

بررسی اثر دمای پیرولیز بر کیفیت بیوچار ماکروجلبک قهوه ای *Padina australis* Hauck

و ارزیابی کارایی آن در حذف کادمیوم

مریم سلطانی^۱، مرتضی یوسف زادی^{۲*}، نرگس امراللهی بیوکی^۱، عبدالمجید میرزاعلیان دستجردی^۲
موسی کشاورز^۱

^۱دانشکده علوم فنون دریایی دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

^۲گروه زیست‌شناسی دانشکده علوم پایه دانشگاه قم، قم، ایران

^۳دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳

چکیده مقاله

بیوچار ماده‌ای غنی از کربن که بطور گسترده‌ای برای حذف و کاهش فعالیت فلزات سنگین، استفاده می‌شود. در این پژوهش بررسی اثر دمای بهینه، ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی و اصلاح خاک پرداختیم. بیوچار در سه دمای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از ماکروجلبک قهوه‌ای *Padina australis* Hauck تولید شد و با توجه به نتایج بازده بیوچار بترتیب ۷۰/۰۱۶، ۶۶/۳۶ و ۴۲ درصد، میزان اسیدیته بترتیب ۸/۷۵، ۹/۱۹ و ۱۰/۱، کربن آلی بترتیب ۱۹/۳۳، ۲۱/۱۲، ۲۳/۰۵ درصد، هدایت الکتریکی بترتیب ۳/۱۸، ۳/۸۳ و ۵/۵ میلی‌زمینس بر متر و طیف مادون قرمز، بیوچار در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد جهت اصلاح خاک آلوده مورد استفاده قرار گرفت. کادمیوم با سطح (۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بیوچار ۵۰۰ با سطح (۸ گرم بر کیلوگرم) به خاک اضافه و بمدت صفر، پانزده و سی روز انکوبه شدند. نتایج نشان داد با افزایش تعداد روز انکوبه کربن کل ۱۲ درصد، مواد آلی ۲۰ درصد، اسیدیته ۸/۱ و هدایت الکتریکی ۲/۵ میلی‌زمینس بر متر افزایش یافت. فعالیت آنزیمی کاتالاز خاک با افزودن بیوچار ۵۰۰، در روز صفر بالاترین ۳۰ و در روز سی پایین‌ترین ۱۵ میکرومول پراکسید هیدروژن بر گرم-ساعت و همچنین میزان کادمیوم خاک در روز صفر ۰/۴۴ و در روز سی ۰/۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. بنابراین بیوچار تولید شده در دمای ۵۰۰ قابلیت تثبیت، اصلاح خصوصیات فیزیکیوشیمیایی خاک و غیر فعال کردن فلز کادمیوم را دارد.

واژگان کلیدی: بیوچار، فلزات سنگین، ماکروجلبک قهوه‌ای *Padina australis* Hauck، دمای بهینه، کاتالاز

* نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: morteza110110@gmail.com

مقدمه

در سال‌های اخیر، بدلیل صنعتی شدن مداوم و فعالیت‌های مختلف انسانی، خاک به عناصر بالقوه سمی-مانند فلزات سنگین-آلوده شده و بعنوان مخزن آلاینده-ها در محیط تبدیل گردیده است. در اکوسیستم‌های زمینی، تنش فلزات سنگین در سراسر جهان بدلیل اثر کشنده آن‌ها بر خاک و همچنین بهره‌وری گیاه اهمیت زیادی پیدا کرده است [۳۷]. خاک‌های آلوده به فلزات سنگین می‌توانند بدلیل تجزیه ناپذیری، تجمع زیستی و سمیت بالای فلزات سنگین، خطرات بالقوه بالایی برای امنیت غذایی و سلامت انسان ایجاد کنند [۳۲]. میلیون‌ها نفر از کشورهای مختلف در معرض آلودگی ناشی از فلزات سنگین قرار دارند. اصلاح خاک آلوده برای تولید غذای سالم و ایمن را می‌توان با به حداقل رساندن دسترسی فلزات سنگین به گیاهان را بدست آورد [۴]. برای اصلاح خاک آلوده به فلزات سنگین فناوری‌های مختلفی مانند شستشوی خاک [۱۸]، گیاه پالایی و بی حرکت کردن فلزات سنگین توسعه یافته است [۱۲]. بی حرکت کردن فلزات سنگین بعنوان یک روش مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست در نظر گرفته شده است که می‌تواند فلزات سنگین را از طریق فعل انفعالات فیزیکی یا شیمیایی مانند بیوچار، کیتوزان و غیره، غیرفعال کند [۴۷]. جلبک قهوه‌ای بعنوان منبع غنی برای تولید سوخت زیستی شناخته می‌شود. این جلبک از طریق فرآیندهای بیولوژیکی و ترموشیمیایی می‌تواند به سوخت‌های زیستی، از جمله بیوچار، تبدیل شود. در بین جلبک‌های قهوه‌ای، *Padina australis* Hauck بعنوان یک منبع بیولوژیک بسیار امیدوارکننده برای تولید سوخت‌های زیستی بدلیل منابع غنی و قابل ملاحظه اش شناخته شده است. این جلبک بدلیل محتوای کربن بالا، بیوماس غنی، رشد سریع و فراوانی

آن نقش اساسی در تولید بیوچار را بازی می‌کند. استفاده از این جلبک در تولید بیوچار منجر به بهبود حاصلخیزی خاک، کاهش وابستگی به منابع سنتی بیومس، و ارتقاء عملکرد بیواقتصاد چرخه اقتصادی می‌شود [۱۷]. بیوچار از طریق سوزاندن زی توده در شرایط نبود اکسیژن یا اکسیژن خیلی کم در دمای ۲۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی-گراد بوجود می‌آید [۱۱]. بیوچار دارای ساختمان متخلخل، سطح باردار و گروه‌های عاملی می‌باشد. این خصوصیات فاکتورهای مهمی هستند که بر انتقال، تغییر شکل و قابلیت دسترسی فلزات سنگین در خاک اثر می‌گذراند. استفاده از بیوچار باعث توسعه فعالیت آنتی اکسیدان‌ها در شرایط استرس می‌شود [۴۵] و همچنین بیوچار بر نفوذپذیری سلول‌ها، جذب فلزات و جذب در گیاه از طریق تعامل با خواص الکتریکی آنزیم و فعالیت-های غشایی تاثیر دارد [۳۹]. دما نقش مهمی در گنجایش جذب فلزات سنگین توسط بیوچار را ایفا می‌کند. مکانیزم‌های جذب فلزات سنگین توسط بیوچار شامل برهمکنش‌های الکتروستاتیک، تبادل یونی، رسوب شیمیایی، کمپلکس با گروه‌های عاملی در سطح بیوچار می‌باشد [۵۰]. بیوچار علاوه بر اصلاح خاک آلوده فعالیت‌های بیولوژیکی خاک را نیز بهبود می‌بخشد. آنزیم‌های خاک نقش مهمی را در تجزیه مواد آلی و چرخه مواد مغذی ایفا می‌کنند همچنین بعنوان شاخص‌های مهم بیولوژیکی برای ارزیابی کیفیت خاک آلوده به فلزات سنگین شناخته شده‌اند. [۴۲]. مطالعات متعددی نشان دادند که کاربرد بیوچار تولید شده در دماهای مختلف، در خاک‌های آلوده می‌تواند قابلیت دسترسی فلزات سنگین را از طریق تبادل کاتیونی و غیره کاهش دهد و به حداقل رساندن جذب فلز و کاهش سمیت فلز در گیاهان کمک کند [۲۱]. کواک و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر دماهای مختلف بیوچار تهیه شده از کلش

کلزا، گندم و کود دامی را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که به دلیل افزایش اسیدیته، مقدار خاکستر و در نتیجه افزایش تبادل یونی و کاهش فلز سنگین با افزایش دمای پیرولیز افزایش می‌یابد [۲۸]. شن و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تاثیر بیوچارهای تولید شده از ضایعات برنج خام در دماهای متفاوت بر حذف فلز سنگین کادمیوم پرداختند و مشاهده کردند که با افزایش دمای پیرولیز مقدار کادمیوم بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۳۴]. همچنین مولایی و فرهادیان (۱۳۹۹) در مطالعه خود به بررسی پتانسیل استفاده از بیوچار جلبکی در بهبود کیفیت آب و خاک پرداختند و اظهار کردند که دما تاثیر معنی‌دار مثبتی بر روی pH، EC، محتوای کربن آلی، محتوای خاکستر دارد و می‌توان بیوچار را بعنوان اصلاح کننده‌ی خاک‌های اسیدی استفاده کرد [۳].

از آنجایی که سواحل جنوبی ایران دریای عمان و خلیج فارس دارای ماکرو جلبک‌های دریایی بسیار سودمند و اقتصادی هستند درحالی که از آن‌ها استفاده مدون و اصولی نمی‌شود. پژوهش حاضر بر آن است تا با استفاده از این مواد طبیعی و ضایعات به جا مانده از آن در سواحل چابهار، به بررسی بیوچار تولید شده از ماکرو جلبک قهوه‌ای *Padina australis* Hauck در دماهای مختلف، تاثیر آن بر فعالیت آنزیمی کاتالاز خاک و کاهش فلز سنگین کادمیوم در خاک ماسه‌ای بپردازد.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و ویژگی‌های خاک: این پژوهش در زمستان سال ۱۴۰۱، در گلخانه دانشگاه هرمزگان واقع شده در شهر بندرعباس، انجام شد. خاک مورد نظر از گلخانه دانشگاه هرمزگان جمع‌آوری و نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در مجاورت هوا، از الک ۴ میلی

متری برای ترکیب با بیوچار و همچنین بخشی از خاک‌ها برای انجام آزمایش‌های اولیه از الک ۲ میلی‌متری عبور و برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه از جمله بافت به روش هیدرومتری [۹]، ماده آلی به روش لئوپرت و همکاران (۱۹۹۶) [۳۱]، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع به وسیله هدایت سنج (Jenway) مدل ۴۰۱۰ ساخت کشور انگلستان، اسیدیته در خمیر اشباع به وسیله پی‌اچ سنج (istek) ساخت کشور کره [۹]، اندازه‌گیری و نتایج آن در جدول (۱) گزارش شده است.

تهیه بیوچار از ماکرو جلبک و ویژگی‌های بیوچار: ماکرو جلبک *Padina australis* Hauck از سواحل تیس واقع در شهرستان چابهار جمع‌آوری و به‌منظور حذف نمک و ماسه چندین بار با آب معمولی و سپس با آب مقطر شست و شو داده شد. پس از آن در محیط آزمایشگاه در مجاورت هوا خشک و بمدت یک هفته نگه‌داری شد. نمونه‌های خشک در آون الکتریکی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بمدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. نمونه‌های مورد نظر آسیاب و از الک ۲۰۰ میکرون عبور داده شدند، تا اندازه دانه‌ها همگن شود. ۱۵ گرم از نمونه‌های الک شده در ظروف استیل در کوره پیرولیز تحت گاز نیتروژن مایع با شدت جریان ۱ لیتر در دقیقه در دماهای مختلف ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (B۳۰۰، B۴۰۰ و B۵۰۰) و بمدت ۲ ساعت قرار گرفتند. پس از پایین آمدن دما بیوچارهای تولید شده از دستگاه خارج و وزن آن‌ها اندازه‌گیری گردید [۴۰]. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بیوچار مورد مطالعه قرار گرفت. برای اندازه‌گیری اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها، ۱ گرم بیوچار توزین شد و با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد. پس از انجام شیکر برای ۲ ساعت، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲

حفظ رطوبت ۷۰ درصد منتقل شدند. نمونه‌های خاک در روزهای صفر، پانزده و سی جمع‌آوری شدند و ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی نمونه‌های خاک شامل اسیدیته، هدایت الکتریکی، مواد آلی و کربن کل در روزهای صفر، پانزده و سی با روش ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) مورد سنجش قرار گرفتند

سنجش فلز کادمیوم: نمونه‌ها ابتدا در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس به مدت ۱۴ ساعت در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی قرار داده می‌شوند. پس از سرد شدن، خاکستر حاصل در نیتریک اسید ۱۰ درصد حل شده و میزان کادمیوم خاک توسط دستگاه طیف سنج جذب اتمی (Shimadzu AA 6300) اندازه‌گیری سنجش گردید [۳۴].

سنجش فعالیت آنزیمی کاتالاز: برای سنجش فعالیت آنزیمی کاتالاز، ۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج با یک میلی‌لیتر محلول اندازه‌گیری کاتالاز که شامل ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم 25 (pH=7) میلی‌مولار و ۱۳ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی‌مولار است، مخلوط شده و سپس جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر خوانده می‌شود. یک واحد آنزیمی کاتالاز برابر با تجزیه یک میلی‌مولار پراکسید هیدروژن در یک دقیقه است [۱۳].

آنالیز داده‌ها: در این پژوهش، خصوصیات فیزیکیوشیمیایی خاک و بیوپار تولید شده و در دسترس بودن فلز سنگین با استفاده از نرم افزار SPSS 26 تجزیه و تحلیل گردید و ترسیم نمودارها با نرم افزار Excel 2016 انجام گردید. همچنین برای نشان دادن تفاوت پارامترهای ذکر شده بین تیمارهای مختلف از آنالیز یک طرفه (ANOVA) در سطح ۰/۰۵ درصد استفاده شد.

صاف و اسیدیته آن‌ها با استفاده از pH متر و شوری به وسیله هدایت سنج اندازه‌گیری شد. مواد آلی (OM) با روش خشک کردن بوسیله آون الکتریکی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸ ساعت اندازه‌گیری شد و محتوای کربن کل (TOC) برابر با (OM/1.72) محتوای مواد آلی محاسبه شد [۴۹]. خاکستر (Ash) نمونه‌ها در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت در کوره الکتریکی قرار گرفتند و نمونه‌ها پس از سرد شدن در داخل دسیکاتور، با دقت ۰.۱ میلی‌گرم توزین شدند. سپس با محاسبه درصد خاکستر با استفاده از وزن ابتدایی و وزن نهایی، تعیین گردید. عملکرد بیوپار، سطح ویژه، تبادل کاتیونی، کلسیم و منیزیم با روش تیتراسیون، نیتروژن با روش کج‌لدال [۲۵] اندازه‌گیری و در جدول (۱) ارائه داده شده است. گروه عاملی موجود در بیوپارهای تولید شده با استفاده از دستگاه طیف سنجی مادون قرمز در محدوده طول موج ۴۰۰۰-۴۰۰ cm⁻¹ تعیین شد [۴۴]. براساس فاکتورهای طیف سنجی مادون قرمز، سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، بیوپار با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برای انجام آزمایش دوم انتخاب شد.

طراحی آزمایش و جمع‌آوری نمونه: در آزمایش دوم، تأثیر بیوپار با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و سطح ۸ گرم در کیلوگرم بر کاهش آلودگی ناشی از فلز سنگین کادمیوم با سطح ۰/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، در روزهای صفر، پانزده و سی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا، خاک همراه با فلز کادمیوم درون پلاستیک قرار داده شد و به مدت ۱۵ روز آبیاری و مخلوط شد. در این مدت خاک ضمن آبیاری با آب‌فشان، یک روز در میان با زیر و رو شدن، به هم خورده تا آنکوبه و پایدار شود. سپس، خاک‌های آلوده به همراه بیوپار در گلدان‌ها سایز ۱۲ با

نتایج

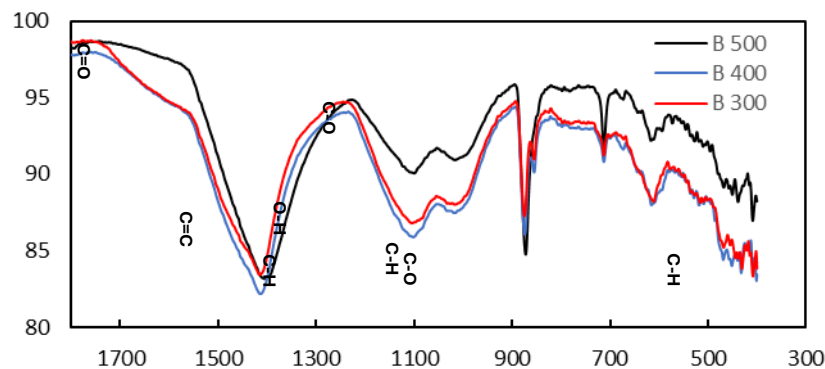
خواص فیزیکیو شیمیایی بیوپار: داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکیوشیمیایی بیوپارهای تولیدی نشان داد که با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، ماده آلی در ماکروجلبک *Padina australis* Hauck بطور تدریجی در محیط دمای بالا تجزیه و منجر به کاهش چشمگیری در بازده ماکروجلبک *Padina australis* Hauck از ۷۰/۸۵ به ۴۲ درصد شد بطوریکه میزان بازده B۳۰۰، B۴۰۰ و B۵۰۰ بترتیب ۷۰/۱۶، ۶۶/۳۶ و ۴۲ درصد مشاهده شده است جدول (۱). براساس آنالیزهای مورد مطالعه حاضر، در مقایسه با میزان خاکستر ماکروجلبک *Padina australis* Hauck ۴۰/۲۱ با روند افزایش دمای پیرولیز محتوای خاکستر افزایش می‌یابد. بطوریکه بیشترین مقدار آن در دمای ۵۰۰ درجه سانتی-گراد، ۶۲/۸۲۵ درصد و کمترین میزان آن در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۵۳/۷ درصد نسبت به ماده اولیه بیوپار مشاهده شد. همچنین در پژوهش حاضر نشان داد میزان اسیدیته ماکروجلبک *Padina australis* Hauck ۸/۱ و قلیایی ست افزایش دما باعث قلیائیت بیشتر بیوپار شده است بطوریکه میزان اسیدیته B۳۰۰، B۴۰۰ و B۵۰۰ بترتیب ۸/۷۵، ۹/۱۹ و ۱۰/۱ می‌باشد و همچنین هدایت الکتریکی B۳۰۰، B۴۰۰ و B۵۰۰ بترتیب ۳/۱۸، ۳/۸۳ و ۵/۵ میلی‌زمینس بر متر با افزایش دمای پیرولیز نسبت به مواد اولیه تشکیل دهنده بیوپار افزایش یافت. درصد کل منیزیم و پتاسیم به تدریج در بیوپار با افزایش دما افزایش یافت. براساس نتایج مقدار کربن در ماکروجلبک قهوه‌ای *Padina australis* Hauck ۱/۸۷ درصد بدست آمد و با

روند افزایش دمای پیرولیز میزان کربن، B۳۰۰، B۴۰۰ و B۵۰۰ بترتیب با مقادیر ۱۹/۳۳، ۲۱/۱۲، ۲۳/۰۵ درصد افزایش یافت. در نتیجه مقدار کربن در بیوپار تولید شده در بیشترین دما بیش از ۱۰۰۰ درصد نسبت به ماده اولیه بوده محاسبه گردید. همچنین سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بیوپار با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بترتیب ۲۰/۰۱، ۷۰/۲۹۰، ۱۲۰/۳۴ متر مربع بر گرم و ۱۲/۸۶، ۱۹/۷۷ و ۲۱/۶۰ درصد افزایش یافت جدول (۱).

طیف سنجی مادون قرمز: نتایج طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR) نشان داد که افزایش دمای پیرولیز منجر به کاهش برخی از گروه‌های عاملی موجود در بیوپار می‌شود (شکل ۱). این کاهش به وضوح در ارتعاشات کششی O-H ($2700-2300\text{ cm}^{-1}$)، ارتعاشات کششی C=O ($1770-1650\text{ cm}^{-1}$) و در ارتعاشات کششی C-H ($1480-1420\text{ cm}^{-1}$) مشاهده شد. مشخصه پیک‌ها براساس مطالعه قبلی (۳۵) O-H ارتعاش هیدروکسی ($3200-3700$)، C-H ساختار زنجیره چربی ارتعاش کششی ($2700-3000$)، C=O گروه کربونیل ارتعاش کششی ($1650-1770$)، C=C ارتعاش کششی ساختار معطر ($1600-1450$)، C-H ساختار آلیفاتیک ($1420-1480$)، O-H/C-H آلکیدها، اسیدها، فنل‌ها و الکل ($1360-1430$)، C-O ارتعاش کششی اتر غیر اشباع ($1300-1200$)، C-H ساختارهای آروماتیک ($1200-1440$)، C-O سطح سه هیدروکسی ($1160-1050$)، آلفین‌های ارتعاشی C-H و آروماتیک ($652-100$) توصیف شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی-شیمیایی بیوپچار و خاک

پارامترها	واحد	خاک	پادینا آسترالیز	بیوپچار ۳۰۰	بیوپچار ۴۰۰	بیوپچار ۵۰۰
بازده بیوپچار	(%)	-	۷۰/۸۵۰±۲۰۴	۷۰/۰۱۶۰±۰۹۸۶	۶۶/۳۶±۰/۴	۴۲±۰/۲۸
(ASH) خاکستر	(%)	-	۴۰/۲۱±۰/۰۸	۵۳/۷۰±۰/۲۳۴	۵۸۰/۲۸۵±۰/۲۸۱	۶۲/۸۵۲±۰/۹۲۱
(pH) اسیدیته	(H ₂ O)	۷/۸۶۰±۰/۳۲	۸/۱±۰/۰۱۸۵	۸/۷۵۰±۰/۲۱۵	۹/۱۹۰±۰/۴۰۱	۱۰/۱۰±۰/۰۱۸
(EC) هدایت الکتریکی	(dS m ⁻¹)	۲/۱±۰/۲۰۶	۱/۵±۰/۲۱	۳/۱۳±۰/۱۸۰	۳/۸۳۰±۰/۰۰۸	۵/۵۰±۰/۰۰۲
(C) کربن	(%)	۰/۳۵۰±۰/۰۰۲	۱/۸۷±۰/۲۸۲	۱۹/۳۰±۰/۳۰۲	۲۱/۱۲۰±۰/۱۴۲	۲۳/۰۵±۰/۱۰۲
(OM) مواد آلی	(%)	۸/۵۲±۰/۱۲	۱۰/۱۹±۰/۰۰۸	۱۳/۸۴±۰/۳۰۸	۱۴/۵۸±۰/۱۲۱	۱۶/۷۰±۰/۲۰۸
(N) نیتروژن	(%)	۰/۰۳±۰/۰۸۲	۱/۸۷±۰/۲۶۲	۲/۲۸±۰/۱۹۶	۲/۰۶±۰/۰۸۵	۱/۸۶±۰/۱۹۲
(Ca) کلسیم	(mgkg ⁻¹)	۶/۲۰±۰/۱۷۲	۹/۷۹۰±۰/۰۷۲	۹/۶۴۰±۰/۱۱۲	۱۰/۷۰±۰/۰۴۲	۱۳/۹۱±۰/۳۰۲
(Mg) منیزیم	(mgkg ⁻¹)	۷/۵۰±۰/۰۰۲	۲/۰۳±۰/۲۵۰	۲/۸۵±۰/۰۰۷	۳/۱۰±۰/۳۰۴	۳/۴۵۰±۰/۰۰۷
(P) فسفر	(mgkg ⁻¹)	۶/۲۰±۰/۰۰۵	۰/۱۰±۰/۳۲۵	۰/۱۶۲۴۰±۰/۰۰۹	۰/۱۸۱۰±۰/۳۱۲	۰/۲۸۱۶±۰/۴۹
(K) پتاسیم	(mgkg ⁻¹)	۱۲/۱۱±۰/۰۸۳	۶/۳۳±۰/۲۵۱	۸/۵۰±۰/۰۹۶	۱۰/۳۴±۰/۰۷۳	۱۲/۱۰±۰/۱۸۲
سطح ویژه	(m ² g ⁻¹)	-	-	۲۰/۰۱۰±۰/۲۳۹	۷۰/۲۹۰±۰/۳۱۴	۱۲۰/۳۴۰±۰/۳۵۲
ظرفیت تبادل کاتیونی	(%)	-	-	۱۲/۸۶±۰/۰۸۲	۱۹/۷۷±۰/۰۵۹	۱۲/۶۰±۰/۰۱۲



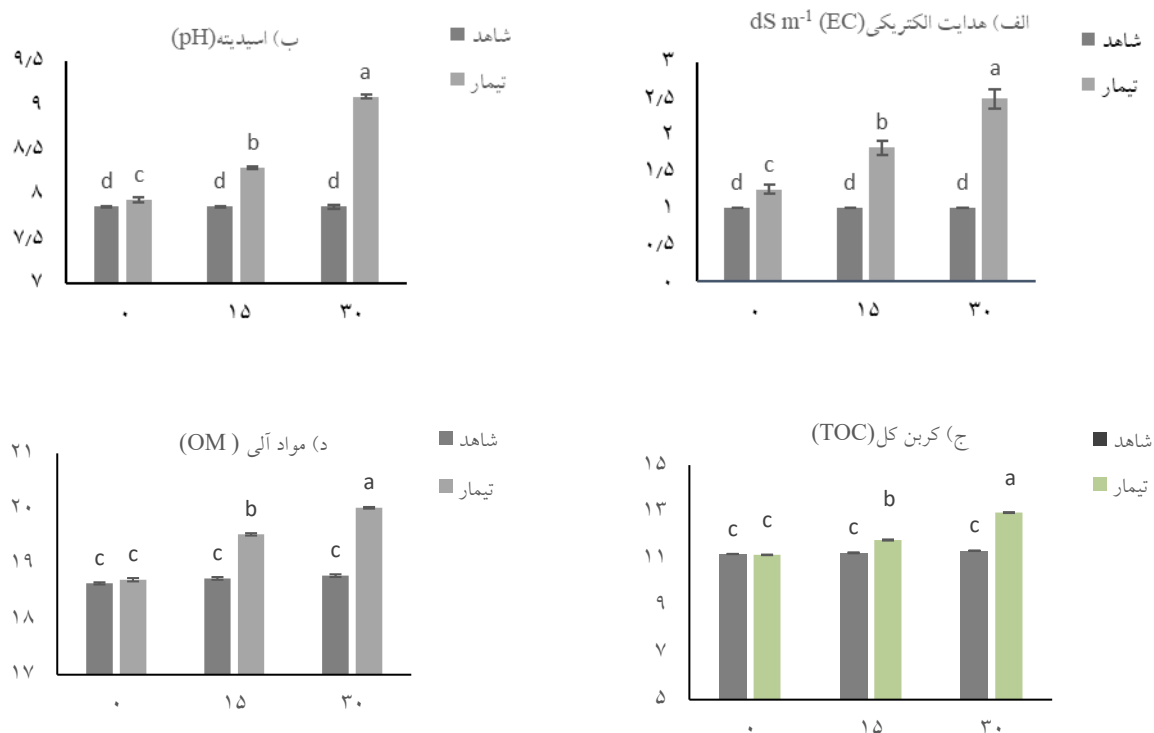
شکل ۱. طیف مادون قرمز بیوپچار در سه دمای متفاوت

اثر بیوپچار بر روی خواص فیزیکی-شیمیایی خاک:

بطور کلی، با افزودن بیوپچار B۵۰۰ به خاک، مقادیر اسیدیته، هدایت الکتریکی، مواد آلی و کربن کل بطور قابل توجهی تغییر کردند شکل (۲). بالاترین مقدار اسیدیته در روز سی و پایین‌ترین آن در روز صفر -

بترتیب ۸/۱، ۷/۴۰ - مشاهده شد. هدایت الکتریکی خاک در روزهای پانزده و سی بترتیب ۱/۸۳، ۲/۵ میلی زمینس در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. در مقایسه با خاک اصلاح نشده، خاک اصلاح شده محتوای مواد آلی در روز صفر ۱۸/۷۰ و در روز سی ۲۰ درصد،

کربن کل در روز صفر کاهش ۱۱/۱۵ و در روزهای پانزده ۱۱/۸ و سی ۱۲/۹ درصد افزایش یافت.



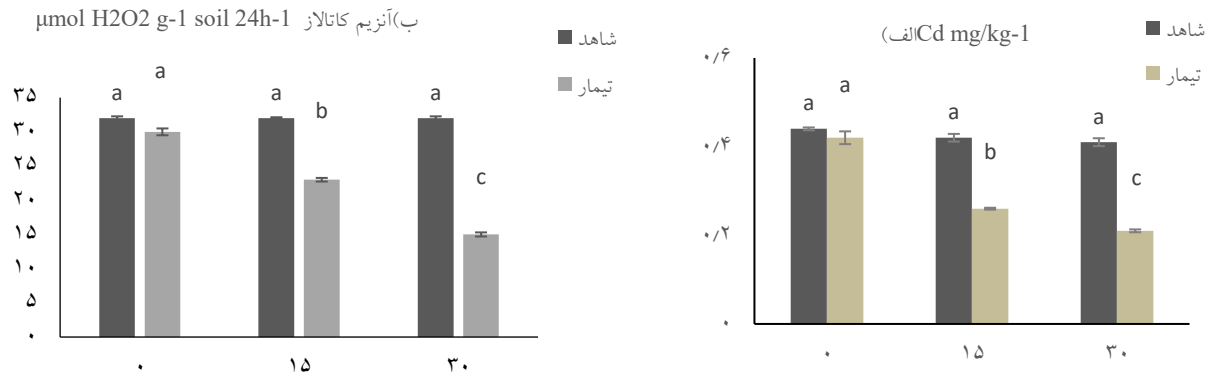
شکل ۲. اثر بیوچار بر الف) هدایت الکتریکی، ب) میزان اسیدیته، ج) کربن کل و د) مواد آلی خاک در روزهای صفر، پانزده و سی. حرف مشابه در

شکل نشان‌دهنده عدم معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد

در خاک در روزهای صفر، پانزده و سی نشان داد که اثر این تیمارها به کاهش معنی‌دار کادمیوم منتج شده است شکل (۳). میزان کادمیوم در روز سی نسبت به شاهد، کاهش قابل توجهی داشت. همچنین تفاوت معنی‌داری میزان کادمیوم بین روزهای صفر، پانزده و سی مشاهده شد بدین صورت که میزان این مقدار در روز صفر ۰/۴۴ ، در روز پانزده ، ۰/۲۶ و در روز سی ، ۰/۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم بوده است.

تاثیر بیوچار بر روی فعالیت آنزیمی کاتالاز: با افزودن بیوچار به خاک تفاوت معنی‌داری بین فعالیت آنزیمی کاتالاز در روزهای صفر، پانزده و سی نسبت به شاهد، مشاهده شد بطوریکه میزان فعالیت آنزیمی کاتالاز در روز صفر، ۳۰، در روز پانزده ، ۲۳ و در روز سی، ۱۵ میکرومول پراکسید هیدروژن بر گرم-ساعت بوده است.

اثرات بیوچار بر روی فلز سنگین کادمیوم: نتایج مربوط به تاثیر بیوچار بر کاهش آلاینده فلزی کادمیوم



شکل ۳. اثر بیوچار بر روی الف) کادمیوم و ب) فعالیت آنزیمی کاتالاز در روزهای صفر، پانزده و سی. حرف مشابه در شکل نشان‌دهنده‌ی عدم معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد

بحث

منیزیم، پتاسیم افزایش و بازده بیوچار کاهش یافت [۲۰]. همچنین طولی و همکاران (۱۳۹۵) اظهار کردند که با افزودن بیوچار و کمپوست حاصل از زباله‌های شهری باعث افزایش مقدار اسیدیت و هدایت الکتریکی خاک نسبت به ماده اولیه می‌شود [۱۰]. نتایج این تحقیق با مطالعات ذکر شده تطابق دارد. تغییر اسیدیت به دلیل حفظ محتوای فلز و خاکستر به بیوچار نسبت داده می‌شود و بنابراین اسیدیت به بیوچار باعث قلیائیت می‌شود [۱۰]. افزایش شوری خاک می‌تواند اثرات نامطلوبی بر گیاهان بگذارد و باعث کم شدن پتانسیل اسمزی محلول خاک در نتیجه استرس، اثرات یون خاص در نتیجه شوری و همچنین عدم تعادل مواد مغذی گردد [۲۳]. این پدیده می‌تواند به این دلیل باشد که، عناصر ذکر شده در اثر تبخیر از بین نمی‌روند [۳۸]. بنابراین، افزایش تدریجی مقادیر اسیدیت به دامای پیرولیز با افزایش این عناصر قلیائی همراه است جدول (۱). عامل مهم افزایش سطح ویژه، تخریب مواد آلی و تشکیل کانال‌هایی در بیوچار در طی فرآیند پیرولیز است [۵۲]. ژبائو و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که با افزایش دامای پیرولیز، پارامترهای اسیدیت، هدایت الکتریکی، خاکستر، محتوای کربن، سطح ویژه، منیزیم، افزایش می‌یابد درحالی‌که عملکرد بیوچار کاهش می‌پذیرد [۴۴].

خواص فیزیکیو شیمیایی بیوچار: ماکروجلبک‌های قهوه‌ای دریایی عمدتاً حاوی اسید آلژینیک، مانیتول، فوکیدان و سلولز می‌باشند که می‌توانند در دامای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه شوند. بنابراین، کاهش قابل توجه در بازده بیوچار را می‌توان عمدتاً به تخریب سلولز و تجزیه ترکیباتی مانند اسید آلژینیک و دهیدراته شدن گروه‌های هیدروکسیل نسبت داد [۵]. آستون و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند با افزایش دامای پیرولیز بازده بیوچار به مقدار زیادی کاهش می‌یابد [۶]. می‌توان گفت این شاخص یکی از مهمترین ویژگی‌ها در بررسی صرفه اقتصادی تولید این ماده بعنوان یک محصول کاربردی است، بطوریکه هرچه مقداردا بیشتر باشد صرفه اقتصادی آن در تولید بیوچار از مواد آلی بیشتر است. نتایج مطالعه آنا و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان داد که بیشترین میزان خاکستر در دامای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین میزان خاکستر در دامای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است [۵۱]. بطور کلی می‌توان گفت افزایش میزان خاکستر، به دلیل ماده معدنی تشکیل دهنده خاکستر در بیوچار پس از کربنیزاسیون است [۳۰]. حسین و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعات خود نشان دادند که با افزایش دامای پیرولیز، اسیدیت، هدایت الکتریکی،

همچنین نتایج مشابهی در مطالعات صورت گرفته توسط ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش شده است [۵۴].

طیف مادون قرمز: این پیوند نشان دهنده ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل است و نشان می‌دهد که گروه‌های OH آلی در دماهای بالا بسیار ناپایدار هستند [۲۰]. زلفی باواریانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که افزایش دمای پیرولیز باعث کاهش گروه‌های عاملی موجود در بیوپچار می‌شود [۵۳]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که نفت خام زیستی و بیوپچار می‌توانند از ماکروجلبک از طریق تجزیه در اثر حرارت تولید شوند. فاروبی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از جلبک *Sargassum sp.* و همچنین ورما و همکاران (۲۰۲۱) *Ulva lactuca* به تولید بیوپچار پرداختند و مشاهده کردند که سوخت زیستی و بیوپچار تولید شده در اثر درجه حرارت بالا دارای کیفیت بالا و خصوصیات فیزیکیوشیمیایی مناسبی را دارند [۱۷-۴۸]. نتایج حاصل از این پژوهش مشابه مطالعات ذکر شده بوده است. بیوپچار تولید شده از *Padina australi* Hauck بیشترین کیفیت از نظر خصوصیات فیزیکیوشیمیایی، بازده و حذف آلودگی از خود نشان داده است. تا کنون هیچ مطالعات دقیقی در مورد بیوپچار تولید شده از این جلبک در اثر حرارت بالا انجام نشده است. این جلبک دارای مقدار زیادی کربن، مواد مغذی حیاتی، و ترکیبات خاصی مانند فوکوئیدان و آلژینات است که به کیفیت بالای بیوپچار کمک می‌کند و معمولاً با نرخ رشد سریع و در فراوانی در مناطق دریایی یافت می‌شوند، که منجر به تأمین مستمر مواد اولیه برای تولید بیوپچار می‌شوند [۴۸].

اثر بیوپچار بر روی خواص فیزیکیوشیمیایی خاک: مطالعات قبلی نشان داد که بیوپچار B۵۰۰، اسیدیته خاک را افزایش داد و در برخی مطالعات کاهش اسیدیته

خاک نیز گزارش شده است [۱۵-۲۹، ۳۵]. پایین بودن اسیدیته با افزودن بیوپچار در روز صفر، به گروه‌های عاملی دارای بار منفی شامل گروه‌های فنولیک، هیدروکسیل و کربوکسیل روی سطح بیوپچار با یون‌های H^+ در خاک ترکیب می‌شوند و به افزایش اسیدیته خاک کمک می‌کنند [۱۹]. پژوهش ما با مطالعات قبلی ایگلایوتانا و همکاران (۲۰۱۷) که نشان دادند بیوپچار هدایت الکتریکی خاک را افزایش می‌دهد، مشابه می‌باشد [۲۴]. افزایش محتوای مواد مغذی با افزودن بیوپچار می‌تواند منجر به افزایش هدایت الکتریکی در خاک شود. مطالعات قبلی نشان داد که کاهش هدایت الکتریکی خاک ممکن است با جذب میکروبی همراه باشد [۷]. همچنین تعداد قابل توجهی از مطالعات نشان دادند که بیوپچار، تاثیر مثبتی بر روی کربن کل دارد [۲۷-۵۱]. بیوپچار می‌تواند فرآیند و کیفیت خاک را با جذب انتخابی مواد آلی در سطح و منافذ افزایش و محتوای کربن کل را با ترویج پلیمریزاسیون مولکول‌های آلی کوچک از طریق فعالیت کاتالیزوری سطحی پس از جذب مولکول‌های آلی خاک بهبود ببخشد [۴۱].

تاثیر بیوپچار بر روی فعالیت آنزیمی کاتالاز: نتایج این پژوهش نشان داد که ماندگاری بالای بیوپچار در خاک باعث کاهش میزان فعالیت آنزیمی کاتالاز می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج یانگ و همکاران (۲۰۱۶) که اظهار کردند ماندگاری بالای بیوپچار حاصل از برنج در خاک، باعث افزایش فعالیت آنزیمی کاتالاز، اسید فسفاتاز و اوره آز در خاک می‌شود [۴۶]، تناقض دارد و با نتایج ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) که بیان کردند افزودن بیوپچار به خاک و ماندگاری بالای آن در خاک باعث کاهش فعالیت آنزیمی می‌شود [۴۷]. کاهش فعالیت آنزیمی خاک ناشی از بیوپچار ممکن است به دلایل مختلفی نسبت داده شود. افزودن بیوپچار بطور مستقیم،

باعث آسیب میکروارگانیسم‌هایی که در تولید آنزیم‌ها نقش دارند، می‌شود [۲۳]. علاوه بر این، سطح ویژه بالا و مواد متخلخل ممکن است بسترها را برای کاهش سرعت تخریب غیر قابل استفاده کند [۲۹]. بیوپار می‌توانند بطور قابل توجهی میزان اسیدیته خاک را افزایش دهد، درحالی که میزان اسیدیته بر پایداری و فعالیت آنزیم‌های خاک تاثیر می‌گذارد. همچنین تغییرات غلظت فلزات سنگین توسط بیوپار نیز می‌تواند بر فعالیت آنزیم خاک تاثیر بگذارد [۴۲].

اثرات بیوپار بر روی فلز سنگین کادمیوم: در پژوهش حاضر مشاهده شد که اثر بیوپار بر روی کاهش فلز سنگین در روز ۳۰ بیشتر از روز صفر بوده‌است. بدین صورت مقدار کادمیوم در روز ۳۰، ۰/۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم و در روز صفر ۰/۴ بوده‌است. هو و همکاران (۲۰۲۲) تاثیر بیوپارهای تولید شده از کاه ذرت و گندم در دمای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بر روی فلز جیوه، کادمیوم و سرب مورد سنجش قرار دادند و بیان کردند که دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد سرعت جذب بالاتر و ظرفیت جذب قوی نسبت به سایر دماها دارد [۲۲] که این نتایج با نتایج این پژوهش که بیان کرده‌است بیوپار با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش فلز سنگین می‌شود در تناقض است ولی ماندگاری بیوپار حاصله در خاک باعث کاهش فلز سنگین می‌شود مشابه نتایج این پژوهش می‌باشد. عیسی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی اثر جلبک *Padina pavonica* بعنوان پایشگر زیستی پرداخته‌اند و نتایج پژوهش نشان داد که این جلبک تنها در پایش زیستی فلز جیوه می‌توان استفاده کرد و در پایش زیستی کادمیوم اثر چندانی مشاهده نشده است [۱] در حالی که نتایج این تحقیق نشان داد می‌توان از جلبک مورد مطالعه برای پایش زیستی کادمیوم استفاده کرد. همچنین این نتایج با

برخی از مطالعات گذشته بوده مشابه است. ژو و همکاران (۲۰۱۳) اظهار کردند که بیوپار حاصل از کود دامی تاثیر مثبتی بر روی کاهش میزان سرب، روی و کادمیوم در محلول‌های آبی آلوده به فلزات سنگین می‌گذارد [۴۳]. پو و همکاران (۲۰۱۸) نیز به کاهش اثرات فلزات سنگین توسط بیوپار حاصله از ماکروجلبک‌ها اشاره کردند [۳۳]. گروه‌های عاملی اکسیژن دار مانند کربوکسیل (COOH)، هیدروکسیل (OH) و فلنیک، می‌توانند بطور موثری عناصر آلاینده را جذب کنند. مهار فلزات سنگین ممکن است تا حدی به اثر مستقیم اسیدیته بالا نسبت داده شود، بدین گونه که تثبیت کاتیون‌های فلزی را از طریق برهمکنش‌های الکترواستاتیک بین گروه‌های عاملی سطحی بیوپار و فلزات سنگین را تسهیل می‌کند. گروه‌های عاملی اکسیژن دار می‌توانند روی سطح بیوپار با فلزات سنگین، کمپلکس ایجاد کنند [۲۶]. تبادل کاتیونی یکی از مکانیزم‌های جذب فلزات سنگین است که در آن یون‌های فلزی به جای یون‌های کاتیونی موجود در خاک یا سایر محیط‌های زیستی جذب می‌شوند. ماکروجلبک‌های دریایی، اگرچه غنی از مواد مغذی هستند، ارتباط مستقیمی با جذب فلزات سنگین ندارند. آن‌ها می‌توانند فلزات سنگین را از آب جذب کنند، اما این جذب بدلیل تبادل کاتیونی نیست. به جای آن، جذب فلزات سنگین توسط ماکروجلبک‌ها بدلیل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی آن‌ها اتفاق می‌افتد [۳۳].

نتیجه‌گیری

بیوپار بعنوان یک عامل موثر در جذب آلاینده‌ها شناخته شده است. تبادل کاتیونی نیز می‌تواند یکی از مکانیزم‌های جذب فلز سنگین باشد. استفاده از ماکروجلبک‌های دریایی بعنوان بیوپار می‌تواند روشی بهینه برای جذب فلزات سنگین باشد. در این پژوهش، تأثیر دمای پیرولیز بر خواص و قابلیت بیوپار حاصله از

زیست محیطی، تولید آن با استفاده از پیرولیز در دماهای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است. استفاده از ماکرو جلبک‌های دریایی بعنوان بیوچار می‌تواند روشی بهینه برای بازیافت این جلبک‌ها باشد و همچنین نشان داده شده است که استفاده از ماکرو جلبک‌های دریایی بعنوان جاذب فلزات سنگین، از نظر بازیافت منابع و بهره‌وری انرژی مناسب است. تضاد منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

سپاسگزاری

از دانشگاه هرمزگان به خاطر در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی قدردانی می‌شود.

amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi journal of biological sciences*, 22(4), pp.503-511.

- Anastasakis, K., Ross, A.B. and Jones, J.M., 2011. Pyrolysis behaviour of the main carbohydrates of brown macro-algae. *Fuel*, 90(2), pp.598-607.
- Aston, S., Doerr, S., and Street-perrott, A., 2013. The impacts of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar properties and the effects of biochar application on the properties of a sandy loam. In EGU General Assembly Conference Abstracts pp. EGU2013-11083.
- Beesley, L., Inneh, O.S., Norton, G.J., Moreno-Jimenez, E., Pardo, T., Clemente, R. and Dawson, J.J., 2014. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil. *Environmental Pollution*, 186, pp.195-202.
- Bird, M.I., Wurster, C.M., de Paula Silva, P.H., Paul, N.A. and De Nys, R., 2012. Algal biochar: effects and applications. *Gcb Bioenergy*, 4(1), pp.61-69.
- Bouyoucos, G. J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54, 464-465.
- Chen, T., Zhang, Y., Wang, H., Lu, W., Zhou, Z., Zhang, Y. and Ren, L., 2014. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource technology*, 164, pp.47-54.

ماکرو جلبک قهوه‌ای *Padina australis* Hauck دریایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار بطور قابل توجهی تحت تأثیر افزایش دمای پیرولیز قرار می‌گیرند و دمای بالاتر، اثر مثبتی بر روی خواص بیوچار دارد. افزودن بیوچار به خاک، باعث تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود و بعنوان یک عامل بهبوددهنده محتوای کربن، مواد آلی، فعالیت بیولوژیکی و اسیدیته عمل می‌کند و همچنین باعث کاهش قابل توجه فلز سنگین کادمیوم در خاک می‌شود. بر اساس این مطالعه، برای کاربرد بیوچار ماکرو جلبک قهوه‌ای *Padina australis* Hauck در کشاورزی و بهبود ویژگی‌های

فهرست منابع

- عیسی‌نژاد، ز.، امینی، ف.، سخانی، ن.، غانمی، ک.، و شادی، ا. ۱۳۹۹. استفاده از جلبک *Padina pavonica* بعنوان پایشگر زیستی فلزات سنگین در رسوبات منطقه بین جزرومدی سواحل بوشهر، خلیج فارس. *اکیانوس شناسی*. ۱۱ (۴۱): ۱۳۷-۱۲۷
- طوبلی، ع.، جهانتاب، ا.، جعفری، م.، متشعزاده، ب.، و ضرغام، ن. ۱۳۹۷. پالایش خاک‌های آلوده به فلز سنگین سرب بوسیله گیاهان مرتعی در شریط گلخانه‌ای. *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، دوره ۳۱، شماره ۳، آذر ۱۳۹۷، صفحه ۶۷۵-۶۶۳
- مولایی، ح.، و فرهادیان، ا. ۱۳۹۹. پتانسیل استفاده از بیوچار جلبک‌های ماکروسکوپی *Enteromorpha compressa* و *Ulva lactuca* در بهبود کیفیت آب و خاک. *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، دوره ۳۳، شماره ۱، صفحه ۲۰۴-۱۹۷
- Al-Wabel, M.I., Usman, A.R., El-Naggar, A.H., Aly, A.A., Ibrahim, H.M., Elmaghraby, S. and Al-Omran, A., 2015. *Conocarpus* biochar as a soil

21. Haider, F.U., Wang, X., Farooq, M., Hussain, S., Cheema, S.A., Ul Ain, N., Virk, A.L., Ejaz, M., Janyshova, U. and Liqun, C., 2022. Biochar application for the remediation of trace metals in contaminated soils: Implications for stress tolerance and crop production. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 230, p.113165.
22. Hu, X., Zhang, R., Xia, B., Ying, R., Hu, Z., Tao, X., Yu, H., Xiao, F., Chu, Q., Chen, H. and Qian, J., 2022. Effect of Pyrolysis Temperature on Removal Efficiency and Mechanisms of Hg (II), Cd (II), and Pb (II) by Maize Straw Biochar. *Sustainability*, 14(15), p.9022.
23. Huang, D., Liu, L., Zeng, G., Xu, P., Huang, C., Deng, L., Wang, R. and Wan, J., 2017. The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal-contaminated sediment. *Chemosphere*, 174, pp.545-553.
24. Igalavithana, A. D., Lee, S.-E., Lee, Y. H., Tsang, D. C., Rinklebe, J., Kwon, E. E. and Ok, Y. S., 2017. Heavy metal immobilization and microbial community abundance by vegetable waste and pine cone biochar of agricultural soils. *Chemosphere*, 174, 593-603.
25. Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W. and Zimmerman, A.R., 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource technology*, 101(22), pp.8868-8872.
26. Jia, W., Wang, B., Wang, C. and Sun, H., 2017. Tourmaline and biochar for the remediation of acid soil polluted with heavy metals. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(3), pp.2107-2114.
27. Khanmohammadi, Z., Afyuni, M. and Mosaddeghi, M.R., 2015. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management & Research*, 33(3), pp.275-283.
28. Kwak, J.H., Islam, M.S., Wang, S., Messele, S.A., Naeth, M.A., El-Din, M.G. and Chang, S.X., 2019. Biochar properties and lead (II) adsorption capacity depend on feedstock type, pyrolysis temperature, and steam activation. *Chemosphere*, 231, pp.393-404.
29. Liang, J., Yang, Z., Tang, L., Zeng, G., Yu, M., Li, X., Wu, H., Qian, Y., Li, X. and Luo, Y., 2017. Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated wetland soil remediated with combined biochar-compost. *Chemosphere*, 181, pp.281-288.
30. Liang, S., Han, Y., Wei, L. and McDonald, A.G., 2015. Production and characterization of bio-oil and bio-char from pyrolysis of potato peel wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 5, pp.237-246.
11. Cimò, G., Kucerik, J., Berns, A.E., Schaumann, G.E., Alonzo, G. and Conte, P., 2014. Effect of heating time and temperature on the chemical characteristics of biochar from poultry manure. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(8), pp.1912-1918.
12. Dai, Y., Liang, Y., Xu, X., Zhao, L. and Cao, X., 2018. An integrated approach for simultaneous immobilization of lead in both contaminated soil and groundwater: Laboratory test and numerical modeling. *Journal of hazardous materials*, 342, pp.107-113.
13. Dazy, M., Jung, V., Férard, J.F. and Masfaraud, J.F., 2008. Ecological recovery of vegetation on a coke-factory soil: role of plant antioxidant enzymes and possible implications in site restoration. *Chemosphere*, 74(1), pp.57-63.
14. Del Martínez-Ballesta, M.C., Silva, C., López-Berenguer, C., Cabanero, F.J. and Carvajal, M.J.P.B., 2006. Plant aquaporins: new perspectives on water and nutrient uptake in saline environment. *Plant Biology*, pp.535-546.
15. Elzobair, K.A., Stromberger, M.E., Ippolito, J.A. and Lentz, R.D., 2016. Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere*, 142, pp.145-152.
16. Farobie, O. and Ernowati, L., 2023. Slow-pyrolysis of brown macroalgae *Padina* sp.: Product characterization and degradation kinetic mechanism.
17. Farobie, O., Syaftika, N., Hartulistiyoso, E., Amrullah, A., Bayu, A., Moheimani, N.R., Matsumura, Y. and Karnjanakom, S., 2022, June. The potential of sustainable biogas production from macroalgae in Indonesia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1038, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
18. Feng, W., Zhang, S., Zhong, Q., Wang, G., Pan, X., Xu, X., Zhou, W., Li, T., Luo, L. and Zhang, Y., 2020. Soil washing remediation of heavy metal from contaminated soil with EDTMP and PAA: Properties, optimization, and risk assessment. *Journal of hazardous materials*, 381, p.120997.
19. Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V. and Deng, H., 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, pp.46-59.
20. Hossain, M.K., Strezov, V., Chan, K.Y., Ziolkowski, A. and Nelson, P.F., 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of environmental management*, 92(1), pp.223-228.

- A., 2020. Physicochemical features, metal availability and enzyme activity in heavy metal-polluted soil remediated by biochar and compost. *Science of the Total Environment*, 701, p.134751.
43. Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Wang, H., Yu, H. and Gao, B., 2013. Removal of Cu, Zn, and Cd from aqueous solutions by the dairy manure-derived biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, pp.358-368.
44. Xiao, Y., Xue, Y., Gao, F. and Mosa, A., 2017. Sorption of heavy metal ions onto crayfish shell biochar: effect of pyrolysis temperature, pH and ionic strength. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 80, pp.114-121.
45. Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B. & Wu, C., 2019. Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of the total environment*, 659, 473-490.
46. Yang, J., Yang, F., Yang, Y., Xing, G., Deng, C., Shen, Y., ... & Yuan, H. (2016). A proposal of "core enzyme" bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis. *Environmental Pollution*, 213, 760-769.
47. Yuan, C., Gao, B., Peng, Y., Gao, X., Fan, B. and Chen, Q., 2021. A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties. *Science of the Total Environment*, 756, p.144058.
48. R. Verma, S.K. Verma, V. Verma, S. Verma, Y. Vaishnav, V. Jena, A. Kumar, K.P. Rakesh, Catalytic pyrolysis of ulva lactuca macroalgae: effects of mono and bimetallic catalysts and reaction parameters on bio-oil up-gradation, *Bioresour. Technol.* 324 (2021), 124594,
49. Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Yu, M., Yu, Z., Li, H., Yu, Y. and Huang, H., 2011. Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. *Bioresource technology*, 102(3), pp.2950-2956.
50. Zhang, X., Wang, H., He, L., Lu, K., Sarmah, A., Li, J., Bolan, N.S., Pei, J. and Huang, H., 2013. Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, pp.8472-8483.
51. Zielińska, A., Oleszczuk, P., Charnas, B., Skubiszewska-Zięba, J., & Pasieczna-Patkowska, S. (2015). Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, 201-213.
52. Zhao, S.X., Ta, N. and Wang, X.D., 2017. Effect of temperature on the structural and
31. Loeppert, R.H. and Suarez, D.L., 1996. Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, pp.437-474.
32. Peng, X., Deng, Y., Peng, Y. and Yue, K., 2018. Effects of biochar addition on toxic element concentrations in plants: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 616, pp.970-977.
33. Poo, K.M., Son, E.B., Chang, J.S., Ren, X., Choi, Y.J. and Chae, K.J., 2018. Biochars derived from wasted marine macro-algae (*Saccharina japonica* and *Sargassum fusiforme*) and their potential for heavy metal removal in aqueous solution. *Journal of environmental management*, 206, pp.364-372.
34. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A.R. and Lehmann, J., 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48, pp.271-284.
35. Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M.F., Ibrahim, M., Zia-ur-Rehman, M., Abbas, T. and Ok, Y.S., 2016. Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, pp.2230-2248.
36. Shao, H.-B., Li, H., Shao, M.-A. & Du, S., 2009. Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite. *Journal of hazardous materials*, 170, 1-6.
37. Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M. and Dumat, C., 2015. Heavy metal stress and crop productivity. *Crop production and global environmental issues*, pp.1-25.
38. Shen, Z., Fan, X., Hou, D., Jin, F., O'Connor, D., Tsang, D.C., Ok, Y.S. and Alessi, D.S., 2019. Risk evaluation of biochars produced from Cd-contaminated rice straw and optimization of its production for Cd removal. *Chemosphere*, 233, pp.149-156.
39. Shetty, R. and Prakash, N.B., 2020. Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Scientific Reports*, 10(1), p.12249.
40. Shi, W.-Y., Shao, H.-B., Li, H., Shao, M.-A. & Du, S., 2009. Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite. *Journal of hazardous materials*, 170, 1-6.
41. Song, D., Xi, X., Zheng, Q., Liang, G., Zhou, W. and Wang, X., 2019. Soil nutrient and microbial activity responses to two years after maize straw biochar application in a calcareous soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 180, pp.348-356.
42. Tang, J., Zhang, L., Zhang, J., Ren, L., Zhou, Y., Zheng, Y., Luo, L., Yang, Y., Huang, H. and Chen,

54. Zhang, G., Liu, N., Luo, Y., Zhang, H., Su, L., Oh, K. & Cheng, H., 2020. Efficient removal of Cu (II), Zn (II), and Cd (II) from aqueous solutions by a mineral-rich biochar derived from a spent mushroom (*Agaricus bisporus*) substrate. *Materials*, 14, 35.

physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies*, 10(9), p.1293.

53. Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, A. and Ghasemi, R., 2019. Influence of pyrolysis temperatures on FTIR analysis, nutrient bioavailability, and agricultural use of poultry manure biochars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(4), pp.402-411.

Investigation of the Effect of Pyrolysis Temperature on the Quality of Biochar Derived from the Brown Macroalga *Padina australis* Hauck and Evaluation of Its Efficiency in Cadmium Removal

Maryam Soltani¹, Morteza Yousefzadi², Narges Amrollahi Biuki^{1, Musa} Keshavarz³, Abdolmajid Mirzaalian Dastjerdi¹

¹. Faculty of Marine Science and Technology, Hormozgan University

^{2,*} Physiology Department of Biology, Faculty of Science University of Qom, Qom, Iran.

³. Assistant Professor in the Faculty of Agriculture and Natural Resources, Hormozgan University.

*Corresponding Author Email: morteza110110@gmail.com

Abstract

Biochar is a substance that is rich in carbon and is commonly used to remove or reduce the activity of heavy metals. The ideal temperature, physicochemical characteristics, and impacts of soil amendments were examined in this study. The macroalgae *Padina australis* Hauck was used to make biochar at three different temperatures: 300, 400, and 500 degrees Celsius. The yield of biochar produced was 70.16%, 66.36%, and 42%, respectively, according to the data. The percentages of organic carbon were 19.33%, 21.12%, and 23.05%, respectively, and the acidity was 8.75, 9.19, and 10.1%. 3.18, 3.83, and 5.5 millisiemens per meter, respectively, were the electrical conductivities. Using 500 degrees Celsius, biochar was created and then applied to contaminated soil. Biochar 500 has an 8-gram level per kilogram and 4.0 milligrams of cadmium per kilogram. Were incorporated into the soil, followed by 0–15 and 30 days of incubation. The findings demonstrated that total carbon rose by 12%, organic matter by 20%, acidity by 1.8%, and electrical conductivity by 2.5 millisiemens per meter as the number of incubation days increased. With the addition of biochar 500, the soil's catalase enzyme activity peaked on day zero at 30 micromoles of hydrogen peroxide per gram-hour, and it peaked on day thirty at 15 micromoles of hydrogen peroxide per gram-hour. On day zero, the soil had 44.0 milligrams of cadmium per kilogram, and on day thirty, it had 21.0 milligrams. Thus, biochar produced at 500 degrees Celsius can deactivate cadmium metal, improve, and stabilize the physicochemical properties of soil.

Key words: Biochar, Heavy Metal, Brown Macro-algae *Padina australis* Hauc, Optimum temperature, Catalase