

## تأثیر دمای آتشکافت بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار تولیدی از

### ضایعات هرس درختان بارور پسته

مهدی کریمی<sup>1</sup>

استادیارپژوهش، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران: karimi\_nsrc@yahoo.com

دریافت: 99/11/27 و پذیرش: 1400/7/4

#### چکیده

تولید و مصرف بیوچار حاصل از ضایعات کشاورزی یکی از گزینه‌های افزایش کیفیت خاک و کاهش آلودگی محیط زیست معرفی شده است. در این پژوهش اثر چهار سطح دمای آتشکافت (350، 400، 450 و 500 درجه سلسیوس) بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار تولید شده از ضایعات هرس درختان بارور پسته بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که قابلیت هدایت الکتریکی، pH، غلظت عناصر غذایی پتاسیم، سدیم، و فسفر تا بیشترین دمای آتشکافت نسبت به کمترین دمای آتشکافت به ترتیب به میزان 32%، 27%، 27%، 25% و 29% افزایش یافت. روند افزایشی غلظت عناصر غذایی کلسیم، منیزیم و روی نیز با افزایش دمای آتشکافت تا 450 درجه سلسیوس مشاهده شد اما با افزایش بیشتر دمای آتشکافت به 500 درجه سلسیوس غلظت این عناصر تغییر معنی‌داری نداشت. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش دمای آتشکافت تا دمای 500 درجه سلسیوس موجب افزایش سطح ویژه و تخلخل بیوچار شد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که بیوچار حاصل از هرس سرشاخه‌های پسته یک منبع از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه بوده و می‌تواند برای اصلاح خاک و افزایش عملکرد در واحد سطح محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اسیدیته بیوچار، عناصر غذایی بیوچار، سطح ویژه بیوچار، هدایت الکتریکی بیوچار

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: یزد، بلوار آزادگان (فرودگاه)، خیابان نهالستان، مرکز ملی تحقیقات شوری.

## مقدمه

یکی از مشکلات بخش کشاورزی وجود ضایعات این بخش است که عموماً به نحو شایسته‌ای مدیریت نمی‌شوند (فروناتو و تورتا، 2019). یکی از انواع مواد آلی که عموماً در چرخه تولید قرار نگرفته، سرشاخه‌های درختان ناشی از هرس باغات می‌باشد. کشاورزان پس از خشک‌شدن سرشاخه‌ها و به منظور عدم توسعه آفات و بیماری‌های گیاهی نسبت به سوزاندن آنها اقدام می‌نمایند. سوزاندن سرشاخه‌ها موجب آلودگی محیط زیست و ورود گازهای مختلف از جمله گاز دی اکسید کربن به اتمسفر و گرم شدن کره زمین و تغییر اقلیم می‌شود (تی سای و همکاران، 2019). این مشکل در باغات به صورت جدی و روزافزونی وجود دارد (شیرانی و همکاران، 2010). از آنجا که سطح زیر کشت باغات در کشور حدود 2700000 هکتار می‌باشد طبیعتاً سالانه حجم قابل توجهی از مواد آلی تولید می‌شود که متأسفانه سوزانده می‌شود. لازم به ذکر است که حدود 30 درصد از محصولات کشاورزی به ضایعات تبدیل می‌شود. این میزان ضایعات نسبت به میزان استاندارد جهانی ضایعات کشاورزی (کمتر از 1 درصد) بسیار زیاد بوده و به معنی هدر رفتن مضاعف آب به عنوان یک سرمایه‌ی گران‌بها و در کنار آن از بین رفتن میزان بالای منابع انرژی، که در تولید فرآورده‌های کشاورزی صرف می‌شود، خواهد بود (شیرانی و همکاران، 2010).

کمیود ماده آلی خاک‌های کشاورزی از دیگر مشکلات اساسی کشور می‌باشد. لذا افزایش میزان مواد آلی خاک‌ها برای دستیابی به کشاورزی پایدار یک ضرورت است (بنایی و همکاران، 2005). در سال‌های اخیر توجه بسیاری از کشورها به مصرف بقایای کشاورزی نظیر بقایای نیشکر، برنج، گندم، ذرت و ... در اراضی کشاورزی معطوف شده است (معزی و همکاران، 1396). تولید و مصرف بیوچار به عنوان یکی از راهکارهای افزایش میزان ماده آلی خاک و همچنین اصلاح خصوصیات خاک در راستای پایداری

اکوسیستم‌های کشاورزی معرفی شده است (کیزیتو و همکاران، 2019 و ایسیک و آجیت، 2015). این تکنیک بویژه در مورد برخی از ضایعات کشاورزی نظیر سرشاخه‌های درختان که نگهداری آنها موجب شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی می‌شود نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد.

فرایند آتشکافت یا تولید بیوچار، یک فرایند گرمایی-شیمیایی است که در طی آن مواد آلی در شرایط دمای زیاد و حداقل اکسیژن به یک ترکیب جامد حاوی کربن زیاد به نام بیوچار یا زغال زیستی تبدیل می‌شود. این ترکیبات عموماً دارای ساختار آروماتیک و متخلخل می‌باشد که در محیط پایدار بوده و موجب افزایش مواد آلی خاک می‌شود (ایسیک و آجیت، 2015). مهمترین مزایای بیوچار نسبت به ماده خام اولیه، قابلیت حمل و نقل آسانتر و نداشتن تاثیر منفی بر گیاهان می‌باشد. عوامل زیادی بر کیفیت بیوچار تولیدی موثر هستند (سونگ و گو، 2012: کلاس و همکاران، 2012: کسکین و همکاران، 2019). مهمترین این عوامل عبارتند از ترکیب ماده خام اولیه، دما و مدت زمان فرایند آتشکافت. عالی پوربابادی و همکاران (1397) گزارش کردند که با افزایش دمای آتشکافت از 400 به 900 درجه سلسیوس ظرفیت تبادل کاتیونی باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و برگ کنوکارپوس کاهش یافت اما سطح ویژه و غلظت کل عناصر غذایی مورد نیاز گیاه نظیر، کلسیم، منیزیم، مس، روی، فسفر، آهن و پتاسیم آنها افزایش یافت. خان‌محمدی و همکاران (1394) نیز نشان دادند که با افزایش دمای آتشکافت از 300 به 400 و 500 درجه سلسیوس غلظت کل عناصر آهن، روی، فسفر، سدیم و پتاسیم موجود در بیوچار حاصل از باگاس نیشکر و بقایای پسته افزایش یافت. بنی‌طالی و همکاران (1396) نیز افزایش قابلیت هدایت الکتریکی، pH چگالی حقیقی و میزان خاکستر موجود در بیوچار حاصل از بقایای کاه گندم، شلتوک برنج، خاک اره، باگاس نیشکر و خوشه

نوع پسته احمدآقایی بود. سرشاخه‌ها توسط اره و تبر خرد شده و به قطعات حدود 40 سانتیمتری تبدیل شدند.

#### تولید بیوچار

به منظور ایجاد فضایی با حداقل اکسیژن، حدود دو ونیم کیلوگرم سرشاخه پسته به طول تقریبی چهل سانتیمتر در یک فویل آلومینیومی به طول یک متر و به عرض هفتاد سانتیمتر پیچیده شد و در دستگاه کوره الکتریکی (زلفی باوریانی و همکاران، 1395) در دماهای متفاوت (350، 400، 450 و 500 درجه سلسیوس) به مدت سه ساعت قرار داده شد. دمای کوره پس از چهل و پنج دقیقه از دمای محیط (حدود 30 درجه سلسیوس) به دمای دلخواه افزایش می‌یافت و حدود دو ساعت و پانزده دقیقه در دمای دلخواه بود. آهنگ رسیدن به دمای اصلی بسته به دمای دلخواه متفاوت بود و برای دماهای 350، 400، 450 و 500 درجه سلسیوس به ترتیب معادل 7، 8، 10 و 11 درجه سلسیوس بر دقیقه بود.

لازم به ذکر است که آزمون و خطای انجام شده در این پژوهش نشان داد که سرشاخه پسته در دمای 300 درجه سلسیوس و به مدت سه ساعت به بیوچار تبدیل نمی‌شود. پس از سه ساعت نسبت به خاموش کردن دستگاه اقدام و پس از سرد شدن کامل، بیوچار تولیدی از دستگاه خارج و نسبت به خرد کردن آنها به قطعات یک تا 3 سانتیمتری اقدام شد. ضرورت دارد نمونه‌ها پس از سرد شدن کامل کوره الکتریکی (عموماً پس از یک شبانه روز) از دستگاه خارج گردد. درغیراین صورت، نمونه به خاکستر تبدیل می‌شود. سپس نمونه‌ها با استفاده از آسیاب برقی، آسیاب شده و از الک 0/4 میلیمتری عبور داده شد و در یک ظرف درب دار پلاستیکی نگهداری شد. لازم به ذکر است که برای تعیین عملکرد بیوچار، وزن سرشاخه‌ها پیش و پس از ورود به دستگاه کوره الکتریکی تعیین شد.

#### تعیین ویژگی‌های بیوچارهای تولیدی

به منظور تعیین عملکرد بیوچار، نسبت وزن بیوچار تولیدی به وزن خالص ماده خشک اولیه محاسبه و در عدد صد ضرب شد. جهت تعیین میزان خاکستر، دو گرم

خرما با افزایش دمای آتشکافت از 300 به 500 درجه سلسیوس را گزارش نمودند.

اگرچه تحقیقات ارزشمندی در مورد اثر عوامل مختلف بر کیفیت بیوچار تولید شده از مواد اولیه خام نظیر باگاس نیشکر (خان‌محمدی و همکاران، 1394)، خاک اره و خوشه خرما (بنی‌طالبی و همکاران، 1396)، کود مرغی (زلفی باوریانی و همکاران، 1395) و ضایعات برداشت پسته (میری و زمانی بابگه‌ری، 1399) انجام شده است، لیکن پژوهشی که اثر دمای آتشکافت بر کیفیت بیوچار حاصل از سرشاخه‌های پسته انجام شده باشد توسط نگارندگان ملاحظه نشد. این در حالی است که سرشاخه‌های پسته یکی از منابع اولیه مواد آلی است که به دلیل نسبت کربن به نیتروژن بالا و خطر شیوع آفات و بیماریهای گیاهی توسط باغداران به سرعت سوزانده می‌شود. لذا این پژوهش در راستای تولید دانش فنی فراوری سرشاخه‌های پسته و امکان بهره‌گیری از آن به عنوان ماده اصلاح کننده خاک و بررسی تاثیر دما بر خصوصیات بیوچار حاصله، طراحی و اجرا شد. نظر به اینکه عموماً، بیوچارها حاوی مقادیر قابل توجهی کربن آلی و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه هستند لذا مصرف این مواد می‌تواند موجب افزایش میزان کربن آلی خاک و قابلیت جذب عناصر غذایی گردد.

#### مواد و روش‌ها

این پژوهش در سه مرحله و به شرح ذیل در مرکز ملی تحقیقات شوری انجام شد: در مرحله اول نسبت به جمع آوری و آماده‌سازی سرشاخه‌های پسته اقدام شد. سپس نسبت به تولید بیوچار و آماده‌سازی آنها اقدام شد. در مرحله آخر ویژگی‌های بیوچارهای تولیدی در سطح آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند.

#### جمع‌آوری و آماده‌سازی سرشاخه‌ها

سرشاخه‌ها از یک باغ پسته با سن حدود 17 سال واقع در چاه‌افضل اردکان یزد و در زمستان سال 1398 جمع‌آوری گردید. قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری باغ مذکور 8/5 دسی‌زیمنس بر متر و درختان آن از

ارتباط تیمارهای پژوهش با ویژگی‌های بیوجار استفاده شد.

## نتایج

### درصد خاکستر و عملکرد بیوجار

بر اساس تعریف انجام شده (واندراستلت و همکاران، 2011)، ماده اولیه مورد استفاده در این پژوهش لیگنین است. زیرا لیگنین ترکیبی است که نسبت اتمی هیدروژن به کربن آن از 0/75 تا 1/4 متغیر بوده و نسبت اتمی اکسیژن به کربن آن از 0/2 تا 0/4 متغیر است (واندراستلت و همکاران، 2011). نتایج این پژوهش نشان داد که فرایند آتشکافت در کلیه دماهای این پژوهش (از 350 تا 500 درجه سلسیوس) منجر به تولید بیوجار شده است. زیرا نسبت اتمی هیدروژن به کربن و اکسیژن به کربن در آن به شدت کاهش یافته است و به مقادیر تعریف شده برای بیوجار نزدیک شده است. بیوجار ترکیبی است حاوی کربن پایدار که حداکثر نسبت اتمی اکسیژن به کربن آن 0/4 و حداکثر نسبت اتمی هیدروژن به کربن آن 0/7 باشد (آلمیدا، 2015).

لازم به ذکر است که تبدیل سرشاخه‌های پسته به بیوجار، موجب افزایش محتوی کربن گردید. لیکن با تبدیل سرشاخه‌های پسته به بیوجار میزان هیدروژن و اکسیژن، نسبت هیدروژن به کربن و نسبت اکسیژن به کربن کاهش یافت (جدول 1). همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تبدیل سرشاخه‌های پسته به بیوجار موجب افزایش محتوی خاکستر آن می‌شود (شکل 1). میزان خاکستر موجود در بیوجار تولیدی به دمای آتشکافت بستگی داشت و با افزایش دمای آتشکافت میزان خاکستر به صورت خطی افزایش یافت (  $Y=3.12+0.017X$ ,  $R^2=0.78^{**}$ ). بیشترین خاکستر مربوط به تیمار بیشترین دما (500 درجه سلسیوس) و معادل 11/66 درصد بود. لازم به ذکر است که با افزایش هر واحد دما میزان خاکستر تولید شده به میزان 0/017 درصد افزایش می‌یابد (شکل 1). این مشاهدات توسط سایر محققین نیز گزارش شده است. به عنوان مثال کسکین و همکاران (2019)

از بیوجار را داخل یک عدد کروزه چینی ریخته و به مدت هشت ساعت در دمای 550 درجه سلسیوس در داخل کوره الکتریکی قرار داده شد (علی‌احیایی و بهبهانی‌زاده، 1372). برای تعیین قابلیت هدایت الکتریکی و pH، نسبت به تهیه عصاره یک به ده بیوجار به آب مقطر اقدام و پس از یک شبانه روز نسبت به قرائت قابلیت هدایت الکتریکی و pH اقدام شد (سینگ و همکاران، 2017). عملکرد بیوجار به عنوان درصدی از ماده خام و خشک اولیه است که به بیوجار تبدیل شده است (سونگ و گو، 2012). به منظور تعیین محتوای عناصر غذایی کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز، نمونه‌ها با استفاده از روش هضم خشک و ترکیب با کلریدریک اسید (بلک و همکاران، 1965) عصاره‌گیری شد. غلظت سدیم و پتاسیم به روش نشر شعله‌ای و توسط دستگاه فلیم فوتومتر اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز به روش جذب اتمی و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (علی‌احیایی و بهبهانی‌زاده، 1372). به منظور تعیین محتوای فسفر، پس از هضم خشک و اضافه نمودن آمونیوم مولیبدات و وانادات غلظت فسفر در عصاره با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شد (بلک و همکاران، 1965 و کوئین و وو، 1976). به منظور تعیین سطح ویژه، تخلخل و میانگین قطر حفرات از روش BET استفاده شد (خان‌محمدی و همکاران، 1394). این روش بر اساس سنجش حجم گاز بی اثر جذب و واجذب شده توسط سطح ماده در دمای ثابت نیتروژن مایع 77 درجه کلوین در فشارهای نسبی مختلف استوار است (و بروناتور و همکاران، 1938).

### تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

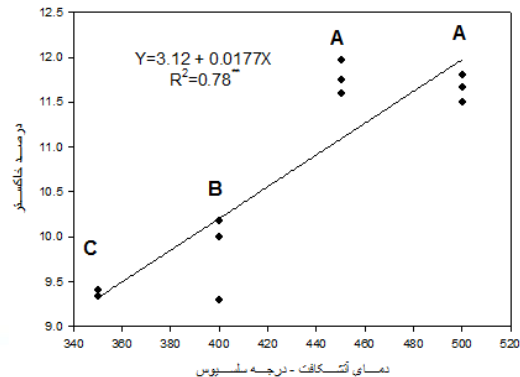
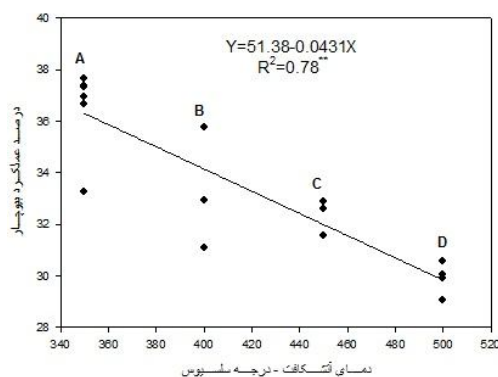
آنالیز واریانس داده‌ها در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و با استفاده از نرم‌افزار آمای SAS انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح معنی‌داری پنج درصد انجام شد. همچنین از نرم‌افزار آماری سیگماپلات به منظور بررسی

که بر درصد خاکستر بیوجار موثر است تیمار نمودن ماده خام اولیه توسط عوامل مختلفی نظیر اسید و املاح می‌باشد (داس و شارما، 2015). این مشاهده به دلیل افزایش میزان مواد معدنی و همچنین کاهش ترکیبات فرار در بیوجارهای تولید شده در دمای بالاتر می‌باشد (کلاستون و همکاران، 2014).

افزایش درصد خاکستر با افزایش دمای آتشکافت را گزارش کردند. این محققین همچنین متذکر شدند که مقدار مطلق خاکستر تولیدی به ترکیب اولیه مواد خام بستگی دارد. به عنوان مثال میری و زمانی‌بابگه‌ری (1399) افزایش درصد خاکستر بیوجار حاصل از ضایعات برداشت پسته را گزارش کردند. از جمله عوامل دیگری

جدول 1- اثر دمای آتشکافت بر درصد اکسیژن (O)، هیدروژن، کربن و نسبت اتمی آنها در بیوجار تولیدی از چوب هرس درختان پسته. در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

درصد یا نسبت اتمی عناصر					دمای آتشکافت
O/C	H/C	O (%)	H (%)	C (%)	
0/44a	0/91a	36/9a	4/79a	62/36b	ماده اولیه
0/08b	0/36b	9/1b	2/4b	78/47a	350
0/08b	0/36b	8/9b	2/43b	78/94a	400
0/07b	0/24c	8/2b	1/84c	78/55a	450
0/05c	0/24c	6/2c	1/7c	81/04a	500



شکل 1- اثر دمای آتشکافت بر میزان خاکستر و عملکرد بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

29/8 درصد بود. اگرچه گزارشی مبنی بر میزان عملکرد بیوجار حاصل از سرشاخه پسته توسط نگارندگان مشاهده نشد لیکن کاهش عملکرد بیوجار (میزان تولید فاز جامد) با افزایش دمای آتشکافت که به دلیل کاهش میزان اکسیژن و هیدروژن فرار در بیوجار تولیدی است (چان و زو، 2009) توسط سایر محققین گزارش شده است (خان‌محمدی و همکاران 1394). به عنوان مثال میزان عملکرد بیوجار حاصل از ضایعات پسته تولید شده در

همچنین نتایج این پژوهش (شکل 1) نشان داد که بیشترین عملکرد بیوجار معادل 37/77 درصد بود و مربوط به کمترین دمای آتشکافت است و با افزایش دمای آتشکافت عملکرد بیوجار به طور خطی کاهش می‌یابد ( $Y=51.38-0.043X$ ,  $R^2=0.78^{**}$ ). به عبارت دیگر به ازای هر واحد افزایش دما میزان بیوجار تولیدی به میزان 0/043 درصد کاهش می‌یابد. کمترین عملکرد بیوجار در دمای 500 درجه سلسیوس و در شرایط این پژوهش معادل

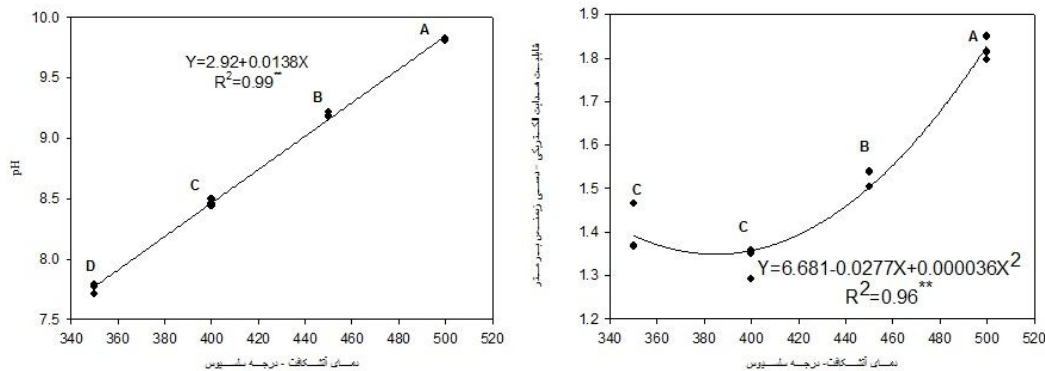
دمای 300، 450، 600 و 750 درجه سلسیوس به ترتیب معادل 50، 33، 32 و 31 درصد گزارش شده است که اندکی بیشتر از عملکرد بیوجار در شرایط پژوهش اخیر بود (میری و زمانی‌بابگهری، 1399). مهمترین دلیل اختلاف بین این مشاهدات متفاوت بودن ترکیب ماده اولیه خام می‌باشد (خان‌محمدی و همکاران 1394). این محققین بیشتر بودن عملکرد بیوجار حاصل از بقایای پسته نسبت به باگاس نیشکر را گزارش نمودند. میزان عملکرد بیوجار حاصل از بقایای پسته و باگاس نیشکر در دمای 500 درجه سلسیوس به ترتیب معادل 35/7 و 27/1 درصد بود (خان‌محمدی و همکاران، 1394).

#### قابلیت هدایت الکتریکی و اسیدیته

یکی از شاخص‌هایی که برای ارزیابی مواد بهساز خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد میزان قابلیت هدایت الکتریکی آنها می‌باشد. قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره یک به ده سرشاخه‌های خام پسته و آب مقطر، معادل 1/36 دسی‌زیمنس بر متر بود. بر اساس شکل 2، با افزایش دمای آتشکافت تا 500 درجه سلسیوس قابلیت هدایت الکتریکی بیوجار تولید شده از سرشاخه‌های پسته از معادله درجه دو پیروی کرد ( $Y=6.68-0.0277X+0.000036X^2$ ,  $R^2=0.96^{**}$ ). به عبارت دیگر، با افزایش دمای آتشکافت از 350 تا 400 درجه سلسیوس ابتدا قابلیت هدایت الکتریکی تغییر معنی‌داری نداشت اما با افزایش دمای آتشکافت از 400 تا 500 درجه سلسیوس افزایش یافت. شایان ذکر است که با افزایش دمای آتشکافت از 350 به 500 درجه سلسیوس قابلیت هدایت الکتریکی از 1/36 به 1/8 دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت که این میزان معادل 32 درصد از قابلیت هدایت

الکتریکی در دمای 350 درجه سلسیوس می‌باشد. دلیل این مشاهده افزایش غلظت عناصر غذایی نظیر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم می‌باشد (ریوز و همکاران، 2007). نظر به اینکه افزایش قابلیت هدایت الکتریکی مواد بهساز خاک به معنی افزوده شدن مقدار بیشتری از املاح محلول به خاک می‌باشد، باید نسبت به میزان و زمان مصرف آنها و همچنین آستانه تحمل به شوری گیاه کشت شده توجه نمود. در غیر این صورت ممکن است املاح موجود در بیوجار موجب وارد شدن تنش شوری به گیاه شود (کریمی، 1398). زلفی‌باوریانی و همکاران (1395) نشان دادند که مصرف بیوجار حاصل از کود مرغی که در دمای 400 درجه سلسیوس تولید شده است موجب افزایش شوری و pH خاک شده است.

رابطه بین pH بیوجار با افزایش دمای آتشکافت نیز از معادله درجه اول پیروی کرد ( $Y=2.92+0.0138X$ ,  $R^2=0.99^{**}$ ). همانطور که از شکل 2 مشخص است، تبدیل ماده خام اولیه به بیوجار موجب افزایش pH گردید. میزان pH بیوجار تولید شده در دمای 350، 400، 450 و 500 درجه سلسیوس به ترتیب معادل 7/73، 8/43، 9/18 و 9/82 بود. به عبارت دیگر با افزایش دمای آتشکافت از 350 به 500 درجه سلسیوس مقدار pH در عصاره یک به ده بیوجار به آب مقطر به میزان 27 درصد نسبت به تیمار دمای آتشکافت 350 درجه سلسیوس افزایش یافت. ریوز و همکاران (2007) مهمترین دلیل افزایش میزان pH بیوجار با افزایش دمای آتشکافت را کاهش گروه‌های عامل اسیدی و افزایش محتوای عناصر قلیایی معرفی کردند.

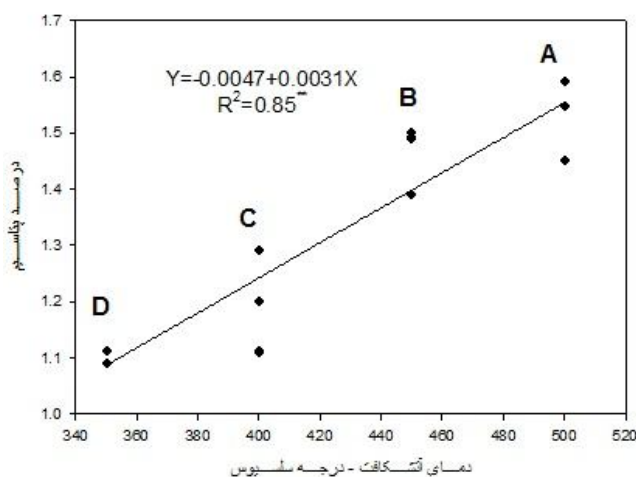


شکل 2- اثر دمای آتشکافت بر قابلیت هدایت الکتریکی و pH بیوپچار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

میزان 0/0031 درصد افزایش می‌یابد ( $Y=0.0047+0.0031X$ ,  $R^2=0.85^{**}$ ). نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین غلظت پتاسیم در بیوپچار (1/52 درصد) مربوط به دمای آتشکافت 500 درجه سلسیوس است. غلظت پتاسیم در بیوپچار تولید شده در دماهای 350، 400 و 450 درجه سلسیوس به ترتیب معادل 1/19، 1/25 و 1/46 درصد بود. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که بیوپچار یک منبع تامین پتاسیم مورد نیاز گیاه می‌باشد و با افزایش دمای آتشکافت محتوی این عنصر غذایی افزایش و کیفیت بیوپچار تولیدی از نظر میزان پتاسیم افزایش می‌یابد.

### پتاسیم کل

پتاسیم یکی از عناصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاهان می‌باشد و کمبود آن در بسیاری از اراضی کشاورزی ایران گزارش شده است (کریمی، 1398). لذا مصرف کودهای پتاسه در بسیاری اراضی کشور ضرورت دارد (رمضان‌پور و همکاران، 2008) و هر ترکیبی که حاوی این عنصر باشد، به شرطی که اثر منفی روی خاک یا گیاه نداشته باشد، می‌تواند به عنوان ماده بهساز خاک تلقی گردد. غلظت پتاسیم در بیوپچار تولیدی به دمای آتشکافت بستگی داشت (شکل 3) و با افزایش هر واحد دمای آتشکافت غلظت این عنصر در بیوپچار تولیدی به

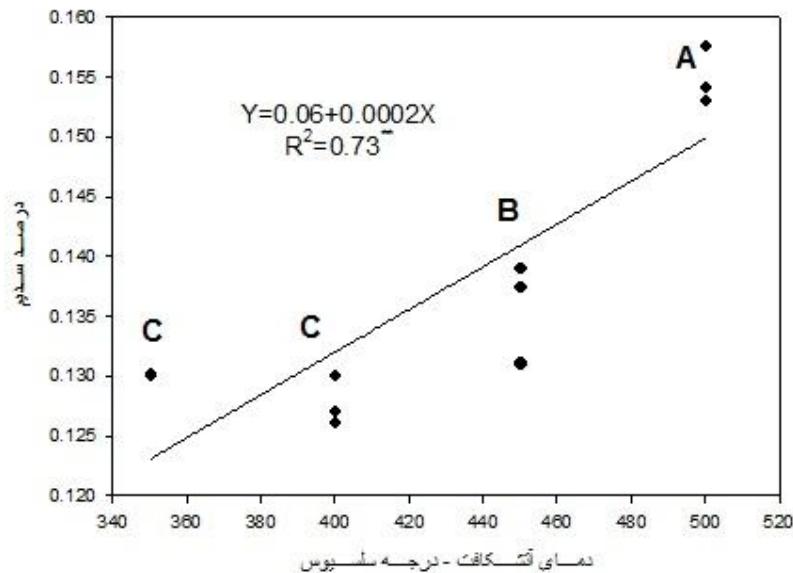


شکل 3- اثر دمای آتشکافت بر میزان پتاسیم موجود در بیوپچار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

## سدیم کل

ترتیب معادل 0/08 و 0/15 بود که در بیوجار تولید شده در دمای 500 درجه سلسیوس به 0/12 و 0/28 افزایش یافت. اگرچه غلظت بالای سدیم در خاک موجب سمیت آن در گیاه می‌شود (کریمی‌زارچی، 1394) لیکن سدیم یکی از عناصر غذایی مفید برای گیاهان گزارش شده است که برخی از وظایف عنصر غذایی پتاسیم را انجام داده و در برخی از واکنش‌ها می‌تواند جایگزین کلسیم شود (پراساد و پاور، 1997). لذا غلظت کم آن موجب افزایش رشد بسیاری از گیاهان نمک دوست و شیرین رست می‌شود.

محتوی سدیم در دمای آتشکافت 350 درجه سلسیوس معادل 0/12 درصد بود (شکل 4) و با افزایش دما به 500 درجه سلسیوس، غلظت این عنصر بصورت خطی افزایش یافت ( $Y=0.06+0.0002X$ ,  $R^2=0.73^{**}$ ) و معادل 0/15 درصد بود. این مشاهده با نتایج پژوهش‌های سایر پژوهشگران (کسکینن و همکاران، 2019) همخوانی داشت. این محققین گزارش کردند که با افزایش دمای آتشکافت از 300 به 500 درجه سلسیوس، محتوای سدیم بقایای باگاس نیشکر و بقایای پسته نیز افزایش یافت. مقدار سدیم در بقایای اولیه و خام نیشکر و پسته به



شکل 4- اثر دمای آتشکافت بر میزان سدیم موجود در بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

## فسفر کل

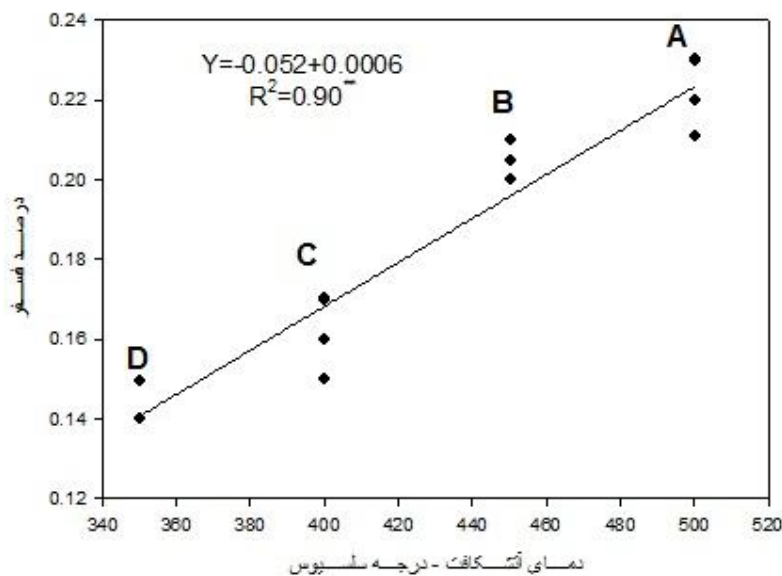
به طور خطی به میزان 0/0006 درصد افزایش یافت ( $Y=-0.052+0.0006X$ ,  $R^2=0.90^{**}$ ) و بیشترین درصد فسفر (0/22 درصد) مربوط به دمای آتشکافت 500 درجه سلسیوس بود. افزایش غلظت فسفر با افزایش دمای آتشکافت در بیوجار تولید شده از برخی از مواد آلی نظیر کود حاصل از جوجه‌های گوشتی توسط سایر محققین نیز گزارش شده است (کسکینن و همکاران، 2019). این در

باتوجه به کمبود فسفر در بخش زیادی از خاک‌های ایران مصرف مواد بهسازی که حاوی این عنصر باشند می‌تواند موجب افزایش عملکرد در واحد سطح گیاهان شود (کریمی و همکاران، 1399). تبدیل سرشاخه خام پسته به بیوجار و افزایش دمای آتشکافت موجب افزایش محتوی فسفر شد (شکل 5). به نحوی که با افزایش هر واحد دمای آتشکافت میزان فسفر در بیوجار



همکاران، 2012). این تضادها بیانگر تاثیر ماده اولیه بر کیفیت بیوجار تولیدی می‌باشد.

حالی است که برخی دیگر از محققین عدم تغییر معنی‌دار محتوی فسفر بیوجار تولیدی از ضایعات درختان نخل روغنی در کشور مالزی گزارش نمودند (شفیع و

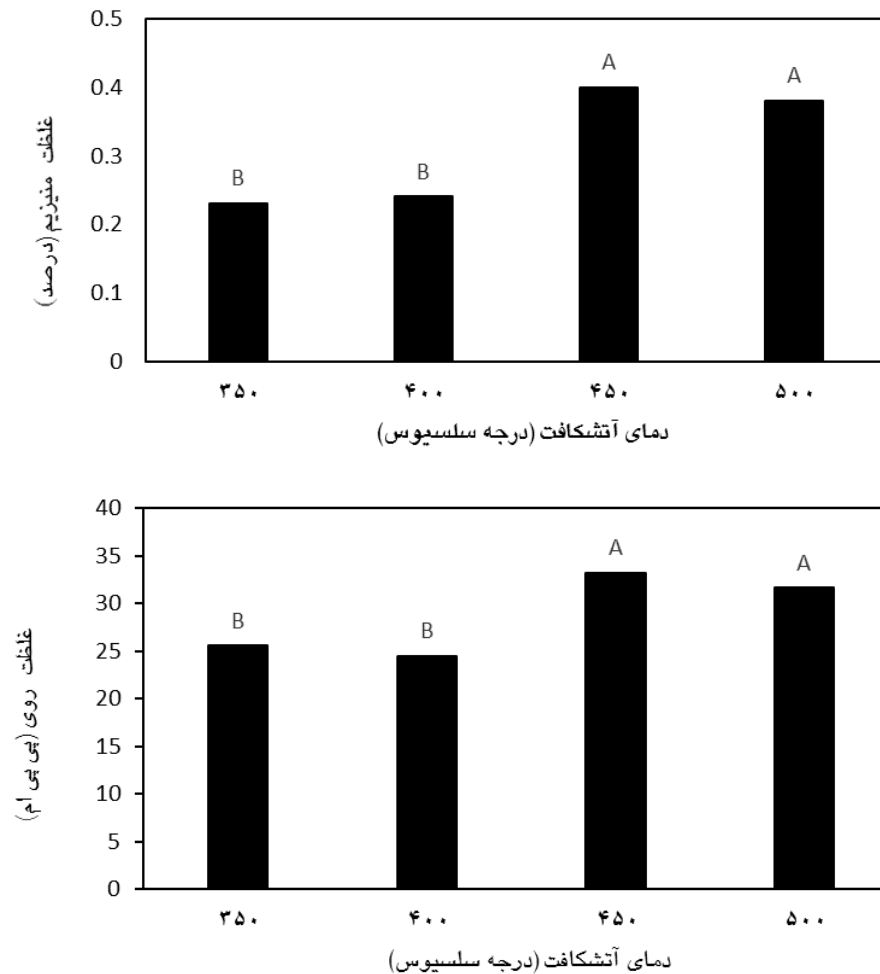


شکل 5- اثر دمای آتشکافت بر میزان فسفر موجود در بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

#### کلسیم، منیزیم و روی

معنی‌داری نداشت و معادل 0/38 درصد بود. این روند در مورد روی نیز مشاهده شد. همانطور که از شکل 6 مشخص است غلظت روی در دمای آتشکافت 350 درجه سلسیوس معادل 24/53 میلی‌گرم در کیلوگرم بود و با افزایش دما به 450 درجه سلسیوس به 33/22 میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت. همچنین با افزایش دمای آتشکافت از 450 به 500 درجه سلسیوس غلظت روی تغییر معنی‌داری نکرد و معادل 31/62 میلی‌گرم در کیلوگرم بود. این مشاهده توسط سایر پژوهشگران تایید می‌شود. به عنوان مثال نتایج پژوهش‌های خان محمدی و همکاران (1394) نشان داد که با افزایش دمای آتشکافت از 400 به 500 درجه سلسیوس غلظت روی تغییر معنی‌داری نداشت.

برخلاف غلظت عناصری نظیر فسفر و سدیم که با افزایش دمای آتشکافت تا 500 درجه سلسیوس غلظت آنها به صورت افزایشی بود، غلظت کلسیم، منیزیم و روی تا دمای 450 درجه سلسیوس افزایش یافت. تفاوت معنی‌داری بین دمای 450 و 500 درجه سلسیوس در غلظت کلسیم، منیزیم و روی مشاهده نشد (شکل 6). نتایج تحقیقات کسکینن و همکاران (2019) نشان داد که با افزایش دما، غلظت کلسیم در بیوجار حاصل از جوجه‌های گوشتی روند افزایشی داشت و بیشترین دمای تولید بیوجار در این پژوهش 450 درجه سلسیوس بود. در مورد غلظت منیزیم با افزایش دما از 300 تا 450 درجه سلسیوس از 0/23 به 0/4 درصد رسید. اما با افزایش دما از 450 به 500 درجه سلسیوس غلظت منیزیم تغییر

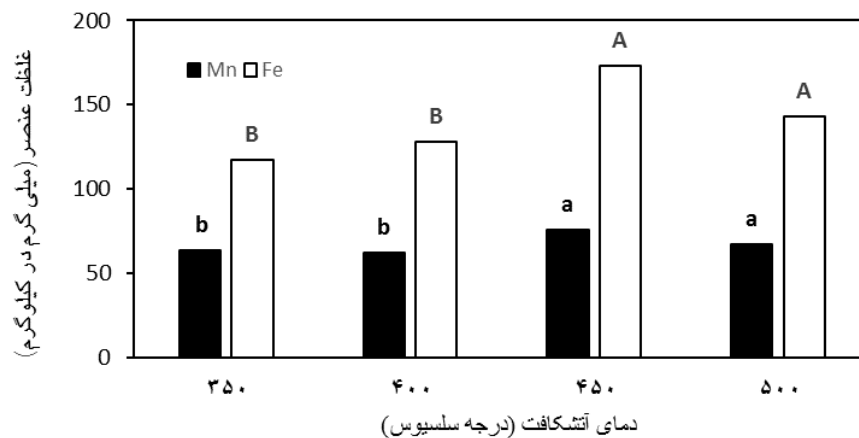


شکل 6- اثر دمای آتشکافت بر میزان کلسیم، منیزیم و روی موجود در بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. ستون‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

### آهن و منگنز

معنی‌داری نداشت (شکل 7). این نتایج با گزارش خان محمدی و همکاران (1394) در تضاد است. آنها نشان دادند که با افزایش دمای آتشکافت تا 500 درجه سلسیوس غلظت آهن و منگنز در بقایای پسته و باگاس نیشکر افزایش می‌یابد. علت این اختلاف می‌تواند به دلیل ماهیت ترکیب ماده خام اولیه باشد (کسنین و همکاران، 2019).

برخلاف عناصر غذایی پتاسیم و فسفر که با افزایش دمای آتشکافت تا 500 درجه سلسیوس محتوای این عناصر نیز به صورت خطی و پیوسته افزایش یافت، با افزایش دمای آتشکافت غلظت عناصر آهن و منگنز تا دمای 450 درجه سلسیوس به طور معنی‌داری افزایش و سپس از نظر عددی کاهش اما از نظر آماری تغییر

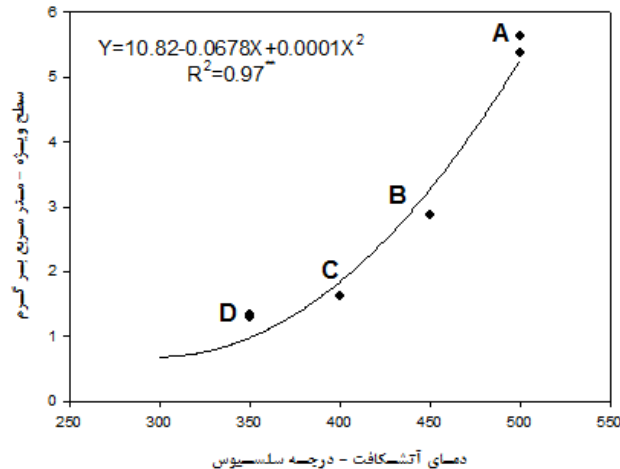


شکل 7- اثر دمای آتشکافت بر میزان آهن و منگنز موجود در بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. ستون‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

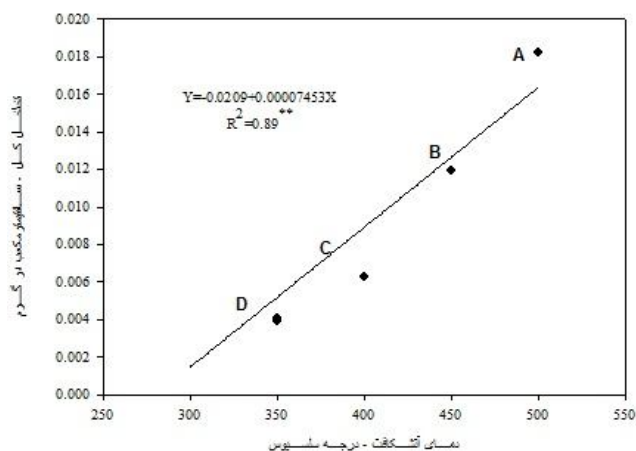
### سطح ویژه و تخلخل کل

یافت و معادل 5/63 مترمربع در گرم بود. روند افزایشی میزان تخلخل با افزایش دمای آتشکافت در مورد بیوجارهای تولیدی نیز مشاهده شد (شکل 9). این افزایش از معادله درجه اول پیروی کرد و به ازای هر یکصد واحد افزایش دما میزان تخلخل به میزان 0/007453 سانتیمتر مکعب به ازای هر گرم بیوجار افزایش یافت ( $Y=0.0209+0.0000745X$ ,  $R^2=0.98^{**}$ ). میزان تخلخل در تیمار دمای آتشکافت 350 درجه سلسیوس معادل 0/0041 سانتیمتر مکعب در گرم بود و با افزایش دمای آتشکافت به 500 درجه سلسیوس به 0/0182 سانتیمتر مکعب در گرم (معادل 4/44 برابر) افزایش یافت.

یکی از مزیت‌های بیوجارها سطح ویژه و تخلخل آنها می‌باشد که به شدت به ترکیب مواد خام اولیه و شرایط آتشکافت بستگی دارد (عالی‌پوربابادی و همکاران، 1397). همانطور که از شکل 8 مشخص است، با افزایش دمای آتشکافت، سطح ویژه بیوجار تولیدی افزایش یافت و از معادله درجه دو تبعیت کرد ( $Y=10.82-0.0678X+0.0001X^2$ ,  $R^2=0.97^{**}$ ). سطح ویژه (0/46 مترمربع در گرم) مربوط به دمای آتشکافت 350 درجه سلسیوس بود و با افزایش دما به 500 درجه سلسیوس سطح ویژه حدود 12 برابر افزایش



شکل 8- اثر دمای آتشکافت بر سطح ویژه بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.



شکل 9- اثر دمای آتشکافت بر تخلخل کل بیوجار تولیدی از چوب‌های هرس درختان پسته. میانگین‌های با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد می‌باشند.

#### بحث

نظیر دمای آتشکافت (کسنین و همکاران، 2019) بستگی دارد. لذا قبل از مصرف هر گونه ماده‌ای به عنوان بیوجار باید ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن را اندازه‌گیری نمود. همچنین جهت تولید بیوجار از مواد اولیه، ضرورت دارد نسبت به بهینه‌سازی شرایط آتشکافت بویژه دمای آتشکافت اقدام نمود. نتایج این پژوهش که با هدف بررسی تأثیر دمای آتشکافت بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار حاصل از سرشاخه‌های ناشی از هرس درختان بارور پسته انجام شد نشان داد که با افزایش دمای

در سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی تولید بیوجار از منابع مختلف مواد آلی انجام شده است (میری و زمانی‌بابگهری، 1399). همچنین گزارشات زیادی مبنی بر تأثیر مثبت بیوجارها بر اراضی کشاورزی و گیاهان انتشار یافته است (یزدان‌پناهی و همکاران، 1398). بر اساس این گزارشات، کیفیت بیوجار تولید شده و اثرات مصرف آنها بر خاک و گیاه به شدت به ویژگی مواد اولیه (وانگ و همکاران، 2013) و شرایط تولید بیوجار

ارائه شده توسط ورهيجن و همکاران (2010) می‌باشد، لیکن نسبت به سطح ویژه بیوچارهای حاصل از سایر پژوهشگران از مقدار کمی برخوردار است. به عنوان مثال میزان سطح ویژه بیوچار حاصل از چوب درخت انجیر و ذرت که در دمای 600 درجه سلسیوس و به مدت 10 ساعت آتشکافت شده است به ترتیب معادل 147 و 33/4 مترمربع در گرم گزارش شده است (کیزیتو و همکاران، 2019). با توجه به اینکه بیشترین دمای آتشکافت در پژوهش اخیر 500 درجه سلسیوس و مدت زمان اقامت 3 ساعت بود بنابراین در صورت نیاز، می‌توان با افزایش دمای آتشکافت و مدت زمان اقامت سطح ویژه بیوچار تولیدی را افزایش داد. تبخیر سریع‌تر ترکیبات آلی در دماهای بالاتر و جلوگیری از اکسید شدن ترکیبات فرار و تشکیل منافذ خالی بیشتر، دلیل افزایش سطح ویژه با افزایش دمای آتشکافت ذکر شده است (لهمن و جوزف، 2009). آژین و سنسوز (2014) مشاهده کردند که با افزایش دمای آتشکافت از 400 به 550 درجه سلسیوس سطح ویژه بیوچار حاصل از دانه کلزا افزایش یافت. اما با افزایش دمای آتشکافت از 550 به 700 درجه سانتیگراد سطح ویژه کاهش یافت. این محققین دلیل افزایش سطح ویژه با افزایش دمای آتشکافت تا 550 درجه سلسیوس را افزایش حجم خلل و فرج ریز و کاهش سطح ویژه با افزایش بیشتر دمای آتشکافت را کاهش حجم خلل و فرج ریز به دلیل ذوب شدن و ترک برداشتن ساختار متخلخل مواد اولیه ذکر نمودند (آژین و سنزو، 2014). این مشاهدات توسط جینداروم و همکاران (2007) تایید شده است. تأثیر مثبت افزایش دمای آتشکافت بر افزایش بیش از چهار برابری تخلخل بیوچار تولیدی مشاهده شده در شرایط پژوهش اخیر (شکل 9)، توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (کسکینن و همکاران، 2019). نتایج تحقیقات سیگموند و همکاران (2017) نیز نشان داد که با افزایش دمای آتشکافت از 105 تا 300 درجه سلسیوس و زمان اقامت 12 ساعت میزان تخلخل کل بیوچار افزایش یافت. این محققین افزایش میزان کربناسیون را مهمترین

آتشکافت از 350 به 500 درجه سلسیوس غلظت عناصر غذایی نظیر فسفر و پتاسیم در بیوچار تولیدی افزایش یافت (شکل‌های 3 و 5). همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت عناصر آهن، روی و منگنز تا دمای 450 درجه سلسیوس افزایش و سپس از نظر آماری ثابت ماند (شکل‌های 6 و 7). این مشاهده به دلیل کاهش میزان هیدروژن و اکسیژن فرار (چان و زو، 2009) می‌باشد و توسط سایر محققین نیز گزارش شده است (ریحانی‌تبار و همکاران، 2020). با توجه به اینکه با افزایش دمای آتشکافت غلظت عناصر مورد نیاز گیاه نیز افزایش یافت، مصرف بیوچار تولید شده در دمای بالاتر در بخش کشاورزی و در راستای تأمین نیاز غذایی گیاهان زراعی و باغی توصیه می‌شود. اما نکته قابل تاملی که باید به آن توجه نمود این است که قابلیت هدایت الکتریکی و pH بیوچار تولید شده از سرشاخه‌های پسته نیز با افزایش دمای آتشکافت از 350 به 500 درجه سلسیوس به ترتیب به میزان 32 و 27 درصد افزایش یافت (شکل 2). همگام با این نتایج، بنی‌طالی و همکاران (1396) نیز افزایش قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار حاصل از باگاس نیشکر و خوشه خرما را گزارش نمودند. ریوز و همکاران (2007) مهمترین دلیل افزایش میزان pH بیوچار با افزایش دمای آتشکافت را کاهش گروه‌های عامل اسیدی و افزایش محتوای عناصر قلیایی معرفی کردند. لذا مصرف بیوچار تولید شده در دمای بالا برای گیاهان حساس به تنش شوری باید با دقت بیشتری انجام پذیرد. زیرا افزایش شوری خاک به بیش از حد آستانه تحمل به شوری گیاه، موجب کاهش پتانسیل تولید می‌شود. ضمناً در صورتیکه مصرف بیوچار نتواند شوری خاک را به شوری بیش از حد آستانه تحمل به شوری گیاه مربوطه افزایش دهد مصرف بیوچار مانعی ندارد (کریمی‌زارچی، 1394).

از دیگر مزایای افزایش دمای آتشکافت، افزایش سطح ویژه بیوچار تولید شده از سرشاخه‌های پسته می‌باشد (شکل 8). گرچه سطح ویژه بیوچار حاصل از سرشاخه‌های پسته در شرایط تحقیق اخیر مشابه نتایج

ویژگی‌های فیزیکی خاک بویژه ظرفیت نگهداشت آب خاک را بهبود بخشد.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی با کد مصوب 971171-010-23-23-45 است که با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و همچنین سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی انجام شده است. همچنین از جناب آقای دکتر مختار زلفی باوربانی عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس که تجارب خود در زمینه تولید بیوجار را در اختیار مجری پروژه قرار دادند تشکر و قدر دانی می‌گردد.

دلیل افزایش تخلخل با افزایش دمای آتشکافت ذکر کردند.

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش دمای آتشکافت تا 500 درجه سلسیوس غلظت عناصر غذایی مورد نیاز گیاه نظیر فسفر و پتاسیم و همچنین تخلخل و سطح ویژه بیوجار افزایش می‌یابد. لذا مناسب‌ترین دمای تولید بیوجار از سرشاخه‌های درخت پسته، دمای 450 الی 500 درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین، ضمن توصیه به انجام تحقیقات بیشتر، به نظر می‌رسد مصرف این محصول می‌تواند کمبود برخی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را جبران نماید و برخی از

#### فهرست منابع:

1. بنایی، م.ح.، ع.، مومنی، م.، بای‌وردی، و م.ج. ملکوتی. 1383. خاک‌های ایران. انتشارات سنا.
2. بنی طالبی، گ.، م.ر.، مصدقی، و ا. خوشگفتارمنش. 1396. اثر دمای پیرولیز بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار حاصل از کاه گندم، باگاس نیشکر، خوشه خرما، خاک اره و شلتوک برنج. پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، اصفهان. 7-1.
3. خان‌محمدی، ز.، م.، افیونی، و م.ر. مصدقی. 1394. اثر دمای پیرولیز بر ویژگی‌های شیمیایی بیوجار حاصل از باگاس نیشکر و بقایای پسته. تحقیقات کاربردی خاک، 3(1): 13-1.
4. خواجوی شجاعی، ش.، ع.، معزی، م.، نوروزی‌مصیر، و م. تقوی‌زاهدکلاسی. 1398. بررسی سیستیک و همدمای جذب نیترات و آمونیوم از محلول آبی با استفاده از زغال زیستی نی. تحقیقات خاک و آب ایران، 50(8): 209-221.
5. رستمیان، ر.، م.، حیدرپور، س.ف.، موسوی، و م. افیونی. 1394. بررسی کاربرد زغال زیستی تهیه شده از شلتوک برنج در شوری زدایی آب آبیاری. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، 19(71): 21-29.
6. رمضانپور، م.ر.، م.، دستفال، و م.ج. ملکوتی. 1387. اثر پتاسیم در کاهش تنش خشکی در گندم در منطقه داراب فارس. علوم خاک و آب، 22(1): 127-135.
7. زلفی‌باوربانی، م.، ع.، رونقی، ن.، کریمیان، ج.، یربی، و ر. قاسمی. 1395. اثر بیوجار تهیه شده از کود مرغی در دماهای مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی یک خاک آهکی. علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، 20(75): 73-86.
8. عالی‌پوربابادی، م.، ع.، معزی، م.، نوروزی‌مصیر، و ع. خادم‌الرسول. 1397. تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی. تحقیقات آب و خاک ایران، 49(3): 537-547.
9. علی‌احیایی، م.، و ع.ا. بهبهانی‌زاده. 1372. شرح روشهای تجزیه شیمیایی خاک و گیاه. موسسه تحقیقات خاک و آب. تهران، نشریه فنی شماره 893.

10. عظیم‌زاده، ی.، و ن. نجفی. 1396. بیوچار، ماده‌ای با ویژگی‌های منحصربه‌فرد برای ترسیب کربن اتمسفر و کاهش گرمایش جهانی. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی، 5(1): 51-63.
11. کریمی، ش.، و ر. قاسمی‌فسایی. 1399. بررسی سینتیک جذب فسفات توسط بیوچار باگاس نیشکر. نشریه دانش آب و خاک، 30(2): 47-58.
12. کریمی، م. 1398. پاسخ گندم رقم بم به اثرات متقابل شوری آب آبیاری و سطوح مختلف کود سولفات پتاسیم. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، 12(1): 239-249.
13. کریمی، م.، ب. خیام‌باشی، س.ع.م.، چراغی، م.، نیکخواه، م.ح.، رحیمیان، ه.، پیرسته‌انوشه، م.، شیران تفتی، م. و و. سلطانی‌گرددفرامرزی. 1399. بررسی پاسخ گندم به سطوح مختلف کود فسفر و شوری در شرایط مزرعه‌ای. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، 13(1): 313-318.
14. کریمی زارچی، م. 1394. راهمای مصرف کودهای نیتروژنی برای تولید گندم. انتشارات صحراشرق. ایران.
15. کیخسروی، ح.ع.، عباس‌پور، و ح.ر. اصغری. 1399. اثر بیوچار سبوس برنج، همراه و غنی شده با سوپرفسفات تریپل بر قابلیت دسترسی فسفر و رشد ذرت در مزرعه. نشریه پژوهش‌های خاک، 34(3): 329-342.
16. معزی، ع.ع.، خادم الرسول، م. بی‌ریا. 1396. تاثیر زغال زیستی و کاربرد آن در خاک. انتشارات شهید چمران اهواز.
17. میری، ف.، و ج. زمانی‌بابگهری. 1399. تاثیر دمای فرآیند پیرولیز آهسته بر برخی ویژگی‌های بیوچار تولید شده از ضایعات برداشت پسته. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، 43(1): 87-101.
18. یزدان‌پناهی، ع.ع.، خ. احمدالی، س.، زارع، م. جعفری. 1398. اثر دو نوع بیوچار بر خصوصیات فیزیکی خاک مؤثر در مدیریت آبیاری مناطق بیابانی. تحقیقات خاک و آب ایران، 50(4): 966-975.
19. Agin, D., and S. Sensoz. 2014. Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 16(7-8): 684-693.
20. Almida, I.S.D.R. 2015. Hydrogen-to-carbon ratio versus char yield in biomass slow pyrolysis. Thesis to obtain the Master of Science. Tecnico Lisboa University.
21. Black, C.A., Evans, D.D., and R.C. Dinauer. 1965. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, 1143.
22. Brunauer, S., Emmett, P.H., and E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of American Chemistry Society*, 60: 309-319.
23. Bhargava, G.P., and I.P. Abrol. 1978. Characteristics of some typical salt affected soils of Uttar Pradesh. Division of Soils and Agronomy, Central Soil Salinity Research Institute: Yazd. Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of American Chemistry Society*, 60: 309-319.
24. Chan, K., and Z. Xu. 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. In: Lehmann, J. and S. Joseph (Eds), *Biochar for Environmental management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 67-84.
25. Claoston, N.A., Samsuri, M.H., and A. Husni. 2014. Effects of Pyrolysis Temperature on the Physicochemical Properties of Empty Fruit Bunch and Rice Husk Biochars. *Waste Management Research*, 32(4): 331-339.
26. Das, O., and A.K. Sarmah. 2015. Mechanism of waste biomass pyrolysis: Effect of physical and chemical pre-treatments. *Science of the Total Environment*, 537: 323-334.
27. Downie, A., Crosky, A., and P. Munroe. 2009. Physical Properties of Biochar. In: Lehmann, J. and S. Joseph (Eds), *Biochar for Environmental management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 13-32.
28. Jindarom, C., Meeyoo, V., Kitiyanan, B., Rirksomboon, T., and P. Rangsunvigit. 2007. Surface characterization and dye adsorptive capacities of char obtained from

- pyrolysis/gasification of sewage sludge. *Chemical Engineering Journal*, 133(1–3): 239–246.
29. Karimizarchi, M., Soltangheisi, A., Husin, A., Yusop, M.K., and R. Othman. 2018. Sulfur uptake and translocation in maize (*zea mays*) grown in a high pH soil treated with elemental sulfur. *Journal of Plant Nutrition*, 41(14): 1798-1806.
  30. Keskinen, R., Hyväluoma, J., Sohlo, L., Help, H., and K. Rasa. 2019. Fertilizer and soil conditioner value of broiler manure biochars. *Biochar*, 1: 259–270.
  31. Kizito, S., Luo, H., Lu, J., Bah, H., Dong, R., and S. Wu. 2019. Role of Nutrient-Enriched Biochar as a Soil Amendment during Maize Growth: Exploring Practical Alternatives to Recycle Agricultural Residuals and to Reduce Chemical Fertilizer Demand. *Sustainability*, 11: 1-22.
  32. Kloss, S., Zehetner, F., Dellantonio, A., Hamid, R., Ottner, F., Liedtke, V., Schwanninger, M., Gerzabek, M.H. and G. Soja. 2012. Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. *Journal of Environmental Quality*, 41:990–1000.
  33. Lehmann, J., and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London.
  34. Lua, A.C., Yang, T., and J. Guo. 2004. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72: 279-287.
  35. Oisik, D., and S. Ajit. 2015. Mechanism of waste biomass pyrolysis: Effect of physical and chemical pre-treatments. *Science of the Total Environment*, 537: 323–334.
  36. Parasad, R., and R., Power. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. CRC Press. Lewis publishers, New York.
  37. Quin, B.F., and P.H., Wood. 1976. Rapid manual determination of sulfur and phosphorous in plant material. *Communications in soil science and plant analysis*, 7(4):415-425.
  38. Reeves, J.B., McCarty, G.W., Rutherford, D.W., and R.L. Wershaw. 2007. Near Infrared Spectroscopic Examination of Charred Pine Wood, Bark, Cellulose and Lignin: Implications for the Quantitative Determination of Charcoal in Soils. *J. Near Infrared Spec.*, 15: 307-315.
  39. Reyhanitabar, A., Farhadi, M., Ramezanzadeh, H., and Sh. Oustan. 2020. Effect of Pyrolysis Temperature and Feedstock Sources on Physicochemical Characteristics of Biochar. *Jouranal of Agricultural Science and Technology*, 22(2): 547-561.
  40. Shafie, S.T., Salleh, M.A.M., Hang, L.L., Rahman, M.M., and W.W.K. Ghani. 2012. Effect of pyrolysis temperature on the biochar nutrient and water retention capacity. *Journal of Purity, Utility Reaction and Environment*, 1(6): 323-337.
  41. Shirani, H., Rizabandi, E., Mosaddeghi, M.R., and H. Dashti. 2010. Impact of Pistachio Residues on Compactibility, and Permeability for Water and Air of Two Aridic Soils from Southeast of Iran. *Arid Land Research and Management*, 24(4): 365-384.
  42. Sigmund, G., Huffer, T., Hofmann, T., and M. Kah. 2017. Biochar total surface area and total pore volume determined by N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> physisorption are strongly influenced by degassing temperature. *Science of the Total Environment*, 580: 770-775.
  43. Singh, B., MeiDolk, M., Shen, Q., and M. Camps-Arbestain. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. In: *Biochar: A Guide to Analytical Methods*, Chapter 3, Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann J., (Eds.). Publisher CSIRO, PP. 23-38.
  44. Song, W., and M. Guo. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94:138–145.



45. Van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A, and K.J., Ptasinski. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9): 3748–3762.
46. Wei, J., Tu, C., Yuan, G., Liu, Y., Bi, D., Xiao, L., Lu, J., Theng, B., Wang, H., Zhang, L., and X. Zhang. 2019. Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. *Environmental Pollution*, 251: 56-65.
47. Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., Van der Velde, M., and I. Diafas. 2010. Biochar application to soils. Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg.
48. Wang, Y., Hu, Y., Zhao, X., Wang, Sh. and G. Xing. 2013. Comparisons of Biochar Properties from Wood Material and Crop Residues at Different Temperatures and Residence Times. *Energy & Fuels*, 27(10):5890–5899.

## Effect of Pyrolysis Temperature on Some Physicochemical Properties of Biochar Derived from Pruning Waste of Mature Pistachio Trees

M. Karimi<sup>1</sup>

Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran; E-mail: karimi\_nsrc@yahoo.com

Received: February, 2021, and Accepted: September, 2021

### Abstract

Production and soil application of biochars derived from crop residue is known as an environmental friendly strategy for increasing soil health and quality. Therefore, the present study aimed to elucidate the effect of 4 pyrolysis temperatures (350, 400, 450, and 500 °C) on the physicochemical properties of biochar derived from pistachio pruning. The results showed that increasing pyrolysis temperature up to 500 °C increased electrical conductivity, pH, K, Na and P by 32%, 27%, 27%, 25%, and 29% compared to the pyrolysis temperature of 350 °C, respectively. While the increasing trend in Ca, Mg and Zn content was significant up to 450 °C, there were no significant difference in Ca, Mg and Zn content at pyrolysis temperatures of 450 and 500 °C. The results also, confirmed the positive effect of pyrolysis temperature on specific surface area as well as porosity. Overall, it was concluded that the biochar derived from pistachio pruning woods is rich in plant nutrients and can be used as a source of nutrient supply for plants. It can also act as a soil amendment and improve plant performance.

**Keywords:** Biochar acidity, Biochar Electrical Conductivity, Biochar plant nutrients, Biochar specific surface area

---

<sup>1</sup> Corresponding author: National Salinity Research Center, Yazd, Iran.