

## تغییرات برخی ویژگی‌های شیمیایی مواد آلی مختلف پس از تبدیل به بیوچار و هیدروچار

یاسر عظیم‌زاده<sup>۱\*</sup>، نصرت اله نجفی<sup>۲</sup>، الناز عبدالملکی<sup>۳</sup>، بهناز امیرلو<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۹)

### چکیده

بیوچار و هیدروچار مواد جامد کربنی هستند که از کربونیزه‌شدن زیست‌توده‌های آلی تولید شده و باعث ترسیب کربن و بهبود حاصلخیزی خاک می‌شوند. هدف از این پژوهش، تبدیل زیست‌توده‌های مختلف شامل لجن فاضلاب، کود مرغی، تفاله چغندر قند، کاه و کلش گندم و ضایعات چوب سیب به بیوچار و هیدروچار و بررسی ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها بود. همچنین، با استفاده از یک آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با ۳ تکرار، اثر بیوچار و هیدروچار چوب سیب در حضور و عدم حضور کود مونوکلسیم فسفات بر pH، EC و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم فراهم خاک بررسی شد. برای تولید بیوچار از فرایند گرماکافت آهسته با دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و مدت یک ساعت و برای تولید هیدروچار از فرایند کربونیزه‌شدن گرمایی در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس، فشار ۱۱ بار و مدت ۱۲ ساعت استفاده شد. بعد از تبدیل زیست‌توده‌ها به بیوچار و هیدروچار، درصد عملکرد بیوچارها و هیدروچارها و pH، EC، درصد خاکستر و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، منگنز، مس و روی در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچارهای تولید شده بررسی شد. نتایج نشان داد که درصد خاکستر و غلظت عناصر در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار کود مرغی و لجن فاضلاب بیشتر از تفاله چغندر قند، کاه و کلش گندم و ضایعات چوب سیب بود. pH همه بیوچارها بیشتر از ۷ و pH همه هیدروچارها (به جز هیدروچار کود مرغی) کمتر از ۷ بود. با مصرف بیوچار چوب در خاک، pH خاک افزایش و با مصرف توأم هیدروچار چوب و کود فسفر در خاک، pH خاک کاهش یافت. در هر دو حالت با و بدون مصرف کود فسفر در خاک، pH و EC خاک در حضور هیدروچار کمتر از بیوچار بود. بین کود فسفر و بیوچار و هیدروچار در افزایش فسفر فراهم خاک یک برهم‌کنش هم‌افزایی مشاهده شد. اثر مصرف بیوچار، هیدروچار و کود فسفر بر پتاسیم و سدیم فراهم خاک معنادار نشد. با توجه به pH اسیدی هیدروچارهای مورد مطالعه و افزایش غلظت برخی عناصر غذایی در بیوچارها و هیدروچارهای مورد مطالعه، مصرف بیوچار و هیدروچار همراه با کود فسفر در خاک‌های آهکی می‌تواند توصیه شود.

**واژه‌های کلیدی:** عناصر غذایی، فسفر، کربونیزه‌شدن گرمایی، گرماکافت، ماده آلی

عظیم‌زاده ی، نجفی ن، عبدالملکی ا، امیرلو ب. ۱۳۹۸. تغییرات برخی ویژگی‌های شیمیایی مواد آلی مختلف پس از تبدیل به بیوچار و هیدروچار. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷، شماره ۴، صفحه: ۱-۱۷.

۱-دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲-دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳-دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* پست الکترونیک: [yaser.azimzadeh@gmail.com](mailto:yaser.azimzadeh@gmail.com)

## مقدمه

(مانند بیوچار و هیدروچار تولید شده از کود مرغی و دامی)، می‌توانند مانند یک کود کندرها، بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را فراهم کنند. غلظت عناصر بیوچار و هیدروچار به شدت به نوع زیست‌توده وابسته است؛ با این حال، معمولاً بیوچار نسبت به هیدروچار دارای غلظت عناصر بیشتری می‌باشد (Kibue, 2018; Naeem *et al.*, 2014; Novak *et al.*, 2018). بیوچار به علت غلظت زیاد عناصر قلیایی معمولاً دارای pH قلیایی بوده و هیدروچار به علت غلظت کمتر عناصر قلیایی و داشتن برخی از ترکیب‌های اسیدی در ساختار خود، غالباً pH اسیدی دارد (Bargmann *et al.*, 2013). باتوجه به اینکه برخی از مواد آلی حاوی بذور علف‌های هرز و یا میکروبهای بیماری‌زا هستند، کربونیزه کردن (گرماکافت و HTC) باعث از بین رفتن بذور علف‌های هرز و میکروبهای خطرناک در زیست‌توده‌های مختلف از جمله لجن فاضلاب و کود مرغی می‌شود (Lehmann *et al.*, 2011; Libra *et al.*, 2011). علاوه بر آن، با کربونیزه کردن زیست‌توده‌های حاوی فلزات سنگین مانند لجن فاضلاب می‌توان پویایی و فراهمی فلزات سنگین را در آن‌ها کاهش داد (Ahmad *et al.*, 2018). بنابراین، استفاده از فناوری کربونیزه کردن مواد آلی و افزودن آن‌ها به خاک از جهت‌های مختلف دارای اهمیت است؛ به طوری که لایرد (Laird, 2008) سناریوی «برد-برد-برد» را در این مورد به کار برد و بیان کرد که بیوچار هم‌زمان باعث «تولید انرژی زیستی، ترسیب کربن و بهبود کیفیت آب و خاک» می‌شود. هیدروچار علاوه بر بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش حاصلخیزی آن (Bargmann *et al.*, 2013; Novak *et al.*, 2014)، به علت pH اسیدی می‌تواند در افزایش فراهمی برخی عناصر غذایی در خاک‌های قلیایی ایران نقش مفیدی داشته باشد. از جمله مزیت‌های هیدروچار نسبت به بیوچار می‌توان به عملکرد بیشتر (Hu *et al.*, 2010)، pH کمتر (اسیدی) (Bargmann *et al.*, 2013) و مصرف کمتر انرژی برای تولید (Hu *et al.*, 2010) اشاره کرد (Reza *et al.*, 2014). پرا و همکاران (Perera *et al.*, 2015) با بررسی ویژگی‌های هیدروچارهای تولید شده از کود مرغی در دماهای مختلف، بیان کردند که دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس برای این فرایند مناسب است. با این حال، اثر بیوچار و هیدروچار بر خاک به ویژگی‌های آن بستگی داشته و نوع زیست‌توده نقش تعیین‌کننده‌ای در ویژگی-

کربن آلی خاک به عنوان یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی کیفیت خاک، نقش مهمی در تولید پایدار ایفا نموده و از تخریب خاک جلوگیری می‌نماید. با افزودن مواد آلی به خاک می‌توان ذخیره کربن آلی خاک را افزایش داد ولی مواد آلی به علت مقاومت کم در برابر فرایندهای تجزیه زیستی و غیرزیستی، به سرعت در خاک تجزیه شده و از بین می‌رود. با کربونیزه کردن زیست‌توده‌های آلی و تبدیل آن‌ها به بیوچار<sup>۱</sup> و هیدروچار<sup>۲</sup> می‌توان سرعت تجزیه زیست‌توده را کاهش و اثر باقی‌مانده آن را در خاک افزایش داد. علاوه بر آن، تبدیل زیست‌توده به هیدروچار و به ویژه بیوچار باعث ترسیب کربن می‌شود (Kibue, 2018). بیوچار ماده جامد سیاه‌رنگ کربنی است که از حرارت دادن زیست‌توده در شرایط اکسیژن کم و یا بدون اکسیژن در دمای ۷۰۰-۳۰۰ درجه سلسیوس و طی فرایندی به نام گرماکافت تولید می‌شود (Joseph & Lehmann, 2009). هیدروچار، یک ماده جامد قهوه‌ای با ویژگی‌هایی مشابه لیگنیت<sup>۳</sup> می‌باشد که از حرارت دادن زیست‌توده در داخل یک سامانه بسته، در حضور یک مایع (عمدتاً آب)، در فشار ۳۰-۱۰ بار و دمای ۲۳۰-۱۸۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود. فرایند تولید هیدروچار را کربونیزه‌شدن گرمایی (HTC)<sup>۴</sup> می‌نامند (Fang *et al.*, 2015).

بیوچار و هیدروچار می‌توانند با افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش داده (Abel *et al.*, 2013) و با افزایش تخلخل و تهویه خاک، مانع از تشکیل و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله متان، اکسید نیتروژن و دی‌اکسید کربن شوند. همچنین، به علت سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبتاً زیاد، می‌توانند عناصر غذایی را در خاک نگهداری و از آبشویی و هدررفت آن‌ها جلوگیری کرده (Laird *et al.*, 2010) و پویایی آلاینده‌ها را در خاک کاهش دهند (Ahmad *et al.*, 2018; Joseph & Lehmann, 2009). بدین ترتیب، بیوچار و هیدروچار می‌تواند با بهبود ویژگی‌های خاک، کارایی مصرف عناصر غذایی و کودها را افزایش دهد. علاوه بر آن، برخی از بیوچارها و هیدروچارها بسته به نوع ماده اولیه

1. Biochar
2. Hydrochar
3. Lignite
4. Hydrothermal carbonization, HTC

چوب حاصل از هرس درختان سیب بر pH، EC و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم قابل جذب گیاه در خاک بود.

### مواد و روش‌ها

زیست‌توده‌های مورد استفاده شامل لجن فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میانه استان آذربایجان شرقی، کود مرغی از مرغداری ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز، تفاله چغندر قند، کاه و کلش گندم و چوب حاصل از هرس درختان سیب به ترتیب از کارخانه قند میاندوآب، یک مزرعه گندم و یک باغ سیب واقع در شهرستان میاندوآب استان آذربایجان غربی تهیه شدند. زیست‌توده‌ها خرد و از دو الک ۱ و ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و ذرات به اندازه ۱ تا ۲ میلی‌متر برای تولید بیوپچار و هیدروچار مورد استفاده قرار گرفتند.

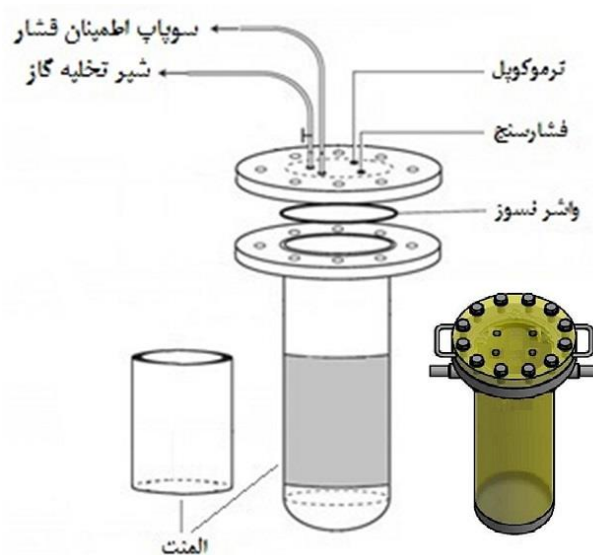
برای تبدیل زیست‌توده‌ها به هیدروچار از دستگاه کربونیزه‌شدن گرمایی (دستگاه HTC) استفاده شد. این دستگاه با الگوبرداری از (Schneider et al., 2011) در دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. شکل ۱، تصویر شماتیک دستگاه HTC مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مخزن دستگاه به شکل یک سیلندر و از جنس استیل ضدزنگ و مقاوم به خوردگی به ضخامت ۰/۹، قطر داخلی ۱۰ و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر ساخته شد. درپوش مخزن به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر، به وسیله پیچ و مهره به سیلندر بسته شد. حرارت مورد نیاز مخزن به وسیله یک المنت برقی با توان ۲۵۰۰ وات تأمین شد که بر روی سطح بیرونی مخزن تعبیه شده بود. یک عدد سوپاپ اطمینان فشار در دستگاه تعبیه شد که برای مواقعی که فشار درون مخزن بیش از حد افزایش یافت، مانع از انفجار مخزن شود. بعد از اتمام فرایند HTC و قبل از باز کردن درپوش، گازهای تولید شده در طی واکنش، به وسیله یک شیر تخلیه گاز که در درپوش تعبیه شده بود، تخلیه شد. دمای درون مخزن به وسیله یک ترموکوپل و فشار آن به وسیله یک فشارسنج تعیین و ثبت شد. برای تولید هیدروچار، مقدار مشخصی از هر زیست‌توده به همراه مقدار مشخصی آب مقطر با نسبت زیست‌توده به آب ۵ به ۱ به درون مخزن دستگاه ریخته و درب آن محکم بسته شد. نمونه‌های زیست‌توده در داخل دستگاه در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و در فشار ۱۱ اتمسفر به مدت ۱۲ ساعت حرارت داده شد. سرعت متوسط افزایش دمای درون

های بیوپچار و هیدروچار دارد. به عنوان مثال، وانگ و همکاران (Wang et al., 2013) دو زیست‌توده چوبی شامل چوب بامبو و نارون و پنج زیست‌توده علفی شامل بقایای کاه و کلش گندم، پوشال برنج، کلش ذرت، سبوس برنج و پوست نارگیل را در دو دمای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس به بیوپچار تبدیل کرده و ویژگی‌های زیست‌توده‌ها و بیوپچارهای تولید شده را بررسی کردند. آنان گزارش کردند که با تبدیل زیست‌توده‌ها به بیوپچار نه تنها ویژگی‌های زیست‌توده‌ها به شدت تغییر یافت، بلکه ویژگی‌های بیوپچارهای تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف بسیار تحت تأثیر نوع زیست‌توده قرار گرفت. همچنین اسمیت و همکاران (Smith et al., 2016) با بررسی ویژگی‌های هیدروچارهای تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف شامل چوب درخت بید، چوب بلوط، ضایعات گلخانه‌ای، ضایعات مواد غذایی، پسماندهای شهری، لجن فاضلاب، جلبک و غیره نشان دادند که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هیدروچارهای تولید شده به نوع زیست‌توده وابستگی بسیاری داشت. علاوه بر آن، باتوجه به تفاوت فرایندهای گرماکافت و HTC، شدت و نوع سازوکارهای کربونیزه‌شدن در این دو فرایند متفاوت بوده و ویژگی‌های بیوپچار و هیدروچارهای تولید شده از یک زیست‌توده یکسان، متفاوت است. به عنوان مثال، سان و همکاران (Sun et al., 2014) با مقایسه ویژگی‌های بیوپچارها و هیدروچارهای تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف نشان دادند که علاوه بر اینکه ویژگی‌های بیوپچار و هیدروچار به شدت تحت تأثیر نوع زیست‌توده قرار داشت، بلکه ویژگی‌های بیوپچار و هیدروچار تولید شده از یک زیست‌توده یکسان نیز متفاوت بود.

بنابراین، باتوجه به اثرهای مفید بیوپچار و هیدروچار بر ویژگی‌های خاک و محیط زیست و لزوم کاربرد آن در خاک‌های دچار کمبود ماده آلی ایران، بررسی ویژگی‌های بیوپچارها و هیدروچارهای تولید شده از مواد آلی مختلف قبل از افزودن آن‌ها به خاک اهمیت زیادی دارد. هدف از این پژوهش تبدیل زیست‌توده‌های کود مرغی، لجن فاضلاب، تفاله چغندر قند، چوب حاصل از هرس درختان سیب و کاه و کلش گندم به بیوپچار و هیدروچار و بررسی برخی ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها شامل pH، EC، درصد خاکستر و غلظت عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در آن‌ها و سپس بررسی اثر بیوپچار و هیدروچار تولید شده از

۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه بود.

مخزن تا رسیدن به دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس برابر با



شکل ۱- تصویر شماتیک دستگاه HTC ساخته شده در این پژوهش

Figure 1. Schematic representation of the HTC reactor manufactured in this study

$$A (\%) = \frac{W_A}{W_B} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه‌ها،  $Y$ ،  $W_C$ ،  $W_B$ ،  $A$  و  $W_A$  به ترتیب عملکرد بر حسب درصد، وزن آن خشک بیوجار یا هیدروچار بر حسب گرم، وزن آن خشک ماده آلی خام بر حسب گرم، خاکستر بر حسب درصد و وزن خاکستر بر حسب گرم می‌باشد. در زیست‌توده‌ها، بیوجارها و هیدروچارهای تولید شده، برخی از ویژگی‌های شیمیایی مهم نظیر pH و EC (Fang et al., 2015) و غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، منگنز، مس و روی تعیین شد. برای تجزیه عنصری، ابتدا نمونه زیست‌توده، بیوجار و یا هیدروچار در داخل کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شد. سپس با استفاده از محلول ۲ مولار HCl هضم و از کاغذ صافی عبور داده شد (Fang et al., 2015). در عصاره‌های به دست آمده، غلظت سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر مدل CORNING 410، فسفر با روش آبی اسید آسکوربیک و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل SU6100 ساخت شرکت Philler Scientific آمریکا (Murphy & Riley, 1962) و غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن، منگنز، مس و روی با استفاده از

بعد از اتمام واکنش، مخلوط حاصل با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف و بخش جامد (هیدروچار) از بخش مایع جدا شد. سپس در آن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و مدت ۴۸ ساعت خشک شد (Fang et al., 2015; Zhang et al., 2014). برای تولید بیوجار، مقدار مشخصی از زیست‌توده در داخل یک محفظه فلزی استوانه‌ای قرار داده شد و سپس برای کاهش اکسیژن داخل محفظه، زیست‌توده در داخل محفظه فلزی فشرده شد و درب آن محکم بسته شد. سپس در داخل کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس با سرعت افزایش دمای ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه به مدت یک ساعت گرم‌ماکافت شد (Song & Guo 2012). سپس هر یک از بیوجارهای تولید شده از داخل محفظه فلزی خارج و برای تعیین ویژگی‌های مورد نظر مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین درصد خاکستر، نمونه‌های زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار در داخل کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس در مدت ۱۲ ساعت به خاکستر تبدیل شد عملکرد بیوجار و هیدروچار با استفاده از رابطه ۱ (Kang et al., 2012) و درصد خاکستر زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار با استفاده از رابطه ۲ (Fang et al., 2015) محاسبه شد:

$$Y (\%) = \frac{W_C}{W_B} \times 100 \quad (1)$$

## Archive of SID

تصادفی با ۳ تکرار بررسی شد. فاکتورهای آزمایش شامل نوع اصلاحگر افزوده شده به خاک شامل (بیوچار، هیدروچار و بدون اصلاحگر) و کود فسفر در ۲ سطح (صفر و ۸۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) بود. خاک مورد مطالعه از عمق ۰-۳۰ سانتی متری یک مزرعه در ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت پوشان دانشگاه تبریز (38°01'15.1"N و 46°25'18.8"E) نمونه برداری و برخی از ویژگی‌های آن با استفاده از روش‌های استاندارد متداول (Dane & Topp, 2002; Page *et al.*, 1982) تعیین شد (جدول ۱).

دستگاه طیفسنج جذب اتمی مدل AA-6300 Shimadzu، ساخت ژاپن اندازه‌گیری شد. غلظت نیترژن زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار با روش کج‌دال (Jones, Jr, 2001) تعیین شد.

برای بررسی اثر بیوچار و هیدروچار بر ویژگی‌های خاک، بیوچار و هیدروچار تولید شده از ضایعات حاصل از هرس درختان سیب به علت غلظت کم عناصر غذایی انتخاب شد تا برهم‌کنش آن‌ها با کود فسفر نیز در خاک بررسی شود. اثر بیوچار و هیدروچار بر pH، EC و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم قابل جذب گیاه در خاک با استفاده از یک آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soil

Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
Soil Texture		Sandy loam	Available-P		4.8
Soil Taxonomy 2014		Fine, mixed, active, mesic Typic Calcixerepts	Available-K		188
pH <sub>e</sub>		7.59	Available-Fe		2.13
EC <sub>e</sub>	dS m <sup>-1</sup>	2.57	Available-Zn	mg kg <sup>-1</sup>	0.65
Calcium carbonate equivalent		30.7	Available-Cu		0.56
Organic carbon	%	0.79	Available-Mn		7.3
Total N		0.05			

مورد استفاده برای تعیین غلظت عناصر در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار تعیین شد. آزمایش بررسی ویژگی‌های زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار به صورت طرح پایه کاملاً تصادفی با تیمارهای نوع زیست‌توده شامل چوب سیب، کاه و کلش گندم، تفاله چغندر قند، لجن فاضلاب و کود مرغی و بیوچار و هیدروچار حاصل از آنها (در مجموع با ۱۵ تیمار) و ۳ تکرار انجام شد. تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SPSS مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

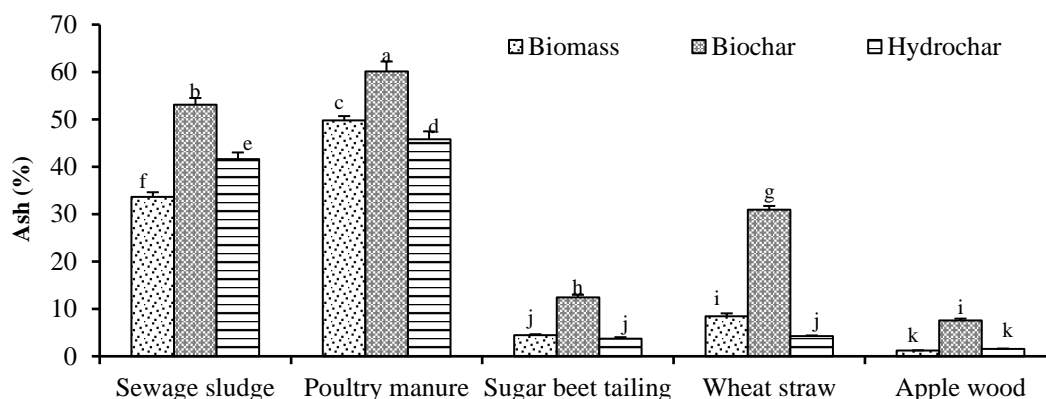
## خاکستر و عملکرد

نتایج مقایسه میانگین‌های درصد خاکستر زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف در شکل ۲ شکل ۲ ارائه شده است. ترتیب درصد خاکستر در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار کود مرغی < لجن فاضلاب < کاه و کلش گندم < تفاله چغندر قند < چوب

این خاک آهکی بود و کمبود فسفر و مواد آلی داشت. دو کیلوگرم از خاک مذکور با ۲۰ گرم از بیوچار و هیدروچار مخلوط و به داخل گلدان‌های ۵ کیلوگرمی ریخته شد. سپس با استفاده از آب مقطر، رطوبت خاک به ظرفیت مزرعه‌ای رسانده و به مدت ۱۵ روز نگهداری شد. سپس کود فسفر از منبع مونوکلسیم فسفات (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) تهیه شده از شرکت مرک آلمان به صورت محلول در آب مقطر به تیمارهای دارای فسفر افزوده شد. خاک همه گلدان‌ها با استفاده از آب مقطر، به روش وزنی آبیاری و در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای به مدت ۱۰۰ روز در گلخانه نگه داشته شد. سپس pH در تعلیق ۱:۱ خاک به آب، بعد از نیم ساعت تکان دادن با سرعت ۱۷۰ دور در دقیقه تعیین شد و EC در عصاره صاف‌شده این تعلیق اندازه‌گیری شد (Page *et al.*, 1982). سپس خاک هر گلدان با استفاده از عصاره‌گیر سلطان‌پور و شواب (Soltanpour & Schwab, 1977) عصاره‌گیری و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم در عصاره‌ها با همان روش‌های

احتمالاً به درصد عناصر معدنی بیشتر در کود مرغی و لجن فاضلاب مربوط می‌باشد.

سیب به‌دست آمد. درصد خاکستر زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار کود مرغی و لجن فاضلاب بیشتر از مواد لیگنوسلولزی (چوب، کاه و کلش و تفاله چغندر) بود که



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های درصد خاکستر زیست‌توده‌ها، بیوجارها و هیدروچارهای مختلف

Figure 2. Means comparison of ash percentage of different biomasses, biochars, and hydrochars

میانگین‌های با یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

Means followed by the same letter are not significantly different at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.

شده از هریک از زیست‌توده‌های مورد بررسی نسبت به زیست‌توده و هیدروچار مربوطه درصد خاکستر بیشتری داشت (شکل ۲). درصد خاکستر زیست‌توده تابع درصد عناصر معدنی موجود در آن است و تغییرات درصد عملکرد در بیوجار و هیدروچار، می‌تواند درصد عناصر معدنی و خاکستر آن را تحت‌تأثیر قرار دهد (Wang *et al.*, 2013)؛ به‌طوری‌که معمولاً با افزایش درصد عملکرد بیوجار یا هیدروچارهای تولید شده از یک زیست‌توده یکسان، غلظت عناصر معدنی در بیوجار و هیدروچار کاهش یافته و درصد خاکستر کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، بهشتی و علیخانی (Beheshti & Alikhani, 2016) درصد خاکستر زیست‌توده کاه و کلش گندم را ۷/۶۸ درصد به‌دست آوردند و گزارش کردند که با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس، عملکرد بیوجار تولید شده از کاه و کلش گندم از حدود ۵۵ درصد به کمتر از ۳۰ درصد کاهش و خاکستر آن به میزان ۲۵ درصد افزایش یافت. با این‌حال، بیوجار کود مرغی در مقایسه با سایر بیوجارها هم دارای بیشترین عملکرد (۶۵/۶ درصد) و هم بیشترین درصد خاکستر (۶۰/۲ درصد) بود (شکل ۲) که به‌علت وجود درصد خاکستر و احتمالاً ناخالصی (شن و خاک) زیاد در زیست‌توده کود مرغی می‌باشد که بیوجار نیز آن را به ارث برده است. نتایج مقایسه میانگین‌های درصد عملکرد بیوجار و

با این‌حال، بخشی از عملکرد زیاد بیوجار کود مرغی و لجن فاضلاب و همچنین درصد خاکستر زیاد در زیست‌توده و بیوجار کود مرغی و لجن فاضلاب ممکن است به وجود ناخالصی‌ها و موادی نظیر ذرات شن و خاک در کود مرغی و لجن فاضلاب مربوط باشد. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2013) تغییرات گسترده‌ای را برای درصد خاکستر بیوجارهای تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف گزارش کردند (۱/۱ تا ۴۶/۸ درصد). آنان درصد خاکستر به‌دست آمده از زیست‌توده‌های علفی (کلش گندم، ذرت و برنج) را به‌طور میانگین ۳۰/۹ درصد گزارش کردند در حالی‌که درصد خاکستر بیوجارهای تولید شده از چوب بامبو و نارون را ۲/۲ درصد به‌دست آوردند.

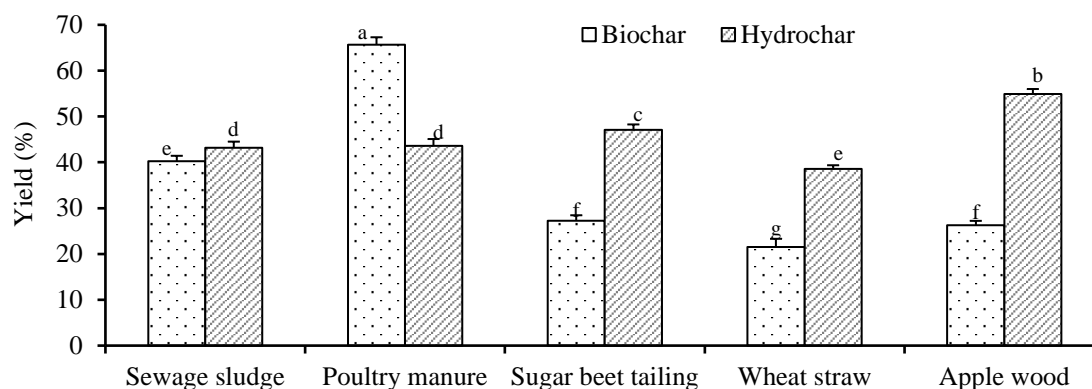
زیست‌توده‌های علفی نسبت به زیست‌توده‌های چوبی معمولاً درصد عناصر بیشتری دارند. به همین علت غلظت عناصر بیوجارهای تولید شده از زیست‌توده‌های علفی بیشتر از چوبی می‌باشد (Sun *et al.*, 2014). کمترین درصد خاکستر در زیست‌توده، هیدروچار و بیوجار چوب سیب به‌ترتیب ۱/۲۲، ۱/۵۵ و ۷/۵۶ درصد به‌دست آمد که به غلظت کم عناصر معدنی در ساختار آن مربوط می‌باشد. گوکیلا و باسکار (Gokila & Baskar, 2015) درصد خاکستر بیوجار تولید شده از چوب کهور<sup>۱</sup> در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس را ۱/۴ درصد گزارش کردند. بیوجار تولید

1. Prosopis



به فرایند HTC از دمای بیشتری استفاده می‌شود و فرایند HTC برخلاف گرماکافت در داخل یک فاز مایع (عمدتاً آب) و زیر فشار و حرارت انجام می‌شود.

هیدروچار تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که درصد عملکرد هیدروچارهای تولید شده (به جز هیدروچار کود مرغی) بیشتر از بیوچار بود (شکل ۳). در فرایند گرماکافت نسبت



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های درصد عملکرد بیوچارها و هیدروچارهای تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف  
Figure 3. Means comparison of yield percentage of biochars and hydrochars produced from different biomasses  
میانگین‌های با یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.  
Means followed by the same letter are not significantly different at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.

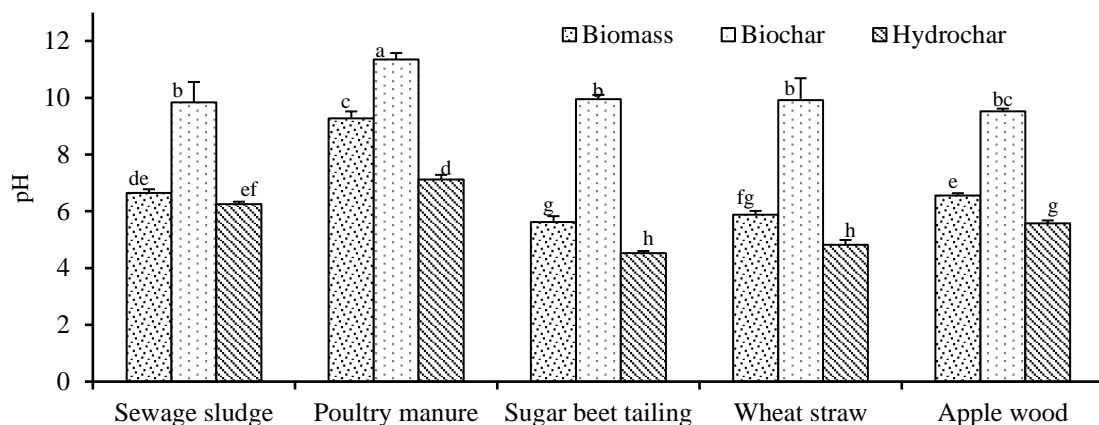
به همین علت، در فرایند گرماکافت درصد بسیار کمتری از عناصر معدنی و درصد بیشتری از اکسیژن و هیدروژن از ساختار ماده آلی خارج می‌شود؛ ولی در فرایند HTC به- علت حضور هم‌زمان آب، فشار و حرارت، درصد بیشتری از عناصر معدنی و درصد کمتری از اکسیژن و هیدروژن نسبت به بیوچار از ساختار ماده آلی خارج می‌شود (Sun *et al.*, 2014). در مورد هیدروچار کود مرغی، در طی فرایند HTC احتمالاً بخش زیادی از ترکیب‌های معدنی موجود در کود مرغی در حضور آب داغ زیر فشار حل شده و به همراه بخشی از ترکیب‌های آلی وارد بخش مایع هیدروچار شده است؛ ولی در فرایند گرماکافت به علت عدم حضور آب داغ، بخش زیادی از این ترکیب‌های معدنی در ساختار بیوچار باقی مانده و باعث افزایش عملکرد بیوچار کود مرغی نسبت به سایر مواد آلی شده است. زیست‌توده لجن فاضلاب نسبت به کود مرغی درصد عناصر معدنی و خاکستر کمتری داشت (شکل ۲) و احتمالاً حل‌پذیری عناصر معدنی آن در فرایند HTC کمتر از کود مرغی بوده است و به همین علت درصد عملکرد هیدروچار و بیوچار تولید شده از آن نزدیک به هم بود (شکل ۳). عملکرد بیوچار کود مرغی و لجن فاضلاب بیشتر از بیوچارهای تولید شده از مواد لیگنوسلولزی (تفاله چغندر قند، چوب

سیب و کاه و کلش گندم) بود که احتمالاً به درصد بیشتر ناخالصی‌ها و عناصر معدنی در زیست‌توده کود مرغی و لجن فاضلاب مربوط می‌باشد. نجفی قیری (Najafi-Ghiri, 2015) درصد عملکرد بیوچارهای بقایای ذرت، گندم، پنبه و کنجد و چوب ذرت تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس را به ترتیب ۳۳، ۳۶، ۳۸، ۳۷ و ۳۰ درصد گزارش کرد در حالی که عملکرد بیوچارهای تولید شده از کود مرغی در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۹۵/۸، ۷۱/۰ و ۶۳/۹ درصد گزارش شده است (Zolfi Bavariani *et al.*, 2016). عملکرد هیدروچار چوب سیب < تفاله چغندر قند < کود مرغی = لجن فاضلاب < کاه و کلش گندم به دست آمد که نشان می‌دهد چوب سیب به علت ساختار سخت و خشبی، در برابر حرارت و فشار در طی فرایند HTC مقاومت بیشتری داشته است. معمولاً زیست‌توده‌های علفی و زیست‌توده‌هایی که ساختمان غیرخشبی دارند، بیشتر از فرایند HTC متأثر می‌شوند (Smith *et al.*, 2016). فانگ و همکاران (Fang *et al.*, 2015) عملکرد هیدروچار تولید شده از چوب گردو، باگاس نیشکر و پوست بادام‌زمینی در ۲۰۰ درجه سلسیوس و مدت زمان ۶ ساعت را به ترتیب برابر ۵۴/۶، ۴۷/۸ و ۵۰/۶ درصد به دست آوردند. عملکرد

## EC و pH

نتایج مقایسه میانگین‌های pH زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است. pH زیست‌توده و هیدروچار کود مرغی < لجن فاضلاب < چوب سیب < تفاله چغندر قند = کاه و کلش گندم بود. pH بیوجار کود مرغی < لجن فاضلاب < چوب سیب = تفاله چغندر قند = کاه و کلش گندم بود.

کمتر هیدروچار کود مرغی و لجن فاضلاب نسبت به تفاله چغندر و چوب (شکل ۳)، احتمالاً به علت حل‌پذیری بیشتر زیست‌توده در طی HTC و خارج شدن نمک‌های معدنی و برخی از ترکیب‌های آلی از آن و یا ناشی از درصد کمتر لیگنین زیست‌توده می‌باشد (Kang et al., 2012).



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های pH زیست‌توده‌ها، بیوجارها و هیدروچارهای مورد مطالعه

Figure 4. Means comparison of pH in studied biomasses, biochars, and hydrochars

میانگین‌های با یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

Means followed by the same letter are not significantly different at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.

pH زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار کود مرغی را ۷/۳۸ به دست آوردند و گزارش کردند که بعد از تبدیل زیست‌توده کود مرغی به بیوجار در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، pH آن به ۹/۹۸ افزایش یافت. بهشتی و علیخانی (Beheshti & Alikhani, 2016) pH زیست‌توده کاه و کلش گندم را ۶/۶۴ به دست آوردند و گزارش کردند که بعد از تبدیل زیست‌توده به بیوجار در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، pH آن به حدود ۱۰/۸ افزایش یافت. کمترین مقدار pH در هیدروچار تفاله چغندر قند (۴/۵۲) و کاه و کلش گندم (۴/۸۲) مشاهده شد. به جز pH هیدروچار کود مرغی که ۷/۱۲ بود، تمام هیدروچارهای تولید شده کمتر از ۷ (اسیدی) بود؛ در حالی که pH تمام بیوجارهای تولید شده بیشتر از ۹/۵ بود (شکل ۴). هیدروچار بر خلاف بیوجار، به علت داشتن درصد کمتری از عناصر قلیایی و داشتن برخی از ترکیب‌های اسیدی در ساختار خود، غالباً pH اسیدی دارد. بارجمن و همکاران (Bargmann et al., 2013) pH بیوجار تولید شده از چوب را ۱۲/۱ و حدود ۳

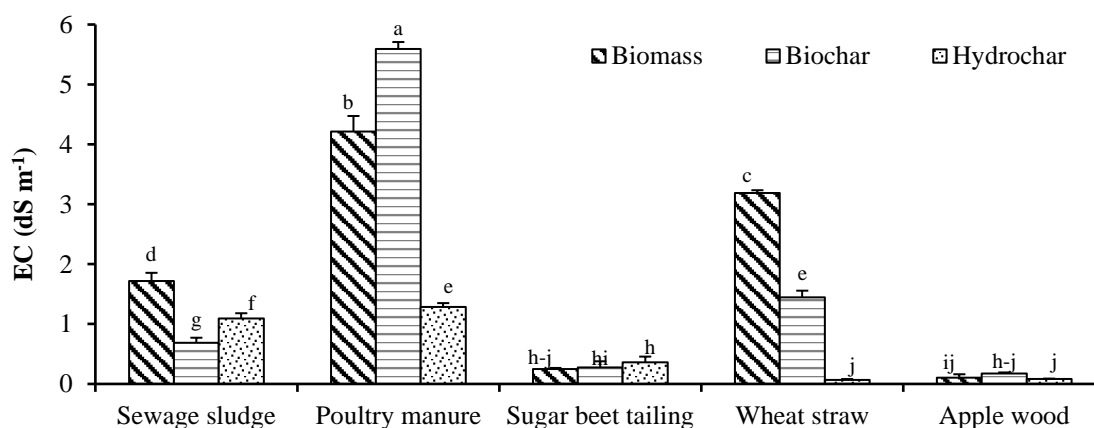
pH زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار کود مرغی بیشتر از زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار لجن فاضلاب، تفاله چغندر قند، کاه و کلش گندم و چوب سیب بود که به علت درصد خاکستر بیشتر و غلظت زیاد عناصر معدنی به ویژه عناصر قلیایی و قلیایی خاکی از جمله سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در زیست‌توده، بیوجار و هیدروچار کود مرغی می‌باشد (Wang et al., 2013). سونگ و گو (Song & Guo, 2012) با مشاهده یک رابطه همبستگی مثبت و قوی بین درصد خاکستر و pH بیوجار به این نتیجه رسیدند که بیوجارهای با خاکستر زیاد دارای pH بیشتری بودند. نجفی قیری (Najafi-Ghiri, 2015) pH بیوجارهای بقایای ذرت، گندم، پنبه و کنجد و چوب ذرت تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس را به ترتیب ۹/۶۲، ۱۰/۰۴، ۹/۵۴، ۹/۴۲ و ۹/۷۹ گزارش کرد. بررسی ما نشان داد که با تبدیل تمام زیست‌توده‌های مورد مطالعه به بیوجار pH آن‌ها افزایش و با تبدیل آن‌ها به هیدروچار pH آن‌ها کاهش یافت (شکل ۴). زلفی باوریانی و همکاران (Zolfi



مقدار EC بسته به نوع زیست توده و کربونیزه شدن بسیار متفاوت بود. بیشترین مقدار EC در زیست توده، بیوچار و هیدروچار به ترتیب ۴/۲۱، ۵/۵۹ و ۱/۲۸ دسی زیمنس بر متر و در کود مرغی مشاهده شد که به درصد خاکستر بیشتر (شکل ۲) و غلظت زیاد عناصر قلیایی نظیر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در زیست توده، بیوچار و هیدروچار کود مرغی مربوط می باشد. همچنین، EC کمتر در زیست توده، بیوچار و هیدروچار چوب سیب و تفاله چغندر به درصد خاکستر و عناصر قلیایی کمتر در آن‌ها مربوط می باشد.

برابر بیشتر از pH هیدروچار تولید شده از همان چوب به دست آوردند. کاهش pH هیدروچار ممکن است به علت وجود برخی از اسیدهای آلی در ساختار هیدروچار و یا حل شدن و خروج بخشی از عناصر قلیایی (سدیم و پتاسیم) و قلیایی خاکی (کلسیم و منیزیم) از ساختار آن باشد (Bargmann *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2015). با توجه به pH اسیدی هیدروچار، کاربرد آن در خاک‌های قلیایی می تواند باعث تعدیل pH خاک و در نتیجه، بهبود فراهمی برخی عناصر غذایی مانند فسفر و عناصر غذایی کم مصرف شود.

نتایج مقایسه میانگین‌های EC زیست توده، بیوچار و هیدروچار مورد مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های EC زیست توده‌ها، بیوچارها و هیدروچارهای مورد مطالعه

Figure 5. Means comparison of EC in studied biomasses, biochars, and hydrochars

میانگین‌های با یک حرف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

Means followed by the same letter are not significantly different at  $p \leq 0.05$  by Duncan's multiple range test.

بیوچار مربوط دانستند. با این حال، با توجه به شکل ۵، با تبدیل لجن فاضلاب و کاه و کلش گندم به بیوچار، EC آن‌ها کاهش یافت در حالی که با توجه به شکل ۲، با تبدیل این دو زیست توده به بیوچار، درصد خاکستر هر دو افزایش یافت. بنابراین، EC بیوچار علاوه بر درصد خاکستر ممکن است به وسیله عامل‌های دیگری نیز کنترل شود که احتمالاً حل پذیری و یا پویایی عناصر در بیوچار یکی از این عامل‌ها می باشد؛ زیرا نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که با تبدیل زیست توده به بیوچار، پویایی و فراهمی بسیاری از عناصر در بیوچار کاهش می یابد (Zhang *et al.*, 2014) گرماکافت ممکن است سبب شکستن پیوندهای بین عناصر و تشکیل پیوندهای جدید

نجفی قیری (Najafi-Ghiri, 2015) EC بیوچارهای بقایای ذرت، گندم، پنبه و کنجد و چوب ذرت را به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۴۷، ۰/۲۳، ۰/۳۹ و ۰/۲۴ دسی زیمنس بر متر گزارش کرد. سونگ و گو (Song & Guo, 2012) با مشاهده یک رابطه همبستگی بهشتی و علیخانی (Beheshti & Alikhani, 2016) زیست توده کاه و کلش گندم را در دماهای مختلف (از ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس) به بیوچار تبدیل و مشاهده کردند که با افزایش دمای گرماکافت، درصد عملکرد بیوچار کاهش و درصد خاکستر آن افزایش یافت. آنان گزارش کردند که با افزایش درصد خاکستر بیوچار، pH و EC بیوچار افزایش یافت و این افزایش را به غلیظ شدن عناصر به ویژه عناصر قلیایی در

در بیوپچار تفاله چغندر قند و بیشترین غلظت نیتروژن و آهن در بیوپچار لجن فاضلاب مشاهده شد. با تبدیل کود مرغی به بیوپچار، غلظت همه عناصر مورد بررسی به جز نیتروژن در آن افزایش یافت. بیوپچار لجن فاضلاب نسبت به زیست‌توده آن دارای فسفر، پتاسیم، کلسیم، سدیم، آهن و روی بیشتری بود.

غلظت پتاسیم، منیزیم، کلسیم، منگنز، سدیم، آهن و روی بیوپچار کاه و کلش گندم بیشتر از زیست‌توده آن بود. بعد از تبدیل تفاله چغندر قند به بیوپچار غلظت کلسیم، سدیم، آهن، منگنز و روی در آن افزایش یافت. غلظت سدیم، آهن، مس و روی در بیوپچار چوب بیشتر از زیست‌توده آن بود (جدول ۲). بهشتی و علیخانی (Beheshti & Alikhani, 2016) غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم را در زیست‌توده کاه و کلش گندم به ترتیب ۴/۷۳، ۱/۷۴، ۲/۴۳، ۱/۱۴، ۰/۷۶ و ۰/۵۲ گرم بر کیلوگرم گزارش کردند و نشان دادند که بعد از تبدیل زیست‌توده به بیوپچار در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، غلظت این عناصر در بیوپچارهای تولید شده به ترتیب به ۴/۶۱، ۱/۹۸، ۲/۸۸، ۱/۹۳، ۱/۱۳ و ۰/۸۹ گرم بر کیلوگرم تغییر یافت. غلظت عناصر در بیوپچار و هیدروچار به غلظت عناصر در زیست‌توده اولیه و شرایط کربونیزه‌شدن بستگی دارد و ممکن است غلظت عناصر در زیست‌توده‌های یکسان که در شرایط متفاوت کربونیزه‌شدن قرار می‌گیرند متفاوت باشد (Sun et al., 2014).

احتمالاً متفاوت بودن غلظت‌های عناصر گزارش شده برای بیوپچارها و یا هیدروچارهای تهیه شده از زیست‌توده‌های یکسان و شرایط کربونیزه‌شدن یکسان ناشی از همین موضوع باشد. افزایش غلظت عناصر در بیوپچار نسبت به زیست‌توده به تغلیظ این عناصر در بیوپچار مربوط می‌باشد که در طی فرایند گرماکافت با خروج اکسیژن و هیدروژن از زیست‌توده و کاهش عملکرد در بیوپچار تغلیظ شده‌اند؛ ولی کاهش غلظت نیتروژن در بیوپچار نسبت به زیست‌توده به علت خروج آن از ساختار زیست‌توده به صورت گاز در طی فرایند گرماکافت می‌باشد. نیتروژن در دماهای بالا معمولاً به صورت گازهای اکسید نیتروژن و یا ترکیب‌های با وزن مولکولی کم از زیست‌توده خارج می‌شود (Song & Guo, 2012). سونگ و گو (Guo, 2012) بیان کردند که با رسیدن دمای گرماکافت به ۴۰۰ درجه سلسیوس، بیش از ۵۶ درصد نیتروژن کود مرغی به صورت

و قوی‌تر بین آن‌ها شود و همچنین ممکن است برخی از ترکیب‌های معدنی در داخل شبکه کربنی پیچیده و بسیار مقاوم بیوپچار به دام افتاده و به راحتی قادر به خروج از این شبکه نباشد (Fuertes et al., 2010).

با تبدیل لجن فاضلاب و کاه و کلش گندم به بیوپچار، EC آن‌ها کاهش ولی با تبدیل کود مرغی به بیوپچار EC آن افزایش یافت. بیوپچار کود مرغی دارای بیشترین pH (۱۱/۳۵) (شکل ۴) و EC (۵/۵۹ دسی‌زیمنس بر متر) (شکل ۵) بود. از آنجایی که کود مرغی فاقد ساختار کربنی منظم و پیوسته (مانند کاه و کلش) می‌باشد، تثبیت و محبوس شدن عناصر و ترکیب‌های معدنی در ساختار بیوپچار آن چندان رخ نداده و با تبدیل کود مرغی به بیوپچار، غلظت عناصر معدنی در بیوپچار افزایش یافته و باعث افزایش EC آن شده است. بر همین اساس، انتظار می‌رود که درصد زیست‌فراهمی عناصر معدنی در بیوپچار کود مرغی بیشتر از بیوپچارهای علفی و چوبی باشد. زلفی باوریانی و همکاران (Zolfi Bavariani et al., 2016) نیز افزایش EC بیوپچار کود مرغی نسبت به زیست‌توده آن را گزارش کردند. آنان EC کود مرغی را ۶/۰۶ دسی‌زیمنس بر متر و EC بیوپچارهای تولید شده از آن در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس را به ترتیب ۸/۵۹، ۸/۹۶ و ۱۵/۳ دسی‌زیمنس بر متر به دست آوردند.

با تبدیل لجن فاضلاب، کود مرغی و کاه و کلش گندم به هیدروچار، EC آن‌ها کاهش یافت و در مورد تفاله چغندر قند و چوب سیب تغییر معنادار مشاهده نشد (شکل ۵). کاهش EC با تبدیل زیست‌توده به هیدروچار، به حل شدن و خروج عناصر معدنی از ساختار زیست‌توده مربوط می‌باشد (Smith et al., 2016). عدم تفاوت معنادار EC هیدروچار تفاله چغندر قند و چوب سیب نسبت به زیست‌توده احتمالاً به درصد کمتر عناصر معدنی در زیست‌توده و مقاومت زیاد زیست‌توده در برابر فرایند HTC مربوط می‌باشد.

#### غلظت عناصر زیست‌توده، بیوپچار و هیدروچار

مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر مورد بررسی در زیست‌توده، بیوپچار و هیدروچار برای اثر متقابل نوع ماده آلی و نوع زیست‌توده در جدول ۲ ارائه شده است. بیشترین غلظت فسفر، پتاسیم، منیزیم، سدیم، منگنز و مس در بیوپچار کود مرغی، بیشترین غلظت کلسیم و روی

هیدروچار تنها غلظت روی در آن افزایش یافت. افزایش غلظت عناصر در هیدروچار به علت کاهش جرم آن و غلیظ شدن عناصر در هیدروچار مربوط می‌باشد. کاهش غلظت نیتروژن در هیدروچار لجن فاضلاب و کود مرغی نسبت به زیست‌توده احتمالاً به حل شدن و خروج ترکیب‌های نیتروژن‌دار از ساختار زیست‌توده مربوط می‌باشد. در هیدروچار، بخشی از عناصری که بر اثر واکنش‌های HTC از ساختار زیست‌توده خارج می‌شوند، ممکن است دوباره جذب ساختار متخلخل هیدروچار شده و منجر به افزایش غلظت این عناصر در هیدروچار شوند (Petrović *et al.*, 2016). به‌عنوان مثال، پتروویچ و همکاران (Petrović *et al.*, 2016) گزارش کردند که افزایش غلظت فسفر، کلسیم، آهن و منگنز در هیدروچار نسبت به زیست‌توده به جذب دوباره فسفر از طریق تشکیل پل‌های کاتیونی با  $Ca^{2+}$ ،  $Fe^{2+}$  و  $Mn^{2+}$  به‌وسیله هیدروچار مربوط می‌باشد. بنابراین، احتمالاً افزایش هم‌زمان غلظت فسفر، کلسیم، آهن، منگنز و روی در هیدروچار کود مرغی ناشی از همین فرضیه باشد.

#### EC، pH و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم قابل جذب گیاه در خاک

مقایسه میانگین‌های EC، pH و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم قابل جذب گیاه در خاک برای اثر متقابل کود فسفر و نوع اصلاحگر در جدول ۳ ارائه شده است. مصرف بیوچار در خاک pH خاک را نسبت به تیمار بدون اصلاحگر افزایش داد؛ اما بعد از مصرف کود فسفر در خاک، pH خاک در حضور بیوچار و تیمار بدون اصلاحگر تفاوت معنادار نداشت. افزایش pH خاک در حضور بیوچار به pH زیاد بیوچار مربوط می‌باشد. به‌طور کلی، بیوچارها به علت غلظت زیاد عناصر قلیایی مانند پتاسیم و کلسیم غالباً دارای pH قلیایی بوده و ممکن است pH خاک را افزایش دهند. کلووس و همکاران (Kloss *et al.*, 2014) نشان دادند که بیوچار تولید شده از چوب باعث افزایش pH و EC خاک شد. اثر بیوچار و هیدروچار بر pH خاک به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد. اثر مستقیم بیوچار و هیدروچار بر pH خاک به دلیل pH خود بیوچار و هیدروچار می‌باشد؛ اما اثر غیرمستقیم آن بر pH خاک از طریق سازوکارهای مختلف از جمله تحت‌تأثیر قرار دادن تعداد و فعالیت ریزجانداران خاک و افزایش ترشحات

گازهای  $N_2O$ ،  $NO$  و  $NO_2$  از زیست‌توده خارج و یا به صورت ترکیب‌های آلی با وزن مولکولی کم وارد روغن زیستی می‌شود و به همین علت پیشنهاد کردند که بیوچار کودهای دامی و مرغی که دارای درصد نیتروژن بیشتری می‌باشند باید در دماهای کمتری تولید شوند تا از هدررفت نیتروژن آن‌ها جلوگیری شود. غلظت نیتروژن در بیوچارهای کود مرغی و لجن فاضلاب بیشتر از بیوچار علفی (کاه و کلش) و در آن بیشتر از بیوچار چوبی بود (جدول ۲). وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2013) غلظت نیتروژن را در بیوچارهای علفی بیشتر از بیوچارهای چوبی به دست آوردند و بیان کردند که غلظت نیتروژن کمتر در بیوچارهای چوبی ممکن است منجر به نسبت C:N بالا در این بیوچارها شود. بالا بودن نسبت C:N در بیوچار ممکن است منجر به ناپویا شدن نیتروژن و القای موقتی کمبود نیتروژن در خاک شود.

غلظت فسفر، پتاسیم، سدیم و منگنز در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار کود مرغی بیشتر از لجن فاضلاب و در آن بیشتر از مواد لیگنوسلولزی بود؛ ولی غلظت آهن در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار لجن فاضلاب بیشتر از کود مرغی و در آن بیشتر از مواد لیگنوسلولزی بود. همچنین، غلظت منیزیم و مس در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار کود مرغی بیشتر از زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار سایر مواد آلی مورد مطالعه بود (جدول ۲).

زلفی باورپانی و همکاران (Zolfi Bavariani *et al.*, 2016) غلظت فسفر، پتاسیم، آهن، روی، منگنز و مس در کود مرغی را به ترتیب  $۱۰/۴$ ،  $۳۳/۴$ ،  $۱/۰۲۲$ ،  $۱/۵۳۸$ ،  $۰/۴۱۷$  و  $۰/۰۹۸$  گرم بر کیلوگرم گزارش کردند. آنان بیان کردند که بعد از تبدیل کود مرغی به بیوچار در دمای  $۴۰۰$  درجه سلسیوس، غلظت این عناصر در بیوچار به ترتیب به  $۱۷/۲$ ،  $۵۵/۹$ ،  $۱/۷۰۱$ ،  $۰/۸۹۵$ ،  $۰/۶۶۷$  و  $۰/۱۶۴$  گرم بر کیلوگرم تغییر یافت. با تبدیل زیست‌توده به هیدروچار، غلظت کلسیم و آهن در هیدروچار لجن فاضلاب افزایش ولی غلظت فسفر، سدیم و روی در آن کاهش یافت.

غلظت فسفر، کلسیم، آهن، منگنز و روی در هیدروچار کود مرغی افزایش ولی غلظت پتاسیم و سدیم در آن کاهش یافت. غلظت کلسیم و مس در هیدروچار تفاله چغندرقد افزایش ولی غلظت روی در آن کاهش یافت. غلظت کلسیم، منیزیم، آهن و روی در هیدروچار کاه و کلش گندم افزایش یافت و با تبدیل زیست‌توده چوب به

اسیدی و CO<sub>2</sub> حاصل از تنفس آنها به خاک می‌باشد. خاک تجزیه شده و ترکیباتی مانند اسیدهای آلی به خاک علاوه بر آن، بیوچار و به‌ویژه هیدروچار به مرور زمان در اضافه می‌کند که در pH خاک نقش دارند.

جدول ۲- مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر در زیست‌توده‌ها، بیوچارها و هیدروچارهای مختلف

Table 2. Means comparison of nutrient concentrations in different biomasses, biochars and hydrochars

Organic matter type	Nutrient concentration (g kg <sup>-1</sup> )									
	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn
Sewage sludge initial biomass	4.26 <sup>a</sup>	22.83 <sup>e</sup>	2.43 <sup>de</sup>	16.5 <sup>i</sup>	1.11 <sup>fg</sup>	2.79 <sup>ef</sup>	2.80 <sup>d</sup>	0.14 <sup>d</sup>	0.13 <sup>cd</sup>	0.39 <sup>ef</sup>
Poultry manure initial biomass	3.25 <sup>b</sup>	32.47 <sup>d</sup>	16.36 <sup>b</sup>	42.4 <sup>d</sup>	10.28 <sup>bc</sup>	5.52 <sup>b</sup>	1.28 <sup>f</sup>	0.97 <sup>c</sup>	0.55 <sup>b</sup>	0.25 <sup>i</sup>
Sugar beet tailing initial biomass	0.53 <sup>e</sup>	0.53 <sup>h</sup>	1.07 <sup>d-f</sup>	44.0 <sup>d</sup>	1.47 <sup>e-g</sup>	0.63 <sup>h-j</sup>	0.21 <sup>j</sup>	0.02 <sup>fg</sup>	0.07 <sup>d</sup>	0.27 <sup>h</sup>
Wheat straw initial biomass	0.45 <sup>ef</sup>	1.27 <sup>gh</sup>	2.24 <sup>de</sup>	18.0 <sup>hi</sup>	2.23 <sup>e-g</sup>	0.69 <sup>h-j</sup>	0.61 <sup>gh</sup>	0.03 <sup>fg</sup>	0.07 <sup>d</sup>	0.33 <sup>g</sup>
Apple wood initial biomass	0.35 <sup>e-g</sup>	0.15 <sup>h</sup>	0.58 <sup>ef</sup>	1.64 <sup>j</sup>	0.46 <sup>g</sup>	0.33 <sup>j</sup>	0.33 <sup>ij</sup>	0.01 <sup>g</sup>	0.08 <sup>d</sup>	0.13 <sup>l</sup>
Sewage sludge biochar	4.26 <sup>a</sup>	42.70 <sup>b</sup>	5.14 <sup>c</sup>	24.1 <sup>g</sup>	2.53 <sup>ef</sup>	4.23 <sup>c</sup>	4.50 <sup>a</sup>	0.18 <sup>d</sup>	0.23 <sup>cd</sup>	0.49 <sup>c</sup>
Poultry manure biochar	1.28 <sup>d</sup>	70.12 <sup>a</sup>	25.64 <sup>a</sup>	70.5 <sup>b</sup>	19.00 <sup>a</sup>	10.32 <sup>a</sup>	2.97 <sup>c</sup>	1.26 <sup>a</sup>	1.12 <sup>a</sup>	0.45 <sup>d</sup>
Sugar beet tailing biochar	0.25 <sup>fg</sup>	1.76 <sup>gh</sup>	2.58 <sup>d</sup>	95.7 <sup>a</sup>	3.31 <sup>e</sup>	2.52 <sup>f</sup>	0.74 <sup>g</sup>	0.09 <sup>e</sup>	0.08 <sup>d</sup>	1.12 <sup>a</sup>
Wheat straw biochar	0.54 <sup>e</sup>	4.42 <sup>g</sup>	5.25 <sup>c</sup>	34.8 <sup>e</sup>	8.79 <sup>c</sup>	3.55 <sup>d</sup>	1.46 <sup>e</sup>	0.10 <sup>e</sup>	0.22 <sup>cd</sup>	1.04 <sup>b</sup>
Apple wood biochar	0.15 <sup>g</sup>	0.40 <sup>h</sup>	1.90 <sup>d-f</sup>	5.74 <sup>j</sup>	1.57 <sup>e-g</sup>	1.27 <sup>g</sup>	1.56 <sup>e</sup>	0.02 <sup>fg</sup>	0.51 <sup>b</sup>	0.38 <sup>f</sup>
Sewage sludge hydrochar	3.33 <sup>b</sup>	14.58 <sup>f</sup>	1.52 <sup>d-f</sup>	21.4 <sup>gh</sup>	1.80 <sup>e-g</sup>	0.93 <sup>gh</sup>	3.51 <sup>b</sup>	0.14 <sup>d</sup>	0.20 <sup>cd</sup>	0.27 <sup>hi</sup>
Poultry manure hydrochar	2.16 <sup>c</sup>	38.14 <sup>c</sup>	5.21 <sup>c</sup>	60.3 <sup>c</sup>	10.58 <sup>b</sup>	3.08 <sup>e</sup>	2.63 <sup>d</sup>	1.11 <sup>b</sup>	0.68 <sup>b</sup>	0.38 <sup>f</sup>
Sugar beet tailing hydrochar	0.58 <sup>e</sup>	0.92 <sup>gh</sup>	0.25 <sup>f</sup>	66.9 <sup>b</sup>	1.0 <sup>e-g</sup>	0.80 <sup>hi</sup>	0.28 <sup>j</sup>	0.03 <sup>fg</sup>	0.30 <sup>c</sup>	0.19 <sup>k</sup>
Wheat straw hydrochar	0.56 <sup>e</sup>	1.22 <sup>gh</sup>	0.54 <sup>ef</sup>	29.7 <sup>f</sup>	5.76 <sup>d</sup>	0.48 <sup>ij</sup>	1.15 <sup>f</sup>	0.07 <sup>ef</sup>	0.06 <sup>d</sup>	0.40 <sup>e</sup>
Apple wood hydrochar	0.36 <sup>e-g</sup>	0.18 <sup>h</sup>	1.09 <sup>d-f</sup>	1.62 <sup>j</sup>	0.42 <sup>g</sup>	0.41 <sup>ij</sup>	0.46 <sup>hi</sup>	0.01 <sup>g</sup>	0.10 <sup>d</sup>	0.22 <sup>j</sup>

میانگین‌های دارای کمیته یک حرف لاتین مشترک در هر ستون، با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند.

The means with at least one common letter in each column have no significant difference according to Duncan's multiple range test at 5% probability level

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های pH، EC و غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم قابل جذب گیاه در خاک برای اثر متقابل کود فسفر و نوع

## اصلاحگر

Table 3. Means comparison of soil pH, EC, and available P, K, and Na for the interaction effects of P-fertilizer and amendment type

P fertilizer (mg kg <sup>-1</sup> )	Amendment type	EC	pH	P	K	Na
		(dS m <sup>-1</sup> )		(mg kg <sup>-1</sup> )		
0	No amendment	1.28 <sup>d</sup>	7.66 <sup>bc</sup>	4.99 <sup>c</sup>	120.8 <sup>a</sup>	86.2 <sup>a</sup>
	Biochar	1.58 <sup>b</sup>	7.87 <sup>a</sup>	4.15 <sup>c</sup>	134.1 <sup>a</sup>	90.7 <sup>a</sup>
	Hydrochar	1.35 <sup>d</sup>	7.61 <sup>bc</sup>	4.98 <sup>c</sup>	124.6 <sup>a</sup>	85.0 <sup>a</sup>
80	No amendment	1.38 <sup>cd</sup>	7.75 <sup>ab</sup>	22.61 <sup>b</sup>	126.7 <sup>a</sup>	94.2 <sup>a</sup>
	Biochar	1.75 <sup>a</sup>	7.73 <sup>ab</sup>	28.74 <sup>a</sup>	142.6 <sup>a</sup>	99.5 <sup>a</sup>
	Hydrochar	1.48 <sup>bc</sup>	7.52 <sup>d</sup>	31.31 <sup>a</sup>	137.7 <sup>a</sup>	98.9 <sup>a</sup>

میانگین‌های دارای کمیته یک حرف لاتین مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنادار با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

The means with at least one common letter in each column have no significant difference according to Duncan's multiple range test at 5% probability level

خاک به عامل‌های متعددی بستگی دارد (Kloss *et al.*, 2014; Novak *et al.*, 2014). مقدار بیوچار و هیدروچار مصرف شده، ظرفیت بافری خاک و pH اولیه خاک نیز ممکن است بر تغییرهای pH خاک مؤثر باشد؛ به‌طوری‌که

همچنین، کاتیون‌هایی که از بیوچار و هیدروچار به محلول خاک آزاد می‌شوند به مکان‌های تبادل خاک جذب شده و یون‌های H<sup>+</sup> را به محلول خاک آزاد و باعث کاهش pH خاک می‌شوند. بنابراین، اثر بیوچار و هیدروچار بر pH

خاک در حضور بیوپچار به رهاسازی آنیون‌ها و کاتیون‌ها به محلول خاک بر اثر فرایندهای حل‌شدن و معدنی‌شدن بیوپچار مربوط است که منجر به افزایش EC محلول خاک شده است. این در حالی است که هیدروچار به علت غلظت کمتر عناصر بر EC محلول خاک اثر معناداری نداشت و از این جهت مصرف آن در خاک‌هایی که شورند یا در مرز شوری هستند، می‌تواند مناسب باشد. بیوپچار و هیدروچار ممکن است با تشدید فعالیت میکروبی باعث افزایش رهاسازی یون‌ها به محلول خاک و افزایش EC محلول خاک شود. همچنین، خود بیوپچار و هیدروچار به عنوان مواد آلی، قابلیت جذب و تبادل عناصر و تشکیل کیلیت با برخی عناصر را داشته و می‌تواند با این روش بر غلظت یون‌های محلول خاک مؤثر باشد (Lehmann et al., 2011).

زلفی باوریانی و همکاران (Zolfi Bavariani et al., 2016) نشان دادند که بیوپچار تهیه شده از کود مرغی باعث افزایش pH و EC محلول خاک شد و علت آن را به آزادسازی عناصر قلیایی از بیوپچار به محلول خاک مربوط دانستند. همچنین، نعیم و همکاران (Naeem et al., 2018) گزارش کردند که مصرف بیوپچار کلش گندم باعث افزایش EC محلول خاک شد. مصرف کود فسفر در خاک باعث افزایش معنادار غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک شد (جدول ۳) که به افزایش فسفر محلول خاک مربوط می‌باشد. بااینکه با افزودن کود فسفر به خاک ممکن است بخش زیادی از آن در خاک تثبیت شود اما قسمتی از آن وارد بخش قابل جذب گیاه در خاک می‌شود و معمولاً با افزودن کود فسفر به خاک، مقدار فسفر قابل جذب گیاه در خاک افزایش می‌یابد (Havlin et al., 2005). در شرایط بدون مصرف کود فسفر در خاک، بیوپچار و هیدروچار بر غلظت فسفر قابل جذب گیاه در خاک اثر معنادار نداشت که به غلظت کم فسفر بیوپچار و هیدروچار و سرعت کم معدنی‌شدن آنها مربوط می‌باشد؛ اما با مصرف کود فسفر در خاک، غلظت فسفر فراهم خاک در حضور بیوپچار و هیدروچار نسبت به تیمار بدون اصلاحگر به‌طور معنادار افزایش یافت که برهم‌کنش هم‌افزایی بیوپچار و کود فسفر را نشان می‌دهد. در خاک دچار کمبود ماده آلی و فسفر مورد مطالعه، برهم‌کنش هم‌افزایی کود فسفر با بیوپچار و هیدروچار بر افزایش فراهمی فسفر خاک، ممکن است به نقش این اصلاحگرهای آلی در اصلاح و بهبود ویژگی‌های

ممکن است اثر بیوپچار بر pH خاک‌های آهکی معنادار نباشد (Zhao et al., 2014).

بیوپچار به‌عنوان زیستگاه مناسب ریزجانداران خاک، رطوبت و عناصر غذایی را در اختیار ریزجانداران خاک قرار داده و منجر به افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌شود. علاوه‌برآن، با مصرف کود فسفر در خاک، فسفر فراهم خاک افزایش یافته و از طریق تشدید فعالیت‌های میکروبی منجر به افزایش ترشحات ریزجانداران به خاک شده و CO<sub>2</sub> حاصل از تنفس ریشه و ریزجانداران به‌همراه این ترشحات اسیدی منجر به کاهش pH خاک می‌شود (Lehmann et al., 2011). بنابراین، عدم تأثیر معنادار مصرف توأم بیوپچار و کود فسفر بر pH خاک احتمالاً به افزایش ترشحات میکروبی و CO<sub>2</sub> حاصل از تنفس ریزجانداران مربوط می‌باشد. در تیمارهای با کود فسفر، pH خاک در حضور هیدروچار کمتر از تیمار بدون اصلاحگر بود که به pH اسیدی هیدروچار مربوط می‌باشد. بااین‌حال، در شرایط بدون مصرف کود فسفر در خاک، pH خاک در حضور هیدروچار با تیمار بدون اصلاحگر تفاوت معنادار نداشت که احتمالاً به علت ظرفیت بافری زیاد خاک مورد مطالعه می‌باشد. بعد از مصرف کود فسفر در خاک، به‌علت برهم‌کنش هم‌افزایی<sup>۱</sup> هیدروچار و فسفر در افزایش جمعیت و فعالیت ریزجانداران خاک (Lehmann et al., 2011)، pH خاک احتمالاً به‌علت افزایش ترشحات ریزجانداران و CO<sub>2</sub> حاصل از تنفس آنها در خاک کاهش یافته است. در هر دو حالت با و بدون مصرف کود فسفر در خاک، pH خاک در حضور هیدروچار کمتر از بیوپچار بود که به pH اسیدی هیدروچار و pH قلیایی بیوپچار مربوط می‌باشد. مصرف کود فسفر در تیمار بدون اصلاحگر بر pH خاک اثر معنادار نداشت. خاک‌های آهکی معمولاً دارای ظرفیت بافری زیادی می‌باشند و احتمالاً برهم‌کنش‌های کود فسفر در محلول خاک به‌قدری قوی و تأثیرگذار نبوده است که بر ظرفیت بافری خاک غلبه کرده و pH خاک را به‌طور معنادار تغییر دهد. لوسیبیا و همکاران (Lusiba et al., 2017) نیز عدم تأثیر معنادار کود فسفر بر pH خاک را گزارش کرده‌اند.

در هر دو حالت با و بدون مصرف کود فسفر در خاک، EC محلول خاک در حضور بیوپچار نسبت به هیدروچار و تیمار بدون اصلاحگر بیشتر بود (جدول ۳). افزایش EC محلول

1. Synergistic

غلظت عناصری مانند پتاسیم و سدیم در خاک معنادار شود.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که درصد عملکرد همه هیدروچارها به جز هیدروچار کود مرغی بیشتر از بیوچار بود. درصد خاکستر و غلظت عناصر در زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار کود مرغی و لجن فاضلاب بیشتر از مواد لیگنوسلولزی بود. به‌طور کلی، زیست‌توده اولیه، بیوچار و هیدروچار کود مرغی بیشترین درصد خاکستر، pH، EC و غلظت عناصر غذایی و زیست‌توده، بیوچار و هیدروچار چوب سیب کم‌ترین EC و غلظت عناصر غذایی را داشت. pH همه بیوچارهای مورد مطالعه بیشتر از زیست‌توده و pH همه هیدروچارها کمتر از زیست‌توده بود. pH همه بیوچارها بیشتر از ۷ (قلیایی) و pH همه هیدروچارها (به-جز هیدروچار کود مرغی) کمتر از ۷ (اسیدی) بود. با مصرف بیوچار در خاک، pH خاک افزایش و با مصرف توأم هیدروچار و کود فسفر در خاک، pH خاک کاهش یافت. در هر دو حالت با و بدون مصرف کود فسفر در خاک، pH و EC خاک در حضور هیدروچار کمتر از بیوچار بود و مصرف کود فسفر در خاک، EC خاک را در حضور بیوچار و هیدروچار افزایش داد. مصرف بیوچار و هیدروچار بر فسفر، پتاسیم و سدیم فراهم خاک اثر معنادار نداشت. با این حال، بین کود فسفر و بیوچار و هیدروچار در افزایش فسفر فراهم خاک یک برهم‌کنش هم‌افزایی مشاهده شد. با توجه به pH اسیدی هیدروچارهای مورد مطالعه و افزایش غلظت برخی عناصر غذایی در بیوچارها و هیدروچارهای مورد مطالعه، مصرف بیوچار و هیدروچار همراه با کود فسفر در خاک‌های آهکی می‌تواند توصیه شود.

فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مربوط باشد (Lehmann *et al.*, 2011; Naeem *et al.*, 2018). کیانو-هونگ و همکاران (Qiao-Hong *et al.*, 2014) نیز برهم‌کنش هم‌افزایی بین بیوچار کلش برنج و کودهای شیمیایی NPK را در افزایش فسفر فراهم خاک گزارش کردند. نعیم و همکاران (Naeem *et al.*, 2018) گزارش کردند که افزودن بیوچار کلش گندم و کودهای شیمیایی NPK (۳۰-۲۵-۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به خاک باعث افزایش معنادار فسفر فراهم خاک شد؛ اما با مصرف توأم بیوچار و کودهای NPK بیشترین مقدار فسفر فراهم خاک به‌دست آمد. همچنین، شارما و همکاران (Sarma *et al.*, 2017) گزارش کردند که فسفر فراهم خاک با مصرف بیوچار و کود NPK در خاک افزایش یافت؛ اما بیشترین مقدار با مصرف هم‌زمان بیوچار و NPK به‌دست آمد. مصرف کود فسفر، بیوچار و هیدروچار در خاک بر غلظت پتاسیم و سدیم فراهم خاک اثر معنادار نداشت (جدول ۳). به‌نظر می‌رسد عدم تأثیر معنادار بیوچار و هیدروچار بر پتاسیم و سدیم فراهم خاک به غلظت کم این عناصر در بیوچار و هیدروچار، سرعت کم معدنی‌شدن بیوچار و هیدروچار در خاک و همچنین کم بودن تعداد تیمارها و درجه آزادی خطای آزمایش مربوط می‌باشد. با این حال، غلظت پتاسیم و سدیم فراهم خاک پس از مصرف بیوچار در خاک به ترتیب ۱۱-۱۳ و ۵-۶ درصد و پس از مصرف هیدروچار در خاک به ترتیب ۳-۹ و ۵ درصد افزایش یافت که به‌علت رهاسازی این عناصر به محلول خاک بر اثر فرایندهای حل‌شدن و معدنی‌شدن بیوچار و هیدروچار مربوط است. با توجه به سرعت تجزیه کند بیوچار و هیدروچار در خاک، احتمالاً در طولانی‌مدت اثرهای آنها بر

### References

- Abel S., Peters A., Trinks S., Schonsky H., Facklam M., and Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202: 183–191.
- Ahmad M., Usman A.R., Al-Faraj A.S., Ahmad M., Sallam A., and Al-Wabel M.I. 2018. Phosphorus-loaded biochar changes soil heavy metals availability and uptake potential of maize (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere*, 194: 327–339.
- Bargmann I., Rillig M., Buss W., Kruse A., and Kuecke M. 2013. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199: 360–373.
- Beheshti M., and Alikhani H. 2016. Quality variations of biochar generated from wheat straw during slow pyrolysis process at different temperatures. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(2): 189–201. (In Persian)
- Dane J.H., and Topp G.C. 2002. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. ASA-CSSA-SSSA Publisher, USA, 1663p.



- Fang J., Gao B., Chen J., and Zimmerman A.R. 2015. Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, 267: 253–259.
- Fuertes A., Arbestain M.C., Sevilla M., Maciá-Agulló J.A., Fiol S., López R., Smernik R., Aitkenhead W., Arce F., and Macías F. 2010. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover. *Soil Research*, 48: 618–626.
- Gokila B., and Baskar K. 2015. Characterization of *Prosopis juliflora* L. biochar and its influence of soil fertility on maize in Alfisols. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Science*, 5: 123–127.
- Havlin J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L., and Nelson W.L. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. (7<sup>th</sup> Ed.), Pearson Educational, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Hu B., Wang K., Wu L., Yu S.H., Antonietti M., and Titirici M.M. 2010. Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. *Advanced Materials*, 22: 813–828.
- Jones Jr J.B. 2001. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC press, Boca Raton, FL, USA, 547p.
- Joseph S., and Lehmann J. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan London, 449p.
- Kang S., Li X., Fan J., and Chang J. 2012. Characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of lignin, cellulose, D-xylose, and wood meal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51: 9023–9031.
- Kibue G.W. 2018. Use of biochar for increased crop yields and reduced climate change impacts from agricultural ecosystems: Chinese farmer's perception and adoption strategy. *African Journal of Agricultural Research*, 13: 1063–1070.
- Kloss S., Zehetner F., Wimmer B., Buecker J., Rempt F., and Soja G. 2014. Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1): 3-15.
- Laird D., Fleming P., Wang B., Horton R., and Karlen D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 436–442.
- Laird D.A. 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100: 178–181.
- Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., and Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 1812–1836.
- Libra J.A., Ro K.S., Kammann C., Funke A., Berge N.D., Neubauer Y., Titirici M.-M., Fühner C., Bens O., and Kern J. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2: 71–106.
- Lusiba S., Odhiambo J., and Ogola J. 2017. Effect of biochar and phosphorus fertilizer application on soil fertility: soil physical and chemical properties. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(4): 477–490.
- Murphy J., and Riley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31–36.
- Naeem M.A., Khalid M., Aon M., Abbas G., Amjad M., Murtaza B., Khan W. U. D., and Ahmad N. 2018. Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize. *Journal of Plant Nutrition*, 41: 112–122.
- Najafi-Ghiri M. 2015. Effect of different biochars application on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(3): 352–358. (In Persian)
- Novak J., Spokas K., Cantrell K., Ro K., Watts D., Glaz B., Busscher W., and Hunt P. 2014. Effects of biochars and hydrochars produced from lignocellulosic and animal manure on fertility of a Mollisol and Entisol. *Soil Use and Management*, 30: 175–181.
- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA-CSSA-SSSA Publisher, Madison, Wisconsin, USA, 1143p.

- Perera J., Nakhshiniev B., Gonzales H.B., and Yoshikawa K. 2015. Effect of hydrothermal treatment on macro/micro nutrients extraction from chicken manure for liquid organic fertilizer production. *British Journal of Environment and Climate Change*, 5(1): 64–75.
- Petrović J., Perišić N., Maksimović J.D., Maksimović V., Kragović M., Stojanović M., Laušević M., and Mihajlović M. 2016. Hydrothermal conversion of grape pomace: Detailed characterization of obtained hydrochar and liquid phase. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 118: 267–277.
- Qiao-Hong Z., Xin-Hua P., Huang T. Q., Zu-Bin X., and Holden N. 2014. Effect of biochar addition on maize growth and nitrogen use efficiency in acidic red soils. *Pedosphere*, 24(6): 699–708.
- Reza M.T., Becker W., Sachsenheimer K., and Mumme J. 2014. Hydrothermal carbonization (HTC): Near infrared spectroscopy and partial least-squares regression for determination of selective components in HTC solid and liquid products derived from maize silage. *Bioresource Technology*, 161: 91–101.
- Sarma B., Gogoi N., Bharali M., and Mali P. 2017. Field evaluation of soil and wheat responses to combined application of hardwood biochar and inorganic fertilizers in acidic sandy loam soil. *Explorations in Agriculture*, (36): 1–13.
- Schneider D., Escala M., Supawittayayothin K., and Tippayawong N. 2011. Characterization of biochar from hydrothermal carbonization of bamboo. *International Journal of Energy and Environment*, 2(4): 647–652.
- Smith A.M., Singh S., and Ross A.B. 2016. Fate of inorganic material during hydrothermal carbonization of biomass: Influence of feedstock on combustion behavior of hydrochar. *Fuel*, 169: 135–145.
- Song W., and Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94: 138–145.
- Soltanpour P., and Schwab A. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro- and micro- nutrients in alkaline soils. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 8(3): 195–207.
- Sun Y., Gao B., Yao Y., Fang J., Zhang M., Zhou Y., Chen H., and Yang L. 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal*, 240: 574–578.
- Wang Y., Hu Y., Zhao X., Wang S., and Xing G. 2013. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times. *Energy and Fuels*, 27: 5890–5899.
- Zhang J. H., Lin Q. M., and Zhao X. R. 2014. The hydrochar characters of municipal sewage sludge under different hydrothermal temperatures and durations. *Journal of Integrative Agriculture*, 13: 471–482.
- Zhao X. R., Dan L., Juan K., and Lin Q. M. 2014. Does biochar addition influence the change points of soil phosphorus leaching? *Journal of Integrative Agriculture*, 13(3): 499–506.
- Zolfi Bavariani M., Ronaghi A., Karimian N., Ghasemi R., and Yasrebi J. 2016. Effect of poultry manure derived biochars at different temperatures on chemical properties of a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science* (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources), 20(75): 73–86. (In Persian)

## Changes in Some Chemical Properties of Various Organic Materials after Converting in Biochar and Hydrochar

Yaser Azimzadeh<sup>1\*</sup>, Nosratollah Najafi<sup>2</sup>, Elnaz Abdolmaleki<sup>3</sup>, Behnaz Amirloo<sup>3</sup>

(Received: July 2018 Accepted: December 2018)

### Abstract

Biochar and hydrochar are carbonaceous solid materials that produced through carbonization of biomasses, resulting in carbon sequestration and soil fertility improvement. The aim of this study was converting different biomasses including sewage sludge, poultry manure, sugar beet tailing, wheat straw, and apple wood wastes to biochar and hydrochar and investigating their chemical properties. Also, using a factorial experiment on the basis of completely randomized design with three replications, the effects of the apple wood biochar and hydrochar were studied in the presence and absence of monocalcium phosphate fertilizer on soil pH and EC and available P, K, and Na. A slow pyrolysis process with a temperature of 500 °C for 1 h was employed to produce the biochar and a hydrothermal carbonization process with a temperature of 180 °C and pressure of 11 bar for 12 h was applied to produce the hydrochar. After conversion of biomasses to biochar and hydrochar, yield percentage of the biochars and hydrochars and pH, EC, ash percentage, and concentrations of N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, and Zn in initial biomasses, biochars, and hydrochars were measured. The results showed that the ash percentage and elements concentrations in biomasses, biochars, and hydrochars of poultry manure and sewage sludge were greater than those of sugar beet tailing, wheat straw, and apple wood. The pH of all biochars was more than 7, and the pH of all hydrochars (except for the poultry manure-derived hydrochar) was less than 7. Application of wood biochar increased soil pH and the integration of P-fertilizer with hydrochar decreased soil pH. The soil pH and EC in presence of hydrochar were lower than those of biochar with and without P-fertilizer. The P-fertilizer had synergistic interactions with biochar and hydrochar in terms of soil available-P. The effects of biochar, hydrochar, and P-fertilizer application on soil available- potassium and sodium were not significant. Regarding the acidic pH of the studied hydrochars and increased concentrations of some nutrients in the investigated biochars and hydrochars, the applications of biochar and hydrochar accompany with P-fertilizer could be recommended in calcareous soils.

**Keywords:** Hydrothermal carbonization, Nutrients, Organic matter, Phosphorus, Pyrolysis

Azimzadeh Y., Najafi N., Abdolmaleki E., Amirloo B. 2020. Changes in some chemical properties of various organic materials after converting into biochar and hydrochar. *Applied Soil Research*, 7(4):1-17.

1. Former PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3. Former MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

\* Corresponding Author Email: [yaser.azimzadeh@gmail.com](mailto:yaser.azimzadeh@gmail.com)