$) وجود داشت؛ بطوریکه با افزایش دما از ۷۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، دانسیته زغال افزایش یافت. روند این نتایج با نتایج Handiso و همکاران

جدول ۲- نتایج دانسیته، تخلخل، بازده و هم کشیدگی نمونه‌های زغال زیستی تهیه‌شده از چوب نوتل در دماهای پیرولیز مختلف (با فرض اینکه کربن موجود در زغال زیستی کربن آمورف (a-C) و دانسیته آن ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد)

نمونه	دانسیته (g/cm ³)	تخلخل Φ	بازده کربن (%)	هم کشیدگی محوری (%)	هم کشیدگی شعاعی (%)	هم کشیدگی مماسی (%)
R700	0/۱۹۸ ± 0/۰۰۵	0/۸۸۹ ± 0/۰۰۳	۲۵/۸۲ ± 0/۰۲۵	۲۲/۵۳ ± 0/۰۳۵	۲۴/۵۷ ± 0/۰۳	۳۱/۲۴ ± 0/۰۱۱
R800	0/۲۳۰ ± 0/۰۰۴	0/۸۷۳ ± 0/۰۰۰	۲۳/۳۸ ± 0/۰۱۱	۲۳/۸۷ ± 0/۰۰۷	۲۶/۹۳ ± 0/۰۱۳	۳۱/۲۳ ± 0/۰۰۵
R900	0/۲۳۷ ± 0/۰۰۲۵	0/۸۶۸ ± 0/۰۰۳	۲۳/۱۰ ± 0/۰۰۴	۲۴/۱۵ ± 0/۰۰۵	۲۷/۵۹ ± 0/۰۲۸	۳۰/۵۱ ± 0/۰۱۳
T700	0/۲۰۷ ± 0/۰۰۳	0/۸۸۵ ± 0/۰۰۳	۲۵/۳۶ ± 0/۰۰۹	۲۱/۷ ± 0/۰۲۳	۲۵/۱۲ ± 0/۰۱۹	۲۷/۷۱ ± 0/۰۱
T800	0/۲۴۱ ± 0/۰۰۱۵	0/۸۶۶ ± 0/۰۰۸	۲۲/۷۶ ± 0/۰۰۴	۲۴/۰۴ ± 0/۰۱۴	۲۸/۷ ± 0/۰۰۷	۳۱/۲۲ ± 0/۰۰۷
T900	0/۲۴۵ ± 0/۰۰۸	0/۸۶۳ ± 0/۰۰۳	۲۲/۵۷ ± 0/۰۰۸	۲۳/۷۷ ± 0/۰۲۵	۲۸/۲۵ ± 0/۰۳۴	۳۲/۲۸ ± 0/۰۱۳

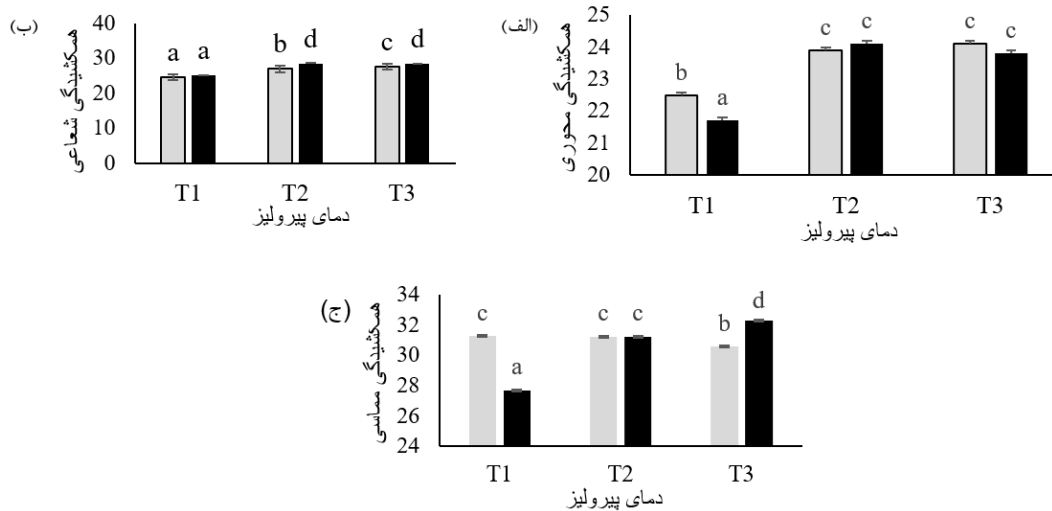
جدول ۳- نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های زغال زیستی تهیه شده از چوب نوئل

در دماهای پیرولیز مختلف

ویژگی	Df	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F value	Sig
دما	۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۴۴/۳۴۵	۰/۰۰۰
دانسیته	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۶/۴۷۶	۰/۳۲۶
دما*برش	۲	۸/۱۹۰	۴/۰۹۵	۰/۰۷۱	۰/۹۳۲
دما	۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۴۶/۶۳۶	۰/۰۰۰
برش	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۹/۰۹۱	۰/۲۵۷
دما*برش	۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۹۱	۰/۹۱۴
دما	۲	۲۷/۹۴۲	۱۳/۹۷۱	۲۶۳۶/۰۷۰	۰/۰۰۰
برش	۱	۱/۳۱۲	۱/۳۱۲	۲۴۷/۵۸۵	۰/۴
دما*برش	۲	۰/۰۱۶	۰/۰۰۸	۱/۵۳۱	۰/۲۵۶
دما	۲	۱۳/۶۲۷	۶/۸۱۴	۲۷۳/۵۷۵	۰/۰۰۰
برش	۱	۰/۵۳۰	۰/۵۳۰	۲۱/۲۹۸	۰/۴۵۰
دما*برش	۲	۰/۴۹۷	۰/۲۴۹	۹/۹۸۶	۰/۰۰۳
دما	۲	۳۶/۳۳۸	۱۸/۱۶۹	۴۲۷/۱۵۷	۰/۰۰۰
برش	۱	۳/۹۵۷	۳/۹۵۷	۹۳/۰۴۳	۰/۲۱۰
دما*برش	۲	۰/۴۴۵	۰/۲۲۲	۵/۲۲۸	۰/۰۲۳
دما	۲	۱۳/۷۳۱	۶/۸۶۶	۶۰۸/۴۶۷	۰/۰۰۰
برش	۱	۱/۷۰۵	۱/۷۰۵	۱۵۱/۱۱۶	۰/۳۹۰
دما*برش	۲	۲۱/۶۷۳	۱۰/۸۳۷	۹۶۰/۳۹۹	۰/۰۰۰

جدول ۴- همبستگی آماری ویژگی‌های فیزیکی و دمای پیرولیز

ویژگی	همبستگی	معنی داری	ویژگی	همبستگی	معنی داری
دانسیته	۰/۸۴۱	۰/۰۰۰	هم کشیدگی محوری	۰/۸۸۳	۰/۰۰۰
پروزیته	- ۰/۸۲۸	۰/۰۰۰	هم کشیدگی شعاعی	۰/۸۶۹	۰/۰۰۰
بازده	- ۰/۸۷۹	۰/۰۰۰	هم کشیدگی مماسی	۰/۵۵۰	۰/۰۱۸

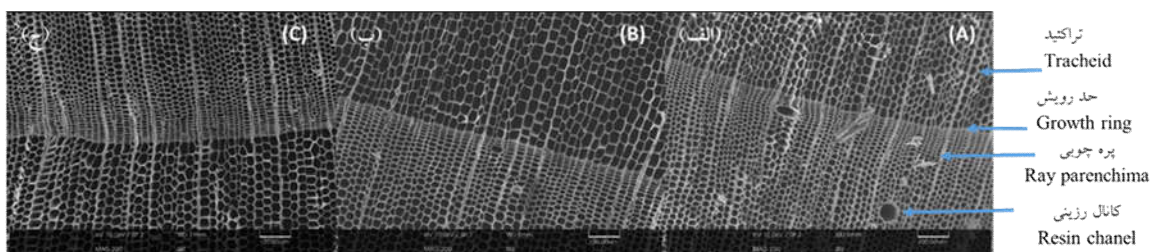


شکل ۲- اثر متقابل دما (T1=700، T2=800 و T3=900) و برش (شعاعی رنگ روشن و مماسی رنگ تیره) بر هم کشیدگی محوری (الف)، هم کشیدگی شعاعی (ب) و هم کشیدگی مماسی (ج)

ریخت‌شناسی

تصاویر SEM از سطح مقطع عرضی نمونه‌های تولید شده زغال نوئل در شکل ۱ نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهند که پیرولیز، ویژگی‌های آناتومیکی چوب را حفظ کرده است و ترک‌های قابل‌مشاهده در ناحیه سطح وجود ندارد. با توجه به شکل، ویژگی‌های اصلی چوب مانند تراکئیدها، پره‌های چوبی، کانال رزینی و حلقه‌های رویشی به‌وضوح مشاهده می‌شوند. با تحلیل و پردازش تصاویر SEM با بزرگنمایی زیاد از نمونه‌های زغال

تولیدشده در دماهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار ایمیج-جی (نسخه ۱/۴۴)، ضخامت دیواره‌های سلولی اندازه-گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای پیرولیز، ضخامت دیواره سلولی کاهش می‌یابد. برای مثال با افزایش دما از ۷۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، ضخامت دیواره سلولی زغال زیستی ۲۳٪ کاهش یافت. کاهش ضخامت دیواره سلولی در نتیجه ماتریس کربنی متراکم‌تر می‌باشد که با نتایج افزایش دانسیته نمونه‌های زغال در اثر افزایش دما، همخوانی دارد (جدول ۲).



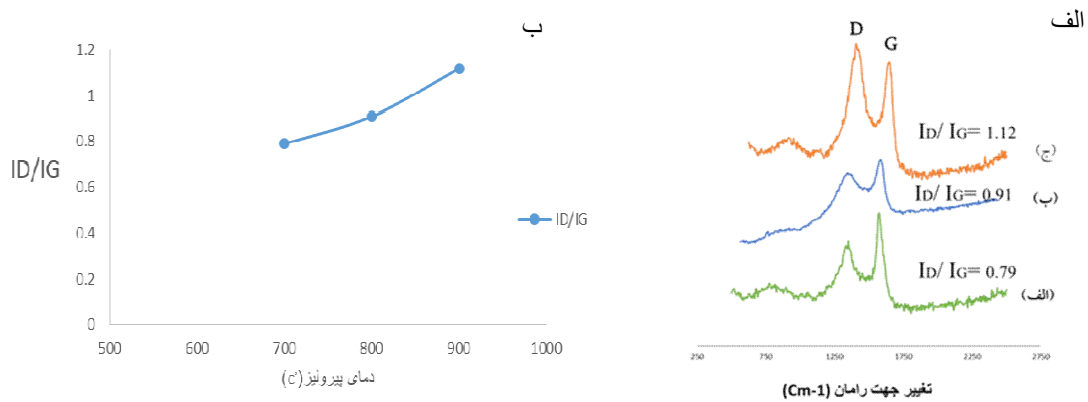
شکل ۱- تصاویر SEM از زغال تولید شده از نوئل در دماهای الف) ۷۰۰، ب) ۸۰۰، ج) ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

بررسی ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی

طیف‌سنجی رامان

آزمون طیف‌سنجی رامان برای تعیین مقدار نقص‌ها، ساختارهای منظم، ماهیت گرافیتی و مقاومت الکتریکی مواد کربنی به کار می‌رود. نتایج طیف‌سنجی رامان نمونه‌های کربونیزه شده در شکل ۲ نشان داده شده است که نشان‌دهنده دو قله مشخص در ناحیه $1-1340 \text{ cm}^{-1}$ (قله D) و $1-1580 \text{ cm}^{-1}$ (قله G) می‌باشد. قله D نشان‌دهنده کربن نامنظم و نقص‌های ساختاری و قله G نشان‌دهنده ساختارهای منظم کربنی در هیبریدیزاسیون‌های SP2 می‌باشد [۲۹، ۲۰]. نسبت شدت قله D به قله G (ID/IG) برای ارزیابی بی‌نظمی ساختاری به کار می‌رود [۳۰]. با

توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش دمای پیرولیز نسبت ID/IG افزایش یافته است. این افزایش در نسبت ID/IG با افزایش اندازه نانوکریستال‌های گرافیت همراه است که انتقال از فاز کربن آمورف به گرافیت نانوکریستالی را نشان می‌دهد [۱۸]. همچنین افزایش نسبت ID/IG می‌تواند ناشی از کاهش محتوای sp3 در کربن آمورف باشد [۲۳]. افزایش نسبت ID/IG نشان‌دهنده گرافیتی شدن بیشتر با افزایش دمای پیرولیز است که این امر منجر به کاهش مقاومت الکتریکی یا به عبارتی افزایش رسانایی الکتریکی می‌گردد. این نتایج با یافته‌های Gabhi و همکاران (۲۰۲۰) و Gabhi و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت داشت [۱۸، ۳۱].

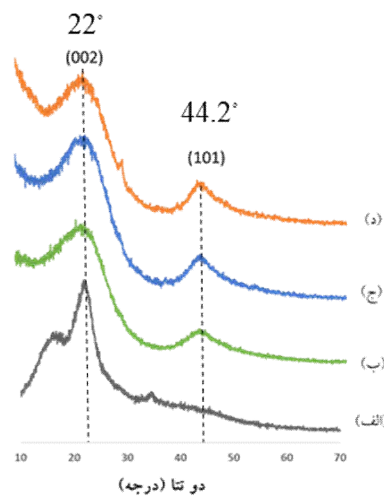


شکل ۲- الف- طیف‌های رامان نمونه‌های کربنی در دمای پیرولیز (الف) ۷۰۰، (ب) ۸۰۰ و (ج) ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد ب- نمودار نسبت ID/IG با دما

تشکیل کربن گرافیتی بیشتر می‌باشد [۱۷]. همچنین در منحنی‌های XRD مربوط به چوب کربونیزه شده در دماهای مختلف، پیک دو تا جدیدی در ناحیه تقریباً ۴۴/۲ درجه به‌وضوح مشاهده می‌شود که مربوط به صفحه کربنی گرافیتیک (۱۰۱) است. این پیک نشان‌دهنده توسعه نظم اتمی گرافیت مانند در مواد به‌شدت زغالی شده می‌باشد [۲۵]. این پیک منجر به ترتیب متوالی کربن در ساختارهای آروماتیک می‌گردد که نشان‌دهنده بالاترین تبلور مواد کربنی است [۳۳]. این یافته‌ها به تشکیل کربن گرافیتی پایدارتر (کمتر واکنش‌پذیر) در دماهای پیرولیز بالاتر اشاره دارد [۱۷].

پراش اشعه ایکس

منحنی‌های پراش پرتوی ایکس نمونه‌های چوب نوئل اولیه (کربونیزه نشده) و کربونیزه شده در دماهای مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی پراش پرتو ایکس چوب نوئل اولیه، دو قله در 22° و $16/68^\circ$ نشان داد که به ترتیب به صفحات کریستالوگرافیک (۰۰۲) و (۱۰۱) نواحی کریستالی سلولز نسبت داده می‌شود [۳۲]. همچنین پس از کربونیزاسیون ساختار چوب تخریب می‌شود و زغال زیستی حاصله دارای ساختار کربنی آمورف می‌باشد. پیرولیز در دماهای بالاتر موجب افزایش شدت پیک XRD در ناحیه (۰۰۲) می‌شود که نشان‌دهنده

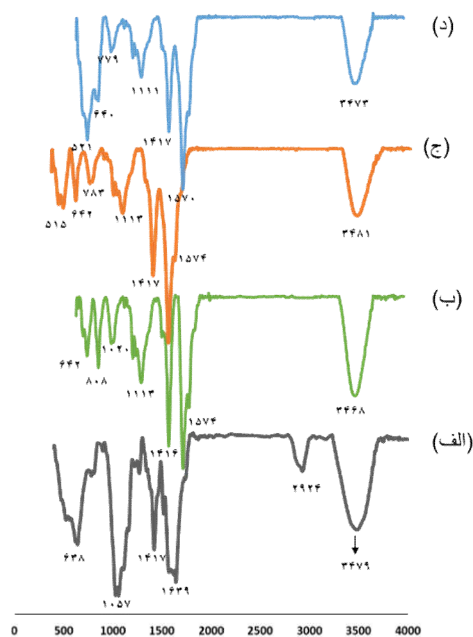


شکل ۳- منحنی‌های پراش پرتوی ایکس نمونه‌های چوب نوئل اولیه (کربونیزه نشده) (الف) و کربونیزه شده در دماهای پیرولیز (ب) ۷۰۰، (ج) ۸۰۰ و (د) ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

آنالیز طیف‌سنجی مادون قرمز

طیف‌های FTIR حاصل از بررسی نمونه‌های چوب نوئل اولیه (کربونیزه نشده) و کربونیزه شده در دماهای پیرولیز مختلف، در دامنه عدد موجی 4000 cm^{-1} تا 400 cm^{-1} در شکل ۴ ارائه شده است. مشخصات طیف‌سنجی زغال زیستی به نوع ماده اولیه، دمای پیرولیز، نرخ گرما و مقدار ترکیبات غیرآلی بستگی دارد که از میان آن‌ها دمای پیرولیز مهم‌ترین عامل در تعیین خصوصیات زغال زیستی می‌باشد [۳۴]. همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود در طیف مربوط به چوب نوئل اولیه (کربونیزه نشده)، نواری برجسته در 2924 cm^{-1} (C-H)، CH_2 ، CH_3 مشاهده می‌شود که مربوط به ترکیبات آلیفاتیک می‌باشد و با انجام پیرولیز در دماهای بالا حذف شد که نشان‌دهنده تخریب سلولز و همی سلولز می‌باشد [۳۵، ۳۶]. همچنین در همه نمونه‌های کربونیزه نشده و کربونیزه شده، نوار نمایان شده در ناحیه عدد موجی 3470 مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل ($-\text{OH}$) الکلی و فنولی سطح چوب می‌باشد که با افزایش دمای پیرولیز ضعیف‌تر شده است و بیانگر دهیدراتاسیون چوب کربونیزه است. گروه‌های عاملی دارای اکسیژن در اثر افزایش دمای پیرولیز، کاهش می‌یابند [۳۷]. نوارهایی

که در بازه 1650 cm^{-1} - 1550 cm^{-1} مشاهده شد، در ارتباط با گروه‌های آروماتیکی و کربن آروماتیک (C=C) می‌باشد که هنگام تجزیه لیگنین تشکیل می‌شوند [۲۵، ۳۸، ۳۹] و با افزایش دمای پیرولیز شدت این نوار بیشتر شده است. نوار برجسته در 1417 cm^{-1} مربوط به ارتعاش‌های پیوند C-H می‌باشد و شدت آن با افزایش دما کاهش یافته است [۴۰]. نوار برجسته در 1020 ، 1057 و 1113 به ارتعاش پیوند C-O-C نسبت داده می‌شود. نوار 638 cm^{-1} ناشی از ارتعاش‌های خمشی خارج از صفحه پیوند O-H است. نوار برجسته در بازه 770 cm^{-1} تا 800 cm^{-1} نشان‌دهنده تغییر شکل خارج از صفحه ناشی از اتم‌های کربن- هیدروژن آروماتیک می‌باشد [۴۱]. افزایش دمای پیرولیز موجب کاهش شدت برخی گروه‌های عاملی زغال زیستی شد. عامل کاهش گروه‌های عاملی به‌ویژه گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل، تخریب و تغییر شکل همی سلولز ($260-200$ درجه سانتی‌گراد)، سلولز ($400-315$ درجه سانتی‌گراد) و لیگنین (بالای 400 درجه سانتی‌گراد) در ساختارهای کربنی بسیار آروماتیک و همگن می‌باشد [۴۰]. نتایج بررسی طیف‌های FTIR مؤید این تغییرات می‌باشد.



شکل ۴- طیف FTIR نمونه‌های چوب نوئل اولیه (کربونیزه نشده) (الف) و کربونیزه شده در دماهای پیرولیز (ب) ۷۰۰، (ج) ۸۰۰ و (د) ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

مقاومت الکتریکی زغال زیستی

الکترون‌های π در کربن‌های sp² مسئول هدایت الکتریکی می‌باشند [۴۲]. ماتریس کربنی زیستی مونولیتیک تا حد زیادی دارای ساختار آمورف است که اساساً از کربن sp³ حاوی نواحی گرافیتی تودرتو sp² تشکیل شده است. مکانیسم پیشنهادی برای هدایت الکتریکی در کربن زیستی مونولیتیک، پرش الکترون^۶ است که در آن حامل‌های بار بین حالت‌های ایجاد شده توسط مناطق sp² در کربن زیستی پرش می‌کنند. با توجه به مدل پرش الکترون ارائه‌شده برای کربن آمورف [۴۲]، هدایت الکترون در کربن زیستی توسط تعداد و اندازه محل‌های نانوکریستالی گرافیتی sp² کنترل می‌شود (۲۹)؛ بنابراین، افزایش میزان گرافیتی شدن با افزایش دما، رسانایی ذاتی ماتریس کربنی در کربن زیستی را با کاهش فاصله بین نانوبلورها افزایش می‌دهد (۲۹) که با کاهش مقاومت الکتریکی یا به عبارتی افزایش مشاهده شده در هدایت الکتریکی در دماهای بالاتر در این مطالعه مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارتباط بین هرسونایکسانی ساختاری چوب نوئل و دمای پیرولیز بر مقاومت الکتریکی زغال حاصل از آن بررسی و مطالعه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش دمای پیرولیز به‌طور معنی‌دار موجب کاهش بازده زغال زیستی و تخلخل و افزایش دانسیته و هم‌کشیدگی زغال زیستی تهیه‌شده از چوب نوئل شد. همچنین نوع برش اثر معنی‌داری بر بازده زغال زیستی، تخلخل و دانسیته زغال نداشت. با توجه به نتایج، هم‌کشیدگی در سه جهت از الگویی مشابه چوب تبعیت نمود. در هر سه دما بیشترین و کمترین هم‌کشیدگی به ترتیب مربوط به جهت مماسی و محوری بود. همچنین نتایج تصاویر SEM از سطح مقطع عرضی نمونه‌های تولید شده زغال نوئل نشان داد که ویژگی‌های آناتومیکی چوب در زغال حاصله حفظ شده است. نتایج آزمون رامن نشان‌دهنده گرافیتی شدن بیشتر با افزایش دمای پیرولیز بود که این امر به کاهش مقاومت الکتریکی یا به عبارتی افزایش هدایت الکتریکی منجر شد. در مورد هر دو نوع برش شعاعی و مماسی، با افزایش دما مقاومت الکتریکی

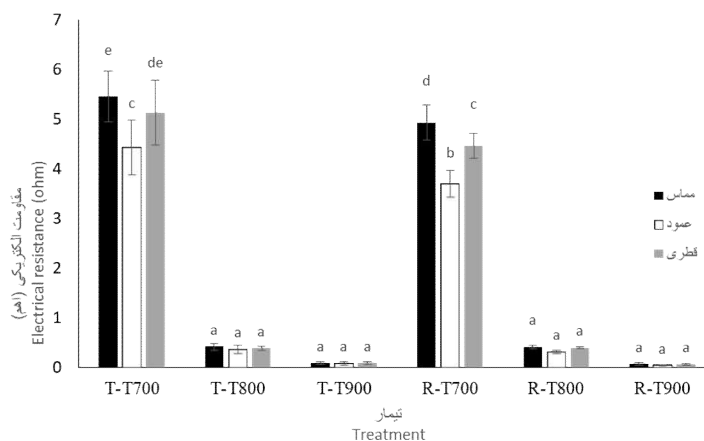
مقادیر مقاومت الکتریکی با روش پراب ۴ نقطه در هریک از نمونه‌های شعاعی و مماسی در سه جهت مماس با دواپر رویش، عمود بر دواپر رویش و زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت دواپر اندازه‌گیری شد (شکل ۵). با توجه به نتایج در مورد هر دو نوع برش شعاعی و مماسی، با افزایش دما مقاومت الکتریکی در سطح اعتماد ۹۵ درصد به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس داده‌های مقاومت الکتریکی نمونه‌های زغال زیستی تهیه‌شده از چوب نوئل در دماهای پیرولیز مختلف در جدول ۵ موجود است. بیشترین مقادیر مقاومت الکتریکی ($5/46 \Omega$) و به عبارتی کمترین هدایت الکتریکی مربوط به جهت مماس با دواپر زغال حاصل از T700 و کمترین مقاومت الکتریکی ($0/05 \Omega$) و بیشترین هدایت الکتریکی مربوط به جهت عمود بر دواپر زغال حاصل از R900 بود. با توجه به نتایج با افزایش دما از ۷۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت الکتریکی تقریباً ۱۲ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش دما از ۸۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر مقاومت الکتریکی تقریباً ۶ درصد کاهش یافت؛ به عبارت دیگر، با افزایش دما از ۷۰۰ به ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد هدایت الکتریکی افزایش یافت. روند این نتایج با نتایج Abdallah و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا بوده است [۲۰].

همچنین با توجه به نتایج (شکل ۵)، در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، نوع برش چوب اثر معنی‌داری بر مقاومت الکتریکی زغال حاصل از آن نداشت، در حالی که دماهای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) اثر معنی‌داری بر مقاومت الکتریکی زغال حاصل از آن نداشت. حرارت‌دهی چوب و انجام فرآیند شیمیایی کربونیزه شدن، موجب تبدیل پلیمرهای آلی موجود در چوب (مانند سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) به کربن آمورف (a-C) یا کربن هیدروژنه (a-C:H) می‌شود. پلیمرهای آلی عایق هستند؛ در صورتی که کربن آمورف و کربن آمورف هیدروژنه نیمه‌هادی می‌باشند. در کربن آمورف و کربن آمورف هیدروژنه، انواع اتم‌های کربن هیبریدی sp² و sp³ با نسبت‌های مختلف وجود دارد. کربن‌های sp² منظم (مثل گرافن، CNT و گرافیت) رسانا و کربن‌های sp³ منظم (الماس) عایق هستند [۱۸].

⁶Electron hopping

نداشت. کمترین مقاومت الکتریکی و به عبارتی بیشترین رسانایی الکتریکی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. همچنین بین دمای ۸۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری دیده نشد بنابراین دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان بهترین دما برای تهیه زغال زیستی پیشنهاد می‌شود. از منظر اهداف توسعه پایدار، الکترودهای کربنی مشتق شده از چوب، تقریباً هیچ‌گونه پسماند خطرناک، مواد اضافی سمی و آسیب به سلامت انسان ایجاد نمی‌کنند. همچنین این مواد سازگار با محیط زیست هستند. با توجه به مقاومت الکتریکی کم و به عبارتی هدایت الکتریکی زیاد این مواد در کاربردهای ذخیره انرژی و ابر خازن‌ها، حسگرها و مواد دسته‌بندی هوشمند پیشنهاد می‌شود.

در سطح اعتماد ۹۵ درصد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طور کلی، افزایش دمای پیرولیز و گرافیتی شدن بیشتر چوب موجب کاهش مقاومت الکتریکی و یا به عبارتی افزایش هدایت الکتریکی زغال حاصل از آن شد. همچنین، هرسونایکسانی و نوع برش چوب، در دماهای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد اثر معنی‌داری بر مقاومت الکتریکی زغال حاصل از آن نداشت. کربونیزه شدن و گرافیتی شدن زغال زیستی در طی پیرولیز به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد و به‌طور معنی‌داری روی مقاومت و هدایت الکتریکی اثر می‌گذارد که احتمالاً از طریق پرش الکترونی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله، افزایش دما از ۸۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد اثر معنی‌داری بر بازده، دانسیته، هم کشیدگی‌ها و مقاومت الکتریکی زغال حاصل از آن



شکل ۵- اثر تیمار حرارتی و برش بر مقاومت الکتریکی زغال‌های تولیدشده (R: برش شعاعی، T: برش مماسی)

جدول ۵- تجزیه واریانس داده‌های مقاومت الکتریکی نمونه‌های زغال زیستی تهیه‌شده از چوب نوئل در دماهای پیرولیز مختلف

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)
تیمار	5	240.811	48.162	690.6806	2.20E-16 ***
جهت	2	1.564	0.782	11.2136	0.000164***
تیمار: جهت	10	2.455	0.246	3.5209	0.002547**
باقی مانده‌ها	36	2.51	0.07		

temperature. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017. 11: p. 1-12.

- [3] Fu, P., et al. Effects of pyrolysis temperature on characteristics of porosity in biomass chars. in 2009 International Conference on Energy and Environment Technology. 2009. IEEE.
- [4] Bartoli, M., et al., A review of non-soil biochar applications. *Materials*, 2020. 13(2): p. 261.
- [5] Li, S. and G. Chen, Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral

منابع

- [1] Ghani, W.A.W.A.K., et al., Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: chemical and physical characterization. *Industrial Crops and Products*, 2013. 44: p. 18-24.
- [2] Lin, Q., et al., The speciation, leachability and bioaccessibility of Cu and Zn in animal manure-derived biochar: effect of feedstock and pyrolysis

- chemical characteristics of pine wood biochar. *Waste Management Bulletin*, 2024. 2(4): p. 281-287.
- [20] Abdallah, L., et al., Influence of Pyrolysis Temperature on the Properties and Electrochemical Performance of Cedar Wood-Derived Biochar for Supercapacitor Electrodes. *Bioengineering*, 2025. 12(8): p. 841.
- [21] Haider, S. and A. Haider, *Renewable Polymers and Polymer-Metal Oxide Composites: Synthesis, Properties, and Applications*. 2022: Elsevier.
- [22] Fazeli, A., et al., Wood-derived hierarchical porous carbon as supercapacitive cathode for high-performance sediment microbial fuel cells. *Materials Chemistry and Physics*, 2025. 333: p. 130355.
- [23] Miccoli, I., et al., The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015. 27(22): p. 223201.
- [24] Li, S., et al., Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018. 133: p. 136-146.
- [25] Keiluweit, M., et al., Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental science & technology*, 2010. 44(4): p. 1247-1253.
- [26] Xiao, X., B. Chen, and L. Zhu, Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures. *Environmental science & technology*, 2014. 48(6): p. 3411-3419.
- [27] Yuan, H., et al., Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015. 112: p. 284-289.
- [28] Wei, S., et al., Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge. *Chemosphere*, 2019. 218: p. 624-631.
- [29] Lu, Y., et al., Biomass-derived heteroatoms-doped mesoporous carbon for efficient oxygen reduction in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017. 98: p. 350-356.
- [30] Liu, L., et al., Conversion of straw to nitrogen doped carbon for efficient oxygen reduction catalysts in microbial fuel cells. *RSC advances*, 2015. 5(109): p. 89771-89776.
- [31] Gabhi, R., et al., Intrinsic electrical conductivity of monolithic biochar. *Biomass and Bioenergy*, 2024. 181: p. 107051.
- [32] Biswas, B., et al., Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource technology*: ۲۰۱۷. ۲۳۷. p. 57-63.
- [33] Tushar, M.S.H.K., et al., Production, characterization and reactivity studies of chars characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures. *Waste Management*, 2018. 78: p. 198-207.
- [6] Suliman, W., et al., Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*, 2016. 84: p. 37-48.
- [7] Li, S., et al., Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 215: p. 890-902.
- [8] Azargohar, R., et al., Evaluation of properties of fast pyrolysis products obtained, from Canadian waste biomass. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 2013. 104: p. 330-340.
- [9] Macquarrie, D.J., J.H. Clark, and E. Fitzpatrick, The microwave pyrolysis of biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2012. 6(5): p. 549-560.
- [10] Steinbeiss, S., G. Gleixner, and M. Antonietti, Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009. 41(6): p. 1301-1310.
- [11] Jiang, J., et al., Highly ordered macroporous woody biochar with ultra-high carbon content as supercapacitor electrodes. *Electrochimica Acta*, 2013. 113: p. 481-489.
- [12] Taslim, R., Production of activated carbon electrodes from Sago waste and its application for an electrochemical double-layer capacitor. *International Journal of ELECTROCHEMICALSCIENCE*, 2018.
- [13] Al-Wabel, M.I., et al., Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. *Bioresource technology*, 2013. 131: p. 374-379.
- [14] Liu, Z., et al., Comparative analysis of the properties of biochars produced from different pecan feedstocks and pyrolysis temperatures. *Industrial Crops and Products*, 2023. 197: p. 116638.
- [15] Balmuk, G., et al., EFFECTS OF PYROLYSIS TEMPERATURE AND PRESSURE ON AGRONOMIC PROPERTIES OF BIOCHAR. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023: p. 105858.
- [16] Tomczyk, A., Z. Sokołowska, and P. Boguta, Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2020. 19: p. 191-215.
- [17] Chaves Fernandes, B.C., et al., Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. *Materials*, 2020. 13(24): p. 5841.
- [18] Gabhi, R., et al., Electrical conductivity of wood biochar monoliths and its dependence on pyrolysis temperature. *Biochar*, 2020. 2: p. 369-378.
- [19] Handiso, B., T. Pääkkönen, and B.P. Wilson, Effect of pyrolysis temperature on the physical and

- [39] Quosai, P., et al., Characterization of biocarbon generated by high-and low-temperature pyrolysis of soy hulls and coffee chaff: For polymer composite applications. *Royal Society open science*, 2018. 5(8): p. 171970.
- [40] Singh, B., M. Camps-Arbestain, and J. Lehmann, *Biochar: a guide to analytical methods*. 2017: Csiro Publishing.
- [41] Yang, F., et al., Effective sorption of atrazine by biochar colloids and residues derived from different pyrolysis temperatures. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018. 25: p. 18528-18539.
- [42] Marx, S., I. Chiyanzu, and N. Piyo, Influence of reaction atmosphere and solvent on biochar yield and characteristics. *Bioresource technology*, 2014. 164: p. 177-183.
- [43] Dasgupta, D., F. Demichelis, and A. Tagliaferro, Electrical conductivity of amorphous carbon and amorphous hydrogenated carbon. *Philosophical Magazine B*, 1991. 63(6): p. 1255-1266.
- produced by the isothermal pyrolysis of flax straw. *Biomass and bioenergy*, 2012. 37: p. 97-105.
- [34] Darusman, D., et al., Functional Group Structure of Bamboo and Pine Wood Biochar Due to Differences in Pyrolysis Temperature. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 2022. 11(1): p. 21-28.
- [36] Essandoh, M., et al., Sorptive removal of salicylic acid and ibuprofen from aqueous solutions using pine wood fast pyrolysis biochar. *Chemical Engineering Journal*, 2015. 265: p. 219-227.
- [37] Usman, A.R., et al., Biochar production from date palm waste: Charring temperature induced changes in composition and surface chemistry. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015. 115: p. 392-400.
- [38] Nishimiya, K., et al., Analysis of chemical structure of wood charcoal by X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Wood Science*, 1998. 44: p. 56-61.