

## اثر دمای پیرولیز بر ویژگی‌های شیمیایی بیوجار حاصل از باگاس نیشکر و بقایای پسته

زهرا خان‌محمدی<sup>۱\*</sup>، مجید افیونی<sup>۲</sup>، محمدرضا مصدقی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۲)

### چکیده

وجود پسماندهای آلی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، پیامدهای مشکل‌ساز کوتاه و درازمدتی را برای کشاورزان و سلامت محیط زیست ایجاد کرده است. باگاس نیشکر و بقایای پسته از پسماندهای مهم کشاورزی هستند که مدیریت کاربرد آن‌ها ضروری است. یکی از راه‌کارهای استفاده از این بقایا اعمال فرآیند پیرولیز و تبدیل آن‌ها به بیوجار است. این پژوهش با هدف بررسی برخی ویژگی‌های باگاس نیشکر، بقایای پسته (شاخ و برگ خشکیده) و بیوجار به‌دست آمده از آن‌ها تحت دماهای مختلف پیرولیز (۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش دمای پیرولیز موجب کاهش معنی‌دار مقدار تولید فاز جامد (عملکرد بیوجار) و افزایش میزان فازهای گاز و مایع (شیرابه) شد ( $LSD_{0.05}$ ). همچنین افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش معنی‌دار pH از ۸/۴ به ۱۰/۸ شد. پیرولیز سبب افزایش مقدار کل عناصر غذایی بیوجارهای بقایای مورد استفاده شد. به‌علاوه نسبت کربن به نیتروژن در بیوجارهای تولید شده نسبت به بقایای اولیه کاهش یافت. به‌طور کلی مقادیر کل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سدیم در تیمارهای بقایای پسته بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر بود. از آنجایی که بیوجارهای باگاس نیشکر دارای عناصر غذایی کم‌تر و کربن بیش‌تری نسبت به بیوجارهای بقایای پسته بودند، مدیریت دقیق‌تری برای کاربرد در خاک به‌عنوان کود و اصلاح‌کننده نیاز دارند. از طرف دیگر شوری بقایای پسته و بیوجارهای آن بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر بود. بنابراین ضروری است کاربرد بیوجار بقایای پسته در خاک همراه با آب‌شویی یا برای کاشت گیاهان متحمل به شوری باشد. پیرولیز موجب افزایش مقدار کل آهن، روی، مس، منگنز، کروم و سرب در بیوجار هر دو نوع بقایا شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده بهترین دمای پیرولیز برای تولید بیوجار بقایای پسته و باگاس نیشکر به‌ترتیب ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس است.

**واژه‌های کلیدی:** بیوجار، باگاس نیشکر، بقایای پسته، پیرولیز، عناصر غذایی

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان (مکاتبه کننده)

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* پست الکترونیک: Zahra\_khanmohamadi@yahoo.com

## مقدمه

امروزه بسیاری از کشورهای در حال توسعه تمایل به استفاده بهینه از بقایای کشاورزی مانند باگاس نیشکر، کاه و پوشال برنج و گندم، غلاف برنج، بقایای ذرت و آفتابگردان در زمین‌های کشاورزی دارند (Fu et al., 2011). هم‌چنین با توجه به نقشه‌های خاک کشور و برنامه توسعه ایران تا سال ۱۴۰۴، افزایش ماده آلی و بهبود کیفیت خاک‌های کشور ضروری است. یکی از راه‌کارهای استفاده از بقایای کشاورزی که اخیراً مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است، پیرولیز است (Pattiya, 2011). پیرولیز فرآیند تبدیل گرمایی-شیمیایی<sup>۱</sup> زیتوده در شرایط کم یا بدون اکسیژن است که منجر به ایجاد سه فاز گاز، مایع و جامد (بیوپچار) می‌شود. فاز گاز عمدتاً شامل متان یا سایر هیدروکربن‌های قابل اشتعال است. فازهای گاز و مایع می‌توانند به‌عنوان سوخت و برای تولید گرما و انرژی پاک مورد استفاده قرار گیرند. فاز جامد که بیوپچار (Biochar) یا زغال زیستی نامیده می‌شود یک ماده جامد متخلخل و غنی از کربن است که در واقع ساختار آروماتیک چندحلقه‌ای آن سبب پایداری در محیط و ذخیره و ترسیب کربن در خاک می‌شود (Verheijen et al., 2010). از سوی دیگر گزارش شده است که افزودن بیوپچار غالباً موجب بهبود حاصلخیزی خاک و رشد گیاهان به‌ویژه همراه با افزودن کودهای نیتروژن در خاک‌های حاصل‌خیزی کم می‌شود (Blackwell et al., 2009). هم‌چنین گزارش‌هایی مبنی بر نقش مثبت بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها مانند افزایش تخلخل (Steiner et al., 2007)، بهبود سطح ویژه و افزایش تهویه (Laird et al., 2010)، افزایش نگه‌داشت آب، نفوذپذیری و زه‌کشی خاک (Ibrahim et al., 2013) موجود است. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2014)، گزارش کردند که میزان کلونیزاسیون قارچ‌های میکوریزا در خاک‌های تیمار شده با بیوپچار لجن فاضلاب بیش‌تر از خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب است و بیوپچار نقش موثرتری در افزایش آب قابل‌دسترس و پایداری خاکدانه‌ها دارد. اوچیمیا و همکاران (Uchimiya et al., 2010)، نیز بیان نمودند که بیوپچار به‌دست آمده از بقایای گیاهی نسبت به کودهای شیمیایی اصلاح‌کننده‌های بهتری برای

خاک هستند؛ زیرا مقدار عناصر غذایی قابل آب‌شویی کم‌تری دارند. ولی در صورت کاربرد بیوپچارهای گیاهی به همراه کودهای شیمیایی، اثر آن‌ها در خاک بیش‌تر است. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی کلیدی بیوپچار (مانند pH، EC، فراهمی عناصر غذایی، سطح ویژه و آب‌گریزی) عمدتاً متأثر از نوع ماده آلی انتخاب‌شده برای تولید آن و شرایط فرآیند پیرولیز (دما و زمان) است. فو و همکاران (Fu et al., 2011)، نشان دادند که با افزایش دمای پیرولیز از ۶۰۰ به ۱۰۰۰ درجه سلسیوس، عملکرد بیوپچار تولیدشده از کاه و کلش ذرت، برنج و پنبه (نسبت جرم بیوپچار به جرم زیتوده اولیه)<sup>۲</sup> کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، تجزیه و متلاشی‌شدن زیاد مواد خام در دماهای زیاد می‌تواند باشد. یوان و همکاران (Yuan et al., 2011)، با بررسی اثر دماهای مختلف پیرولیز بر ویژگی‌های بیوپچار به‌دست آمده از بقایای کلزا، ذرت، سویا و بادام زمینی دریافتند که با افزایش دما، مقدار pH بیوپچارها افزایش می‌یابد. رستمیان (Rostamian, 2014) با بررسی طیف FTIR بیوپچار تهیه شده از شلتوک برنج در دماهای ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس دریافت که در هر سه دمای پیرولیز، پیک‌های مربوط به اعداد موج  $469\text{ cm}^{-1}$ ،  $803\text{ cm}^{-1}$  و  $1098\text{ cm}^{-1}$  به‌ترتیب پیوندهای Si-O خمشی-ارتعاشی، کششی متقارن و کششی نامتقارن را توصیف می‌کنند که به‌دلیل وجود ترکیبات سیلیس در شلتوک برنج است. پژوهش حسین و همکاران (Hossain et al., 2011)، نیز نشان داد که عملکرد بیوپچار لجن فاضلاب از ۷۲/۳ درصد در ۳۰۰ درجه سلسیوس به ۵۲/۴ درصد در ۷۰۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. بر اساس یافته‌های خان‌محمدی و همکاران (Khanmohammadi et al., 2015)، بیوپچار تولید شده از لجن فاضلاب شهری در دماهای کم‌تر پیرولیز (۳۰۰ درجه سلسیوس) نسبت به دماهای زیادتر پیرولیز (۷۰۰ درجه سلسیوس) دارای نیتروژن کل و کربن آلی بیش‌تری است اما با افزایش دمای پیرولیز، مقدار فسفر، پتاسیم و سدیم کل، نسبت کربن به نیتروژن و مقدار کربنات کلسیم معادل آن افزایش می‌یابد.

یکی از مشکلات کشاورزی در ایران، وجود بقایای گیاهی پس از برداشت محصولات زراعی است که مزاحمت‌های فراوانی برای کشاورزان ایجاد می‌کند. با توجه به رتبه

دارای عایق حرارتی بود تا هدررفت گرمایی به حداقل برسد. باگاس نیشکر (از مزارع نیشکر در اهواز) و بقایای پسته (از باغات پسته در رفسنجان) تهیه شده و ابتدا آن خشک شدند، و پس از آسیاب و عبور از الک ۲ میلی‌متری با ضخامت یک سانتی‌متر روی طبقه‌های محفظه آهنی قرار داده شدند. سپس محفظه آهنی داخل کوره الکتریکی قرار گرفت. پیرولیز باگاس نیشکر و بقایای پسته به‌طور جداگانه و بر اساس روش پیشنهادی کانترل و همکاران (Cantrell et al., 2012) در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و با نرخ افزایش دمای ۳ درجه سلسیوس در هر دقیقه با جریان پیوسته گاز آرگون (گاز بی اثر) و در سه تکرار انجام شد. جریان گاز آرگون، هوای موجود در محفظه را به‌منظور ایجاد شرایط حداقل اکسیژن و انجام پیرولیز خارج می‌کند. نمونه‌ها به‌مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای مورد نظر نگه داشته شده و سپس کوره به آرامی با تبادل گرمایی با محیط برای رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس یا کم‌تر خنک گردید. فاز مایع (شیرابه) تولیدشده نیز جمع‌آوری شد (شکل ۱). عملکرد بیوپچار از رابطه  $(100 \times \text{جرم زیتوده} / \text{جرم بیوپچار}) =$  عملکرد بیوپچار محاسبه شد. عملکرد فاز مایع نیز مشابه عملکرد بیوپچار محاسبه گردید. درصد عملکرد فاز گازی از تفاضل مجموع عملکرد فاز جامد و مایع از ۱۰۰ به‌دست آمد.

## ۲-۲- اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی

ویژگی‌های بیوپچار و بقایای اولیه از جمله pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) به‌ترتیب در عصاره ۱ به ۱۰ بیوپچار یا بقایا به محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و عصاره ۱ به ۱۰ بیوپچار یا بقایا به آب دیونیزه اندازه‌گیری شد (Blakemore et al., 1987). مقدار کربن آلی کل (TOC) با استفاده از دستگاه TOC Analyser مدل (CS22 SKALAR) و نیتروژن کل (TN) به روش کلدال اندازه‌گیری شد (Bremner, 1996). برای اندازه‌گیری مقادیر فسفر، سدیم و پتاسیم کل بقایای اولیه و بیوپچارها، نمونه‌ها ابتدا در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شدند. عصاره‌گیری از خاکستر با اسید کلریدریک ۲ مولار صورت گرفت. سپس مقدار فسفر کل در محلول با استفاده از روش رنگ‌سنجی اسید آسکوربیک-آمونیم-مولیبدات

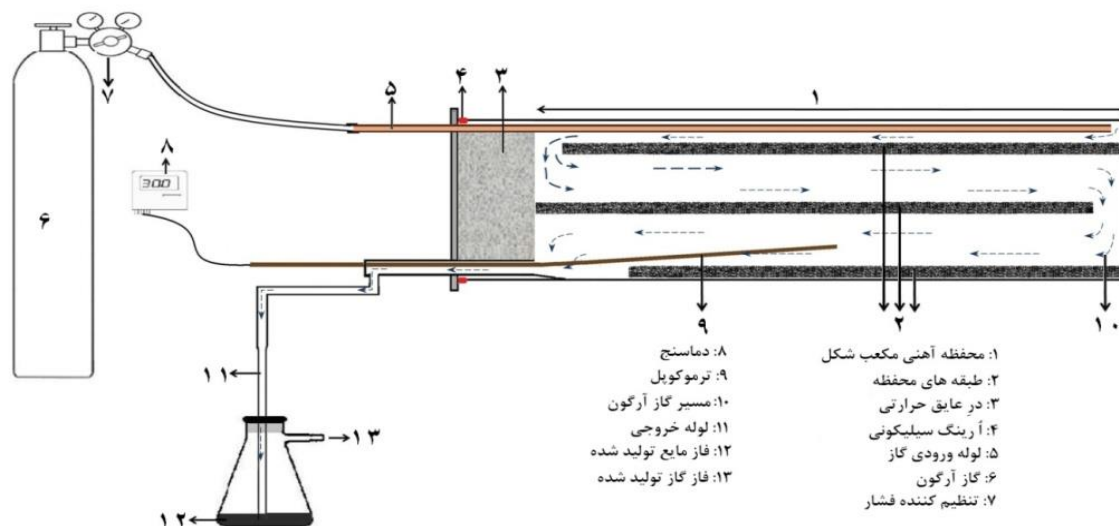
نخست جهانی ایران در تولید پسته، پسته‌کاران با مشکل وجود بقایای زیاد این محصول ارزشمند روبه‌رو هستند. شیرانی و همکاران (Shirani et al., 2010) گزارش کردند که حدود ۲۰ درصد از کل زیتوده درختان پسته تبدیل به پسماندهای آلی می‌شود. بنابراین در باغ‌های پسته، سالانه حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار بقایای پسته بر جا می‌ماند. یکی دیگر از بقایای کشاورزی، باگاس (تفاله) نیشکر بوده که پس از شربت‌گیری به شکل توده فیبر خشک و متراکم، و به‌صورت قطعات ریز-تراشه باقی می‌ماند که به رنگ زرد کاهی است. در حال حاضر حجم زیادی از باگاس در کشور (بیش از دو میلیون تن در استان خوزستان) تولید می‌شود که علی‌رغم استفاده بخشی از آن در صنایعی مانند فیبر و کاغذ، قسمت عمده آن بدون بهره‌گیری مفید در بیابان‌های خوزستان دچار خودسوزی شده و علاوه بر آلوده کردن محیط زیست، به‌عنوان سرمایه ملی به دود تبدیل می‌شود. تهیه بیوپچار از این بقایا و کاربرد آن در زمین‌های کشاورزی ضمن برطرف نمودن مزاحمت بقایا در زمین‌های کشاورزی، احتمالاً می‌تواند سبب بهبود وضعیت حاصل‌خیزی و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک در دراز مدت شود. ولی پیش از کاربرد بیوپچار بقایا و پسماندها، بایستی شرایط تولید با توجه به ویژگی‌های مختلف آن ارزیابی و بهینه شود. به‌همین دلیل این پژوهش با هدف بررسی برخی ویژگی‌های باگاس نیشکر، بقایای پسته (شاخ و برگ خشکیده) و بیوپچار به‌دست آمده از آن‌ها تحت دماهای مختلف پیرولیز انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

### ۲-۱- طراحی و ساخت دستگاه پیرولیز و تهیه

#### بیوپچار

برای تهیه بیوپچار باگاس نیشکر و بقایای پسته با ایجاد تغییراتی در یک کوره الکتریکی، شرایط عدم حضور اکسیژن برای پیرولیز فراهم گردید. به این منظور یک محفظه آهنی مکعب‌شکل با ابعاد ۱۶ سانتی‌متر عرض، ۱۶ سانتی‌متر ارتفاع و ۴۵ سانتی‌متر طول، و با سه طبقه ساخته شد و درون کوره الکتریکی قرار گرفت (شکل ۱). در محفظه آهنی دارای یک ورودی گاز و یک خروجی برای فاز گاز و مایع تولید شده بود. اطراف در محفظه



شکل ۱- نمایی از طرح کلی دستگاه پیرولیز استفاده شده در این پژوهش

Fig.1. Schematic diagram of pyrolysis apparatus used in this study

مقایسه میانگین‌ها به وسیله آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

### نتایج و بحث

**۳-۱- اثر نوع بقایا و دمای پیرولیز بر عملکرد بیوچار**  
 درصد عملکرد بیوچارهای تولید شده از بقایای پسته به طور معنی داری بیش تر از درصد عملکرد بیوچارهای باگاس نیشکر بود (شکل ۲-الف). این مساله احتمالاً به دلیل بافت خشبی بقایای پسته است. در مقابل افزایش معنی دار درصد عملکرد فازهای مایع و گاز در پیرولیز باگاس نیشکر نسبت به بقایای پسته مشاهده شد (شکل ۲-الف). در فرآیند پیرولیز بقایای پسته و باگاس نیشکر سه فاز جامد (بیوچار)، مایع (شیرابه) و گاز تولید شد که با افزایش دما سهم فاز جامد به طور معنی داری کاهش یافت (شکل ۲-ب). با افزایش دمای پیرولیز تولید فاز گاز افزایش معنی داری یافت به طوری که بیش ترین میزان گاز تولیدی مربوط به دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بود. درصد عملکرد بیوچار با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس از ۴۶/۹۶ درصد به ۳۱/۳۳ درصد کاهش یافت. حداقل سهم فاز مایع مربوط به دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس بود و با افزایش دما افزایش معنی داری نشان داد. فو و همکاران (Fu et al., 2011)، نیز گزارش کردند که با افزایش دمای پیرولیز، عملکرد بیوچار تولید شده از کاه و کلش ذرت، برنج و پنبه کاهش می یابد. وی و همکاران (Wei et al., 2006) بیان نمودند که واکنش‌های

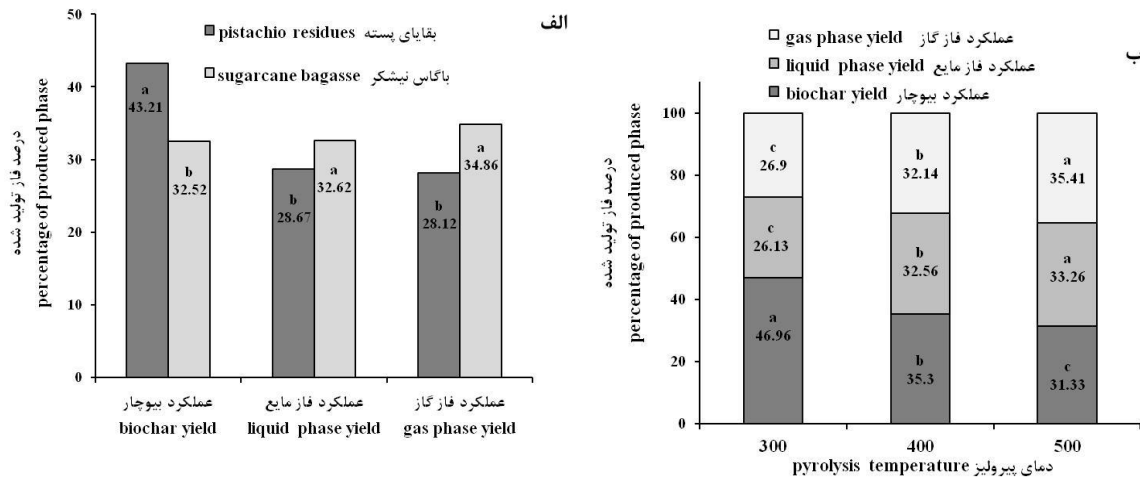
در طول موج ۸۸۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Jenway 6505 (UV/Vis) اندازه گیری شد (Black et al., 1965). مقدار سدیم و پتاسیم کل با دستگاه فلیم فتومتر مدل Corning M410 قرائت شد (Black et al., 1965). عصاره گیری عناصر آهن، روی، مس، منگنز، نیکل، کادمیم، کبالت، کروم و سرب کل به روش ۳۰۵۰B سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا و هضم به وسیله آب اکسیژنه و اسید نیتریک غلیظ انجام شد (US Environmental Protection Agency, 1996). تعیین شکل قابل جذب این عناصر، عصاره گیری با استفاده از محلول ۰/۰۵ مولار DTPA انجام شد. غلظت عناصر در عصاره های حاصل، توسط دستگاه طیف سنج جذب اتمی مدل پرسیک المر A۲۰۰ قرائت گردید (Lindsay & Norvell, 1978).

### ۳-۲- تجزیه آماری

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل با دو فاکتور نوع بقایا (باگاس نیشکر و بقایای پسته) و دمای پیرولیز (در چهار سطح ۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) انجام شد. در مورد ویژگی های درصد عملکرد بیوچار، درصد عملکرد فاز مایع و همچنین گاز، فاکتور دمای پیرولیز در سه سطح (۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) در نظر گرفته شد. نتایج به روش ANOVA با نرم افزار SAS مورد تجزیه آماری قرار گرفت.

(جدول ۱). به عبارت دیگر بیشترین عملکرد بیوچارها مربوط به بیوچار بقایای پسته در ۳۰۰ درجه سلسیوس بود؛ درحالی که کمترین عملکرد بیوچارها برای بیوچار باگاس نیشکر در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد. بیشترین عملکرد فاز مایع به باگاس نیشکر در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سلسیوس اختصاص یافت. تفاوت معنی داری بین درصد شیرابه تولید شده از بقایای پسته در دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس وجود نداشت. در هر دو نوع بقایا بیشترین عملکرد فاز گاز در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد.

سریع ثانویه در فاز گاز و به دنبال آن ایجاد منافذ متعدد برای خروج گازهای پیرولیز منجر به افزایش عملکرد فاز گاز با افزایش دما می شود. همچنین افزایش دمای پیرولیز سبب تولید گازهای غیرقابل تراکم شده و در نتیجه عملکرد فاز گاز افزایش می یابد. به علاوه عملکرد بیوچار به طور معنی داری به فرآیند پیرولیز و ویژگی های ماده اولیه بستگی دارد (Lehmann, & Rondon, 2006). بر اساس اثر متقابل دمای پیرولیز و نوع بقایا، در بقایای پسته و باگاس نیشکر با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس درصد عملکرد بیوچار به ترتیب از ۵۳/۷ و ۴۰/۳ درصد به ۳۵/۷ و ۲۷ درصد کاهش معنی داری یافت



شکل ۲- مقایسه میانگین درصد فازهای تولید شده تحت تاثیر: الف) نوع بقایا و ب) دماهای پیرولیز. حروف غیرمشابه برای یک فاز نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است

Fig.2. Means' comparisons of the percentage of produced phases as affected by: a) residues type, and b) pyrolysis temperatures. Different letters for each phase indicate significant differences (LSD,  $p < 0.05$ ).

جدول ۱- مقایسه میانگین درصد عملکرد بیوچار، فاز مایع و فاز گاز تولید شده تحت اثر متقابل نوع بقایا و دمای پیرولیز (درجه سلسیوس)

Table 1: Means' comparisons of the percentage of biochar, liquid phase and gas phase yield as affected by residues type and pyrolysis temperature interaction

باگاس نیشکر (Sugarcane bagasse)			بقایای پسته (Pistachio residues)			ویژگی (Property)
500°C	400°C	300°C	500°C	400°C	300°C	
27.1 <sup>e</sup>	30.3 <sup>d</sup>	40.3 <sup>b</sup>	35.7 <sup>c</sup>	40.3 <sup>b</sup>	53.7 <sup>a</sup>	عملکرد بیوچار (Biochar yield)
33.6 <sup>a</sup>	32.5 <sup>c</sup>	32.1 <sup>d</sup>	32.9 <sup>b</sup>	32.8 <sup>b</sup>	20.2 <sup>e</sup>	عملکرد فاز مایع (Liquid phase yield)
39.5 <sup>a</sup>	37.4 <sup>b</sup>	27.6 <sup>d</sup>	31.3 <sup>c</sup>	26.8 <sup>e</sup>	26.1 <sup>f</sup>	عملکرد فاز گاز (Gas phase yield)

حروف غیرمشابه برای یک فاز (در هر ردیف) نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

به هر حال عملکرد فاز گاز بقایای پسته در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به طور معنی‌داری از عملکرد فاز گاز باگاس نیشکر در دماهای ۵۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس کم‌تر بود (جدول ۱).

### ۳-۲- اثر نوع بقایا و دمای پیرولیز بر pH و قابلیت هدایت الکتریکی

نتایج مربوط به تجزیه واریانس ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در جدول ۲ نشان داده شده است. اثر نوع بقایا و دمای پیرولیز بر pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در سطح احتمال ۰/۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). pH بقایای پسته به طور معنی‌داری بیش‌تر از باگاس نیشکر بود (جدول ۳). این یافته می‌تواند به دلیل وجود مقدار بیش‌تر کاتیون‌های بازی مانند سدیم و پتاسیم در بقایای پسته نسبت به باگاس نیشکر باشد (McCauley *et al.*, 2009). با تبدیل بقایای پسته و باگاس نیشکر به بیوچار و هم‌چنین افزایش دمای پیرولیز، افزایش معنی‌داری در مقدار pH مشاهده شد (جدول ۴). یوان و همکاران (Yuan *et al.*, 2011) بر اساس نتایج طیف‌سنجی پراکنش اشعه X (XRD) و اندازه‌گیری کربنات‌ها بیان نمودند که با افزایش دمای پیرولیز و افزایش میزان کربنات‌ها، مقدار pH بیوچارها افزایش می‌یابد. برای هر دو نوع بقایا بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار pH به ترتیب مربوط به بیوچارهای تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و بقایای اولیه است (جدول ۵). به طور کلی مقدار EC تیمارهای پسته بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر به دست آمد (جدول ۳)، که احتمالاً به دلیل نمک‌های بیش‌تر در بقایای پسته و شوری پسند بودن این گیاه می‌تواند باشد (جدول ۳). با اعمال پیرولیز و هم‌چنین افزایش دمای پیرولیز، مقدار EC به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴). قابلیت هدایت الکتریکی بقایای پسته و باگاس نیشکر به ترتیب ۷/۴ و ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. با تبدیل بقایای پسته به بیوچار، EC به طور معنی‌داری افزایش یافت، به طوری‌که بیش‌ترین مقدار EC در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد (جدول ۵). پیرولیز باگاس نیشکر سبب کاهش مقدار EC در دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس شد، ولی بیش‌ترین مقدار EC برای بیوچار باگاس نیشکر در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد. خان‌محمدی و همکاران (Khanmohamadi

### ۳-۳- اثر نوع بقایا و دمای پیرولیز بر کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم و سدیم

مقدار کربن آلی کل در تیمارهای باگاس نیشکر به طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای بقایای پسته بود (جدول ۳). این مساله احتمالاً به دلیل کربن آلی بیش‌تر در بقایای اولیه باگاس نیشکر نسبت به پسته، و یا مقاومت ترکیبات کربن آلی باگاس نیشکر در برابر گرما می‌تواند باشد (جدول ۵). اعمال پیرولیز و افزایش دمای پیرولیز سبب کاهش معنی‌دار مقدار کربن آلی کل شد، به گونه‌ای که کم‌ترین مقدار کربن آلی کل در بیوچار تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به دست آمد (جدول ۴). به نظر می‌رسد که کربن آلی در طی فرآیند پیرولیز با افزایش دما، از فاز جامد (بیوچار) به فاز مایع یا گاز منتقل شده است. بررسی اثر متقابل نوع بقایا و دمای پیرولیز بر مقدار کربن آلی کل نشان داد که اگرچه در هر دو نوع بقایا با افزایش دمای پیرولیز، میزان کربن آلی کل بیوچار به شکل معنی‌داری کاهش یافت ولی کم‌ترین مقدار کربن آلی کل مربوط به بیوچار تولیدشده از بقایای پسته در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بود (جدول ۵). به طور کلی درصد نیتروژن کل در تیمارهای پسته به طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر بود (جدول ۳). انجام پیرولیز و افزایش دمای پیرولیز به ۳۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش معنی‌دار درصد نیتروژن کل شد (جدول ۴). افزایش دمای پیرولیز بیش از ۳۰۰ درجه موجب کاهش درصد نیتروژن کل نسبت به بقایای اولیه شد؛ هر چند تفاوت معنی‌داری بین دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مشاهده نشد. مقدار نیتروژن کل بقایای پسته و باگاس نیشکر به ترتیب ۲/۲ و ۰/۲۷ درصد به دست آمد (جدول ۵).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نوع بقایا و دمای پیرولیز و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده  
 Table 2: Analysis of variance (ANOVA) of the effects of residues type, pyrolysis temperature and their interaction on the measured chemical properties

(Mean square) میانگین مربعات									
منابع تغییرات	درجه آزادی	اسیدیته	قابلیت هدایت الکتریکی	کربن آلی کل	کربن به نیتروژن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	سدیم
Source of variance	Degree of freedom	Ph	Electrical conductivity	Total organic carbon	C/N	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Sodium
نوع بقایا (Residues type)	1	6.9**	746**	541.2**	53979**	12.4**	0.16**	49.4**	0.07**
دمای پیرولیز (Pyrolysis temperature)	3	22.1**	24.7**	639.4**	8688**	0.11**	0.01**	3.7**	0.007**
نوع بقایا×دمای پیرولیز (Residues type × Pyrolysis temperature)	1×3	1.9**	23.2**	69.6**	7709**	0.21**	0.004**	1.8**	0.002**

\*\* بیانگر اثر معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد است.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر نوع بقایا بر ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده  
 Table 3: Means' comparisons of the residues type effect on the measured chemical properties

نوع بقایا	اسیدیته	قابلیت هدایت الکتریکی	کربن آلی کل (%)	کربن به نیتروژن	نیتروژن (%)	فسفر (%)	پتاسیم (%)	سدیم (%)
Residues type	pH	Electrical conductivity (dS m <sup>-1</sup> )	Total organic carbon	C/N	Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Sodium
بقایای پسته (Pistachio residues)	9.4 <sup>a</sup>	11.8 <sup>a</sup>	30.0 <sup>a</sup>	16.2 <sup>b</sup>	1.8 <sup>a</sup>	0.2 <sup>a</sup>	1.3 <sup>a</sup>	0.2 <sup>a</sup>
باگاس نیشکر (Sugarcane bagasse)	8.3 <sup>b</sup>	0.7 <sup>b</sup>	39.5 <sup>a</sup>	111.0 <sup>a</sup>	0.4 <sup>b</sup>	0.03 <sup>b</sup>	0.4 <sup>b</sup>	0.1 <sup>b</sup>

در هر ستون حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

نیتروژن کل بقایای پسته شد و با افزایش دمای پیرولیز درصد نیتروژن کل آن کاهش معنی‌داری یافت (جدول ۵). احتمالاً ورود گروه‌های نیتروژن‌دار به صورت نیتروژن-آمونومی و یا نیتروژن-نیتراتی در دماهای کم پیرولیز و پیریدین در دماهای زیاد پیرولیز (بیشتر از ۶۰۰ درجه سلسیوس) به فاز مایع یا گاز سبب کاهش مقدار نیتروژن کل می‌شود (Bagreev *et al.*, 2001). نسبت کربن به نیتروژن (C/N) در تیمارهای باگاس نیشکر به طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای بقایای پسته بود (جدول ۳).

با اعمال پیرولیز و افزایش دمای پیرولیز، درصد نیتروژن کل در باگاس نیشکر افزایش معنی‌داری یافت؛ به گونه‌ای که درصد نیتروژن کل بیوچار تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس تقریباً دو برابر مقدار نیتروژن کل باگاس نیشکر اولیه بود. از آنجایی که مقدار کربن آلی کل در بیوچار باگاس نیشکر تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به باگاس نیشکر اولیه نصف شده است؛ به نظر می‌رسد که علی‌رغم خروج ترکیبات کربن آلی، ترکیبات نیتروژن‌دار هم‌چنان در باگاس نیشکر حفظ شده‌اند. از طرف دیگر فرآیند پیرولیز سبب کاهش درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر دمای پیرولیز (درجه سلسیوس) بر ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده

Table 4: Means' comparisons of the pyrolysis temperature (°C) effect on the measured chemical properties

سدیم (%)	پتاسیم (%)	فسفر (%)	نیتروژن (%)	کربن به نیتروژن C/N	کربن آلی کل (%)	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	اسیدیته	دمای پیرولیز
Sodium	Potassium	Phosphorus	Nitrogen	C/N	Total organic carbon	Electrical conductivity (dS m <sup>-1</sup> )	pH	Pyrolysis temperature
0.12 <sup>d</sup>	0.9 <sup>d</sup>	0.06 <sup>c</sup>	1.1 <sup>b</sup>	119.6 <sup>a</sup>	49.6 <sup>a</sup>	4.1 <sup>d</sup>	6.4 <sup>d</sup>	ماده اولیه
0.15 <sup>c</sup>	1.6 <sup>c</sup>	0.1 <sup>b</sup>	1.3 <sup>a</sup>	55.1 <sup>b</sup>	33.7 <sup>b</sup>	5.8 <sup>c</sup>	8.4 <sup>c</sup>	300°C
0.18 <sup>b</sup>	2.3 <sup>b</sup>	0.1 <sup>b</sup>	1.05 <sup>b</sup>	41.5 <sup>c</sup>	28.6 <sup>c</sup>	6.2 <sup>b</sup>	9.7 <sup>b</sup>	400°C
0.2 <sup>a</sup>	2.7 <sup>a</sup>	0.2 <sup>a</sup>	1.04 <sup>b</sup>	38.1 <sup>d</sup>	27.1 <sup>d</sup>	8.9 <sup>a</sup>	10.8 <sup>a</sup>	500°C

در هر ستون حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع بقایا و دمای پیرولیز بر ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در تیمارهای بقایای پسته و باگاس نیشکر

Table 5: Means' comparisons of residues type and pyrolysis temperature interaction effect on the measured chemical properties in pistachios residue and sugarcane bagasse treatments

باگاس نیشکر (Sugarcane bagasse)				بقایای پسته (Pistachio residues)				ویژگی (Property)
500°C	400°C	300°C	ماده اولیه	500°C	400°C	300°C	ماده اولیه	
9.9 <sup>c</sup>	9.2 <sup>d</sup>	7.4 <sup>e</sup>	6.6 <sup>f</sup>	11.7 <sup>a</sup>	10.3 <sup>b</sup>	9.4 <sup>d</sup>	6.1 <sup>g</sup>	اسیدیته (pH)
0.8 <sup>e</sup>	0.6 <sup>f</sup>	0.6 <sup>f</sup>	0.7 <sup>e</sup>	17.1 <sup>a</sup>	11.8 <sup>b</sup>	11.1 <sup>c</sup>	7.4 <sup>d</sup>	قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS m <sup>-1</sup> )
29.5 <sup>e</sup>	31.0 <sup>d</sup>	38.1 <sup>c</sup>	59.2 <sup>a</sup>	24.7 <sup>g</sup>	26.2 <sup>f</sup>	29.1 <sup>e</sup>	40.0 <sup>b</sup>	کربن آلی کل Total organic carbon (%)
0.52 <sup>d</sup>	0.43 <sup>d</sup>	0.39 <sup>de</sup>	0.27 <sup>e</sup>	1.6 <sup>c</sup>	1.7 <sup>c</sup>	1.9 <sup>b</sup>	2.2 <sup>a</sup>	نیتروژن کل Nitrogen (%)
39.4 <sup>d</sup>	71.9 <sup>c</sup>	97.6 <sup>b</sup>	219.0 <sup>a</sup>	15.8 <sup>f</sup>	15.7 <sup>f</sup>	14.4 <sup>f</sup>	17.9 <sup>e</sup>	نسبت کربن به نیتروژن (C/N)
0.05 <sup>d</sup>	0.03 <sup>e</sup>	0.03 <sup>e</sup>	0.01 <sup>f</sup>	0.28 <sup>a</sup>	0.18 <sup>b</sup>	0.19 <sup>b</sup>	0.12 <sup>c</sup>	فسفر کل Phosphorus (%)
0.70 <sup>e</sup>	0.50 <sup>f</sup>	0.40 <sup>g</sup>	0.15 <sup>h</sup>	4.7 <sup>a</sup>	4.1 <sup>b</sup>	2.8 <sup>c</sup>	1.7 <sup>d</sup>	پتاسیم کل Potassium (%)
0.12 <sup>e</sup>	0.11 <sup>ef</sup>	0.1 <sup>f</sup>	0.08 <sup>g</sup>	0.28 <sup>a</sup>	0.25 <sup>b</sup>	0.19 <sup>c</sup>	0.15 <sup>d</sup>	سدیم کل Sodium (%)

در هر ردیف حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

باگاس نیشکر به‌عنوان کود در خاک، اگر کود نیتروژنه به خاک افزوده نشود، نیتروژن خاک به شکل آلی (ساختار ریزجانداران) درآمد و گیاه دچار کلروز کمبود نیتروژن می‌شود (Safari Sinegani, 2003). لمان و روندن (Lehmann, & Rondon, 2006)، بیان نمودند که افزودن بیوچارهای با نسبت زیاد C/N به خاک در برخی مواقع می‌تواند منجر به کاهش فراهمی نیتروژن برای گیاهان زراعی شود. بررسی اثر نوع بقایا بر مقدار فسفر، پتاسیم و سدیم کل نشان داد که مقدار این عناصر در تیمارهای

انجام پیرولیز و نیز افزایش دمای پیرولیز کاهش معنی‌دار نسبت C/N در بیوچارهای تولیدشده را نسبت به بقایای اولیه در پی داشت (جدول ۴). بررسی نسبت C/N در تیمارهای باگاس نیشکر و بقایای پسته بیان‌گر کاهش معنی‌دار آن با اعمال پیرولیز است (جدول ۵)، هرچند این کاهش برای باگاس نیشکر بیش‌تری بود. به هر حال مقادیر نسبت C/N بیوچارهای پسته در بین دماهای مختلف پیرولیز تفاوت معنی‌داری نداشت. بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت در صورت استفاده از تیمارهای



در فاز جامد می‌گردد. به‌عنوان مثال ترکیبات کلرید و کلرید-سولفید عناصر سنگین به آسانی به فرم گاز تبدیل می‌شوند در حالی که ترکیبات سولفید آن‌ها در برابر تبدیل به فاز گاز بسیار مقاوم است (Yao, & Naruse, 2009). غلظت کل روی و سرب بین دماهای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری نداشت.

#### ۲- غلظت فلزات قابل عصاره‌گیری با DTPA

غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA عناصر سنگین به عنوان شکل قابل دسترس آن‌ها برای جذب گیاه در نظر گرفته می‌شود (Soltanpour, & Schwab, 1977). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در سطح آماری ۵ درصد نشان داد که اثر تیمارهای مورد بررسی بر مقادیر عناصر سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA معنی‌دار است. مقدار قابل عصاره‌گیری با DTPA عناصر آهن، روی، مس و منگنز در تیمارهای بقایای پسته به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر بود (جدول ۶). در حالی که مقدار کروم در تیمارهای باگاس نیشکر نسبت به تیمارهای بقایای پسته به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود. با انجام پیرولیز و هم‌چنین افزایش دمای پیرولیز، غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA روی، منگنز و کروم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در مورد آهن و مس، کم‌ترین غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد و افزایش دما بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA آن‌ها شد. لازم به‌ذکر است که غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA سرب در هر دو نوع بقایا و بیوچارهای آن قابل تشخیص به وسیله دستگاه جذب اتمی نبود (جداول ۶ و ۷).

گزارش شده است که پیرولیز می‌تواند شکل‌های محلول برخی فلزات سنگین را به شکل‌های با حلالیت بسیار کم تبدیل کند. برای نمونه پیرولیز می‌تواند سبب تبدیل ترکیبات قابل تبادل روی به شکل‌های اکسید و سولفید روی شود که کم‌تر قابل حل هستند (Liu et al., 2014).

بقایای پسته به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر بود (جدول ۳). انجام پیرولیز و نیز افزایش دمای پیرولیز، سبب افزایش درصد فسفر، پتاسیم و سدیم کل در بیوچارها نسبت به بقایای اولیه شد (جدول ۴). مقدار بیش‌تر این عناصر در بیوچارهای تولیدشده نسبت به بقایای اولیه به ارتباط بین عناصر مذکور با بخش معدنی بقایای کشاورزی نسبت داده می‌شود (Uchimiya et al., 2010). برای هر دو نوع بقایا تفاوت معنی‌داری در درصد فسفر کل بین دماهای ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس دیده نشد (جدول ۵). بیش‌ترین مقدار پتاسیم کل در هر دو نوع بقایا مربوط به دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سلسیوس بود. در بیوچارهای باگاس نیشکر، افزایش درصد سدیم کل با افزایش دمای پیرولیز معنی‌دار نبود (جدول ۵).

#### ۳-۴ اثر نوع بقایا و دمای پیرولیز بر عناصر سنگین

##### ۱- غلظت کل فلزات

غلظت فلزات در باگاس نیشکر و بقایای پسته و نیز بیوچار به‌دست آمده از آن‌ها کم‌تر از حد بحرانی بالایی پیشنهاد شده به‌وسیله آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) بود (US. Environmental Protection Agency, 1993). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در سطح آماری ۵ درصد نشان داد که اثر تیمارهای مورد بررسی بر مقادیر کل فلزات قابل عصاره‌گیری با اسید نیتریک معنی‌دار بود. به‌طور کلی مقدار کل عناصر آهن، روی، مس و منگنز در تیمارهای بقایای پسته به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر بود (جدول ۶). در مقابل مقدار کروم و سرب در تیمارهای باگاس نیشکر نسبت به تیمارهای بقایای پسته به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود. با تبدیل بقایای اولیه به بیوچار و نیز افزایش دمای پیرولیز، غلظت کل آهن، روی، مس، منگنز، کروم و سرب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۷). احتمالاً تجزیه ترکیبات آلی و برخی مواد معدنی مانند کربنات‌ها با افزایش دمای پیرولیز سبب افزایش غلظت عناصر سنگین

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر نوع بقایا بر غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA فلزات در تیمارهای بقایای پسته و باگاس نیشکر

Table 6: Means' comparisons of the residues type effect on the total and DTPA-extractable concentration of metals in pistachios residue and sugarcane bagasse treatments

سرب (Lead)	کروم (Chromium)	منگنز (Manganese)	مس (Copper)	روی (Zinc)	آهن (Iron)	نوع بقایا (Residues type)
غلظت کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total concentration (mg/kg)						
2.8 <sup>b</sup>	7.0 <sup>b</sup>	122.0 <sup>a</sup>	20.7 <sup>a</sup>	45.2 <sup>a</sup>	4736 <sup>a</sup>	بقایای پسته (Pistachio residues)
21.0 <sup>a</sup>	10.0 <sup>a</sup>	22.5 <sup>b</sup>	6.5 <sup>b</sup>	25.5 <sup>b</sup>	775 <sup>b</sup>	باگاس نیشکر (Sugarcane bagasse)
غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم) DTPA-extractable concentration (mg/kg)						
ND	0.6 <sup>b</sup>	14.9 <sup>a</sup>	2.1 <sup>a</sup>	4.3 <sup>a</sup>	26.3 <sup>a</sup>	بقایای پسته (Pistachio residues)
ND	0.9 <sup>a</sup>	3.4 <sup>b</sup>	0.5 <sup>b</sup>	2.5 <sup>b</sup>	5.6 <sup>b</sup>	باگاس نیشکر (Sugarcane bagasse)

در هر ستون حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است. ND: در حد تشخیص به وسیله دستگاه جذب اتمی نبود.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر دمای پیرولیز بر غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA فلزات در تیمارهای بقایای پسته و باگاس نیشکر

Table 7: Means' comparisons of the pyrolysis temperature (°C) effect on the total and DTPA-extractable concentration of metals in pistachios residues and sugarcane bagasse treatments

سرب (Lead)	کروم (Chromium)	منگنز (Manganese)	مس (Copper)	روی (Zinc)	آهن (Iron)	دمای پیرولیز (Pyrolysis temperature)
غلظت کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Total concentration (mg/kg)						
11.6 <sup>b</sup>	7 <sup>c</sup>	56 <sup>d</sup>	11 <sup>c</sup>	19 <sup>c</sup>	1104 <sup>d</sup>	ماده اولیه
11.6 <sup>b</sup>	6 <sup>c</sup>	62 <sup>c</sup>	12 <sup>c</sup>	37 <sup>b</sup>	2421 <sup>c</sup>	300°C
11.9 <sup>ab</sup>	9 <sup>b</sup>	79 <sup>b</sup>	14.5 <sup>b</sup>	42 <sup>a</sup>	3305 <sup>b</sup>	400°C
12.6 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	93 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>	43 <sup>a</sup>	4192 <sup>a</sup>	500°C
غلظت قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی‌گرم بر کیلوگرم) DTPA-extractable concentration (mg/kg)						
ND	0.5 <sup>c</sup>	11.8 <sup>a</sup>	1.8 <sup>a</sup>	6.6 <sup>a</sup>	9.9 <sup>c</sup>	ماده اولیه
ND	0.5 <sup>c</sup>	11.4 <sup>a</sup>	0.7 <sup>d</sup>	3.6 <sup>b</sup>	8.4 <sup>d</sup>	300°C
ND	1.0 <sup>b</sup>	10.4 <sup>b</sup>	1.2 <sup>c</sup>	2.3 <sup>c</sup>	11.6 <sup>b</sup>	400°C
ND	1.1 <sup>a</sup>	3.2 <sup>c</sup>	1.5 <sup>b</sup>	1.2 <sup>d</sup>	33.8 <sup>a</sup>	500°C

در هر ستون حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است. ND: در حد تشخیص به وسیله دستگاه جذب اتمی نبود.

ضروری به نظر می‌رسد. ۳) به‌طور کلی مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سدیم با انجام پیرولیز افزایش یافت و مقدار آن‌ها در تیمارهای بقایای پسته بیش‌تر از تیمارهای باگاس نیشکر به‌دست آمد. پیرولیز موجب افزایش مقدار کل عناصر آهن، روی، مس، منگنز، کروم و سرب در بیوچار هر دو نوع بقایا نیز شد. ۴) با توجه به مقادیر pH، EC، C/N و عناصر اندازه‌گیری شده، برای تهیه بیوچار باگاس نیشکر دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در این پژوهش به‌عنوان دمای بهینه تعیین گردید. درباره پیرولیز بقایای پسته هرچند دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس مناسب به‌نظر می‌رسد اما به‌دلیل EC زیاد بیوچارهای تولید شده استفاده از بیوچار آن در خاک‌های کشاورزی نیاز به مدیریت دارد. بنابراین ضروری است پژوهش‌های بیش‌تری در مورد

## نتیجه‌گیری

۱) در فرآیند تولید بیوچار از باگاس نیشکر و بقایای پسته، افزایش دمای پیرولیز موجب کاهش مقدار تولید فاز جامد (عملکرد بیوچار) و افزایش میزان فازهای گاز و مایع (شیرابه) شد. اعمال پیرولیز سبب افزایش pH هر دو نوع بقایا شد، در حالی‌که اثر دمای پیرولیز بر مقدار و روند تغییرات شوری بسته به نوع ماده اولیه متفاوت بود. ۲) با انجام فرآیند پیرولیز، در هر دو نوع بقایا مقدار کربن آلی کل و نسبت C/N کاهش یافت. این یافته می‌تواند به‌عنوان نقطه مثبتی برای کاربرد بیوچار به‌جای ماده اولیه این پسماندهای آلی در خاک در نظر گرفته شود. هرچند نسبت C/N در تیمارهای باگاس نیشکر به‌طور کلی زیاد بود و استفاده از کود نیتروژن به همراه آن به‌منظور جلوگیری از آلی‌شدن نیتروژن خاک توسط ریزجانداران

کاربرد بیوجار بقایای پسته در خاک همراه با آبشویی یا  
 برای کاشت گیاهان متحمل به شوری انجام شود.  
 از دانشگاه صنعتی اصفهان به‌خاطر تامین هزینه‌های این  
 پژوهش قدردانی می‌شود.

### تشکر و قدردانی

### References

- Bagreev, A., Bandosz, T. J., & Locke, D. C. (2001). Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. *Carbon*, 39(13), 1971-1979.
- Black, C. A., Evans, D. D., & Dinauer, R. C. (1965). *Methods of soil analysis* (Vol. 9, pp. 653-708). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Blakemore, L. C. (1987). *Methods for chemical analysis of soils*. NZ Soil Bureau scientific report, 80, 71-76.
- Blackwell, P., Riethmuller, G., & Collins, M. (2009). Biochar application to soil. *Biochar for environmental management: science and technology*, 207-226.
- Bremner, J. M., Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., ... & Sumner, M. E. (1996). Nitrogen-total. *Methods of soil analysis. Part 3-chemical methods*. 1085-1121.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419-428.
- Ebrahimi, S. (2014). The effect of mycorrhizal fungi, sewage sludge and its biochar on the soil structural indexes and soil physical quality under corn plantation. MSc Thesis, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology (In Persian with English 1 abstract).
- Fu, P., Yi, W., Bai, X., Li, Z., Hu, S., & Xiang, J. (2011). Effect of temperature on gas composition and char structural features of pyrolyzed agricultural residues. *Bioresource Technology*, 102(17), 8211-8219.
- Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., & Mosaddeghi, M. R. (2015). Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management & Research*, 0734242X14565210.
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., & Nelson, P. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 223-228.
- Ibrahim, H. M., Al-Wabel, M. I., Usman, A. R., & Al-Omran, A. (2013). Effect of Conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. *Soil Science*, 178(4), 165-173.
- Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3), 443-449.
- Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). *Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. Biological approaches to sustainable soil systems*. CRC Press, Boca Raton, FL, 517-530.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
- Liu, T., Liu, B., & Zhang, W. (2014). Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(1), 271-275.
- McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and organic matter. *Nutrient management module*, 8, 1-11 Available.
- Pattiya, A. (2011). Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. *Bioresource Technology*, 102(2), 1959-1967.

- Rostamian, R. (2014). Preparation of carbonaceous adsorbents from rice husk and canola stalk and their application in desalination of water. PhD Thesis, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology (In Persian with English abstract).
- Safari Sinegani, A. A. (2003). Soil Biology and Biochemistry. Published by Bu-Ali Sina University (In Persian).
- Shirani, H., Rizabandi, E., Mosaddeghi, M. R., & Dashti, H. (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.
- Soltanpour, P. A., & Schwab, A. P. (1977). A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro-nutrients in alkaline soils 1. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 8(3), 195-207.
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macedo, J. L. V., Blum, W. E., & Zech, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and soil*, 291(1-2), 275-290.
- Uchimiya, M., Lima, I. M., Klasson, K. T., & Wartelle, L. H. (2010). Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. *Chemosphere*, 80(8), 935-940.
- US. Environmental Protection Agency. 1993. Clean water act, Section 503, Vol. 58, No. 32, USEPA, Washington, DC.
- US Environmental Protection Agency. 1996. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. Method 3050 B, USEPA, Washington, DC.
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). Biochar application to soils. Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg.
- Wei, L., Xu, S., Zhang, L., Zhang, H., Liu, C., Zhu, H., & Liu, S. (2006). Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 863-871.
- Yao, H., & Naruse, I. (2009). Using sorbents to control heavy metals and particulate matter emission during solid fuel combustion. *Particuology*, 7(6), 477-482.
- Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource technology*, 102(3), 3488-3497.

## Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical Properties of Sugarcane Bagasse and Pistachio residues Biochar

Zahra Khanmohammadi<sup>1</sup>, Majid Afyuni<sup>2</sup> and Mohammad Reza Mosaddeghi<sup>3</sup>

(Received: March 2015

Accepted: September 2015)

### Abstract

Organic wastes from agricultural activities have created short- and long-term problematic consequences for farmers and environment. Sugarcane bagasse and pistachio residues are considered important agricultural residues for which application management is necessary. One of the management approaches is the pyrolysis process and transforming the residues into biochar. This study was conducted to investigate some characteristics of sugarcane bagasse, pistachios residues (dried foliar parts) and their biochars produced at different pyrolysis temperatures (300, 400 and 500 °C). The results showed increasing the pyrolysis temperature significantly reduced the percent of solid phase (i.e. biochar's efficiency) and increased gas and liquid (leachate) phases (LSD<sub>0.05</sub>). Moreover, increasing the pyrolysis temperature from 300 to 500 °C significantly increased the biochar's pH from 8.4 to 10.8. Pyrolysis led to an increment in the total content of nutrients for both residues. In addition, carbon to nitrogen ratio in the biochars was lower than that in the original residues. In general, total contents of nitrogen, phosphorus, potassium and sodium were greater in the pistachio treatments than in the sugarcane bagasse treatments. Since the sugarcane bagasse's biochars have less nutrients and higher carbon than the pistachio's biochars, careful management is needed for their application in the soil as a fertilizer and amendment. On the other hand, salinity of the pistachio residues and its biochars was greater than that of sugarcane bagasse treatments. Therefore, it is probably necessary to combine application of biochar of pistachio residues with soil leaching, or to use it for cultivation of salt-resistant plants. Pyrolysis increased the total contents of iron, zinc, copper, manganese, nickel, chromium and lead in the biochars of both residues. Based on our results, it seems that the best pyrolysis temperatures for biochar production from pistachio residues and sugarcane bagasse are 300 and 500 °C, respectively.

**Keywords:** Biochar, Pyrolysis, Pistachios residues, Sugarcane bagasse, Nutrients.

1- P.h.D Student, Department of Soil Science, Isfahan University of Technology, Iran.

2- Professor, Department of Soil Science, Isfahan University of Technology, Iran.

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Isfahan University of Technology, Iran.

Corresponding author: [zahra\\_khanmohammadi@yahoo.com](mailto:zahra_khanmohammadi@yahoo.com)