

## کاهش آلودگی محیط زیست با تبدیل پسماندهای آلی به هیدروچار و مصرف آن در خاک

یاسر عظیم‌زاده<sup>۱\*</sup>

[yaser.azimzadeh@gmail.com](mailto:yaser.azimzadeh@gmail.com)

نصرت الله نجفی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۵/۰۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۳

### چکیده

**زمینه و هدف:** آلودگی محیط زیست با انواع آلاینده‌های آلی و معدنی، عوامل بیماری‌زا، سموم و آفت‌کش‌ها و گرم شدن کره زمین از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی امروز بشر به‌شمار می‌روند. فرآیند تبدیل انواع زیست‌توده به هیدروچار فن‌آوری نوینی است که به‌علت ظرفیت آن در کاهش آلودگی محیط زیست در دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی نقش تبدیل انواع پسماندهای آلی به هیدروچار در کاهش آلودگی‌های محیط زیست بود.

**روش بررسی:** در این بررسی برای جمع‌آوری اطلاعات از روش مرور و بررسی منابع استفاده شد؛ به‌طوری که جدیدترین یافته‌های علمی در منابع مختلف به صورت مروری بررسی شد.

**یافته‌ها:** نتایج بررسی‌ها نشان داد که تبدیل پسماندهای آلی به هیدروچار و کاربرد آن در خاک موجب ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک، افزایش حاصلخیزی خاک و کاهش مقدار آب و کود مورد استفاده در کشاورزی می‌شود.

**بحث و نتیجه‌گیری:** با افزودن هیدروچار به خاک، دی‌اکسیدکربن اتمسفر در ساختمان هیدروچار تثبیت می‌شود (ترسیب کربن). علاوه بر آن، انتشار گازهای گلخانه‌ای مهم نظیر اکسید نیتروژن ( $N_2O$ ) و متان ( $CH_4$ ) از خاک کاهش می‌یابد. هیدروچار با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش داده و با نگهداری عناصر غذایی و آلاینده‌ها در خاک و کاهش فرسایش از هدررفت و ورود عناصر غذایی و آلاینده‌ها به آب‌های سطحی و زیرسطحی جلوگیری می‌کند. همچنین، هیدروچار به‌علت داشتن سطح ویژه و گروه‌های عاملی زیاد می‌تواند به‌عنوان جاذب انواع آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین در تصفیه آب، پساب و فاضلاب‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** آلودگی خاک، تغییرات اقلیمی، ترسیب کربن، گرمایش جهانی، هیدروچار

۱- دانشجوی دکتری خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز\* (مسئول مکاتبات)

۲- دانشیار خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

## Reducing Environmental Pollution by Converting Organic Wastes to Hydro char and its Use in the Soil

Yaser azimzadeh<sup>1\*</sup>

[yaser.azimzadeh@gmail.com](mailto:yaser.azimzadeh@gmail.com)

Nosratollah najafi<sup>2</sup>

### Abstract

**Background and Objective:** Environmental pollution with various organic and inorganic contaminants, pathogens, poisons, and pesticides and global warming are the most important environmental issues for the mankind. Converting of biomasses into hydro char is a novel technology that has attracted great attention of researchers in recent decade due to its potential in reducing environmental pollution. The aim of this study was to investigate the role of organic wastes conversion into hydro char in reducing environmental pollutions.

**Material and Method:** In this study, to collect information, the reviewing resources method was used. So that the latest scientific findings in various sources have been reviewed.

**Results:** Results of the studies showed that converting of organic wastes into hydro char and its application in soil causes carbon sequestration, reducing greenhouse gases emission from soil, increasing soil fertility and reducing the amount of water and fertilizer used in agriculture.

**Discussion and Conclusion:** Adding hydro char to soils has been described as a means of sequestering atmospheric carbon dioxide, and also mitigating greenhouse gases such as nitrogen oxide and methane emissions. Hydro char increases water retention capacity of soil and soil infiltration by improving soil physical properties and reduces nutrient leaching and losing by nutrients retention in soil and reducing soil erosion. In addition, hydro char has a great surface area and functional groups and can be used as an adsorbent of various pollutants especially heavy metals from water, waste water, and sewage sludge.

**Keywords:** Carbon Sequestration, Climate Warming, Global Warming, Hydrochar, Soil Pollution

---

1- Ph.D., Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Tabriz University

## مقدمه

امروزه گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی به چالش بزرگی در جهان تبدیل شده و یافتن راه حل‌های مقابله با این پدیده، توجه دانشمندان را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. افزایش ورود گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن به اتمسفر، عامل اصلی گرمایش زمین محسوب می‌شود (۱). از سوی دیگر، آلودگی محیط زیست با انواع آلاینده‌های آلی و معدنی نظیر فلزات سنگین، عوامل بیماری‌زا، سموم و آفت‌کش‌ها سلامت بشر و سایر جوامع زنده را تهدید می‌کند. استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی از یک‌سو باعث افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی با انواع آلاینده‌ها مانند فسفر، نیترا و فلزات سنگین شده و از سوی دیگر، کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی را کاهش داده و امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد. علاوه بر آن، با کاهش منابع غیرقابل تجدید برخی عناصر مانند فسفر، نیاز به مصرف بهینه این کودها و تلاش برای جایگزین کردن آن‌ها با مواد تجدیدپذیر، بیش‌تر احساس می‌شود (۲). فن‌آوری کربونیزه کردن (Hydrothermal carbonization (HTC))، مایع کردن (Hydrothermal liquefaction) و گازی کردن گرمابی (Hydrothermal gasification) انواع مواد آلی می‌تواند برای کاهش مشکلات فوق‌الذکر راه حل مناسبی باشد. در این مقاله، با معرفی فرآیند کربونیزه کردن گرمابی و محصولات حاصل از آن (به‌ویژه هیدروچار) راه‌حل‌های این فن‌آوری برای کاهش آلودگی-های زیست‌محیطی اعم از آلودگی آب، خاک و هوا به اختصار بیان می‌شود.

## فرآیند تولید هیدروچار

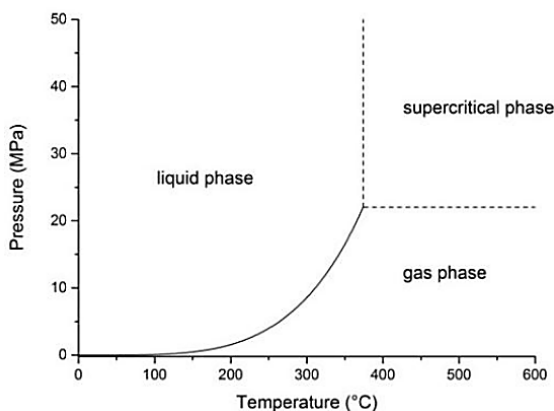
کربونیزه شدن گرمابی (HTC) یک فرآیند ترموشیمیایی (Thermochemical) با تغییرات پیچیده فیزیکی و شیمیایی در ساختمان زیست‌توده می‌باشد که در طی آن، زیست‌توده در حضور حلال (آب و یا غیرآب) و در دمای بالاتر از دمای اتاق و فشار حاصل از خود واکنش (بیش‌تر از ۱ اتمسفر) به موادی جامد به نام هیدروچار تبدیل می‌شود (۳). این فرآیند را گرماکافت

مرطوب (Wet pyrolysis) نیز می‌نامند. گرونوالد و همکاران (۲۰۱۵) از واژه «پیروچار» برای مواد جامد کربنی حاصل از فرآیند گرماکافت و از واژه «هیدروچار» برای مواد جامد کربنی حاصل از فرآیند کربونیزه شدن گرمابی استفاده کردند که واژه اول برگرفته از Pyrolysis (گرماکافت) و واژه دوم برگرفته از Hydrothermal (گرمابی) می‌باشد (۴). برای تولید هیدروچار از رآکتور HTC استفاده می‌شود. این رآکتور دارای یک مخزن از جنس استیل ضدزنگ مقاوم به خوردگی و دمای بالا می‌باشد که پیش‌ماده (Feedstock) به همراه حلال (معمولاً آب) در داخل آن قرار گرفته و مخزن با استفاده از جریان الکتریکی و یا سوخت، حرارت داده می‌شود. با تبخیر و منبسط شدن مولکول‌های مایع داخل مخزن، فشار درون مخزن به حدود ۲۰ تا ۳۰ بار افزایش می‌یابد. دما و فشار بالا در درون مخزن باعث انجام واکنش‌های شیمیایی متعدد در زیست‌توده شده و آن را دچار تغییرات مولکولی و ساختاری می‌کند. محصول حاصل عمدتاً شامل بخش جامد (هیدروچار) و بخش مایع (محلول واکنش) می‌باشد. نوع پیش‌ماده، دما و زمان واکنش تأثیر زیادی بر ویژگی‌های هیدروچار تولید شده دارد؛ ولی زمان واکنش نسبت به دما و پیش‌ماده تأثیر کم‌تری دارد (۵). معمولاً برای تولید هیدروچار، از دمای ۱۶۰ تا ۲۵۰ درجه سلسیوس و زمان واکنش ۱ تا ۱۲ ساعت (کم‌تر از ۷۲ ساعت) استفاده می‌شود (۶). نسبت‌های بالای اکسیژن به کربن (O:C) در هیدروچار که در دماهای پایین‌تر به‌دست می‌آید (همانند بیوچار)، بیانگر فراوانی گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند هیدروکسیل (R-OH)، کربوکسیل (R-COOH) و کربنیل (C=O-) می‌باشد. این گروه‌های عاملی باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی هیدروچار شده و در نگهداری عناصر غذایی در خاک و جذب آلاینده‌های کاتیونی مانند فلزات سنگین نقش مفیدی دارند (۲). بنابراین، هیدروچار تولید شده در دماهای پایین نسبت به دماهای بالا اصلاح‌گر مناسب‌تری برای خاک و جاذب مناسب‌تری برای آلاینده‌ها می‌باشد. فن‌آوری تبدیل گرمابی را می‌توان در ۳ گروه دسته‌بندی

(Critical point) آب می‌نامند و آبی که در بیشتر از این دما و فشار قرار گیرد در واقع در نقطه فوق بحرانی (Supercritical water) قرار دارد (شکل ۱). آب فوق بحرانی همانند یک فاز مایع همگن (Homogeneous) رفتار می‌کند. در این حالت، گران-روی آب شبیه گاز ولی چگالی آن شبیه مایع بوده و ثابت دی-الکتریک آن کاهش می‌یابد. گازی شدن زیست توده عمدتاً تحت تأثیر چگالی، گران‌روی و ثابت دی‌الکتریک آب قرار می‌گیرد (۷). رفتار منحصربه‌فرد مولکول‌های آب فوق بحرانی، باعث می‌شود که تولید مواد ناخواسته‌ای مانند زغال و قطران در طی فرآیند گازی شدن به حداقل برسد (۸). بنابراین، از آب فوق بحرانی برای گازی کردن گرمایی زیست توده، برای تولید گاز قابل اشتعال مانند متان و هیدروژن استفاده می‌کنند (۸ و ۷). غالبیت نسبی متان یا هیدروژن در گاز تولید شده، بسته به دمای واکنش تغییر می‌کند (۹).

کرد که شامل گازی کردن گرمایی، مایع کردن گرمایی و کربونیزه کردن گرمایی می‌باشد:

**گازی کردن گرمایی:** در گازی کردن گرمایی از دماهای بالا (معمولاً بالاتر از ۲۱۵ درجه سلسیوس) استفاده می‌شود و هدف اصلی آن، تولید بیش‌ترین میزان گاز نسبت به بخش مایع و جامد می‌باشد. گازهای قابل اشتعال مانند هیدروژن و متان از محصولات مطلوب این فرآیند محسوب می‌شوند. آب در دماهای مختلف دارای ویژگی‌های مولکولی و ساختاری متفاوتی بوده و در هر یک از حالت‌های جامد (یخ)، مایع (آب) و گاز (بخار) ویژگی‌های متفاوتی از نظر چگالی، گران‌روی و سایر ویژگی‌ها نشان می‌دهد. وقتی دمای آب در محیط تحت فشار افزایش داده شود، با رسیدن به دمای ۳۷۴/۱ درجه سلسیوس و فشار ۲۲/۱ مگاپاسکال، ویژگی‌های مولکولی و ساختاری آب تغییر می‌کند و این نقطه (دمای ۳۷۴/۱ درجه سلسیوس و فشار ۲۲/۱ بار) را نقطه بحرانی



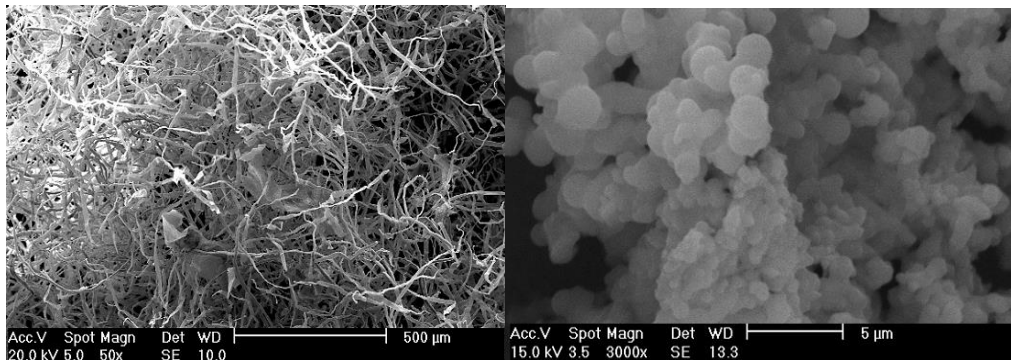
شکل ۱- دیاگرام فازهای آب (۷)

**کربونیزه کردن گرمایی:** در کربونیزه کردن گرمایی از دماهای پایین (معمولاً بین ۱۶۰-۲۵۰ درجه سلسیوس) استفاده می‌شود که در این شرایط، فرآیندهای مایع کردن و گازی کردن محدود شده و بیش‌ترین مقدار مواد جامد غنی از کربن (هیدروچار) تولید می‌شود (۱۰). در فرآیند کربونیزه شدن گرمایی، مقداری محصول فرعی شامل ترکیب‌های آلی محلول در فاز مایع و مقدار کمی گاز تولید می‌شود. با این حال، نسبت این سه محصول، به نوع زیست-

**مایع کردن گرمایی:** هدف اصلی در مایع کردن گرمایی، تولید فاز مایع بیش‌تر می‌باشد (۱۰). معمولاً دمای مورد استفاده برای این فرآیند ۳۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۵ تا ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. استفاده از کاتالیست‌هایی نظیر هیدروکسیدهای قلیایی، کربنات‌ها، بی‌کربنات‌ها و فلزات واسطه در این فرآیند نقش به‌سزایی دارد و فاز مایع تولید شده در این فرآیند عمدتاً حاوی فنول‌ها و مولکول‌های با گروه‌های فنولی می‌باشد.

ساختمانی زیست‌توده‌های لیگنوسلولزی، واکنش‌های فرآیند HTC برای آنها پیچیده‌تر و کندتر از سلولز، همی‌سلولز و لیگنین خالص و زیست‌توده‌های غنی از کربوهیدرات مانند بقایای ذرت می‌باشد. فرآیند HTC، بخش حل‌پذیر زیست‌توده را به کربوهیدرات‌های ساده هیدرولیز کرده و سپس به ذرات کروی کربونیزه می‌کند (۱۲) (شکل ۲). بخش‌های غیرقابل‌حل زیست‌توده در طی کربونیزه شدن، ساختار فیبری اولیه بافت‌های گیاه را حفظ کرده و باعث شکل‌گیری بخش‌های متخلخل هیدروچار می‌شود (۱۲). هرچه زیست‌توده لیگنین کم‌تری داشته باشد، عملکرد بیوچار و هیدروچار تولید شده کم‌تر خواهد بود. به‌عنوان مثال، عملکرد بیوچار و هیدروچار تولید شده از چوب بیش‌تر از علف می‌باشد (۱۱).

توده و شرایط واکنش (دما و زمان واکنش) بستگی دارد (۶، ۱۰ و ۱۱). فرآیند کربونیزه کردن گرمایی نیاز به کاتالیست ندارد، با این حال، در این فرآیند می‌توان از آهن (Fe) به‌عنوان کاتالیست استفاده کرد (۱۲). تقریباً هر زیست‌توده‌ای که قابلیت تبدیل به بیوچار را داشته باشد، می‌تواند برای تولید هیدروچار نیز مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان مثال، پژوهشگران از مواد مختلف مانند باگاس نیشکر، چوب درختان، پوست بادام‌زمینی (۱۱)، بامبو (۱۳)، کودهای دامی و انسانی، لجن فاضلاب، بقایای کشاورزی (۶) و سایر مواد آلی (۵ و ۱۰) برای تبدیل به هیدروچار استفاده کرده‌اند. مواد لیگنوسلولزی (Lignocellulosic materials) فراوان‌ترین و در دسترس‌ترین زیست‌توده‌هایی هستند که می‌توان برای تولید هیدروچار (و بیوچار) استفاده کرد. به‌علاوه پیچیدگی مولکولی و



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سلولز خام (سمت چپ) و سلولز HTC شده با استفاده از میکروویو در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و مدت ۲۴۰ دقیقه (۱۴)

عنصری محلول واکنش حاصل از فرآیند HTC را بررسی کرده و بیش‌ترین مقدار سطح ویژه و حجم منافذ هیدروچار را در کم‌ترین دما (۲۰۰ درجه سلسیوس) به‌دست آوردند. آنان مشاهده کردند که با افزایش دما، نسبت O:C و HC کاهش یافت؛ که بیانگر افزایش میزان آروماتیک بودن (Aromaticity) و پایداری کربن هیدروچار با افزایش دما می‌باشد (۱۱) (جدول ۱، ۲ و ۳).

ویژگی‌های هیدروچار تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل نوع زیست‌توده، زمان و حداکثر دمای واکنش قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال فنگ و همکاران (۲۰۱۵) با تولید هیدروچار از باگاس نیشکر، پوست بادام‌زمینی و چوب گردوی آمریکایی در سه دمای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس و مدت ۶ ساعت، عملکرد، سطح ویژه و ترکیب عنصری هیدروچارهای تولید شده و ترکیب

جدول ۱- برخی ویژگی‌های هیدروچارهای تولید شده از باگاس نیشکر (B)، چوب گردوی آمریکایی (H) و پوست بادام‌زمینی (P) در سه

دمای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس (۱۱)

وزن خشک (%)	سطح ویژه (متر مربع بر گرم)	حجم منافذ (سانتی متر مکعب بر گرم)	pH	پتانسیل زتا (میلی ولت)
B۲۰۰	۱۰/۷	۰/۲۱۵	۴/۰	-۲۴/۴۳
B۲۵۰	۳/۹	۰/۰۳۵	۵/۳	-۳۵/۲۷
B۳۰۰	۴/۹	۰/۰۳۴	۵/۸	-۲۱/۷۹
H۲۰۰	۷/۸	۰/۱۲۱	۴/۹	-۲۵/۹۱
H۲۵۰	۸/۹	۰/۱۱۰	۵/۱	-۲۷/۹۷
H۳۰۰	۱/۸	۰/۰۰۸	۵/۴	-۲۶/۰۴
P۲۰۰	۷/۱	۰/۰۱۰	۶/۲	-۲۹/۵۱
P۲۵۰	۱/۱	۰/۰۱۰	۶/۲	-۲۳/۲۳
P۳۰۰	۰/۰	۰/۰۰۰	۶/۰	-۳۴/۴۹

جدول ۲- ترکیب عنصری ( $\text{mg L}^{-1}$ ) محلول واکنش فرآیند HTC در تولید هیدروچار از باگاس نیشکر (B)، چوب گردوی آمریکایی (H) و

پوست بادام‌زمینی (P) در سه دمای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس (۱۱)

B	Al	P	Cu	Mo	Mn	Fe	S	Mg	Ca	Na	K	
۰/۸	۱/۵	۱۱/۰	۱/۷	۰/۴	۱/۷	۵۷/۳	۱۴۲/۸	۷۴/۸	۱۵۷/۲	۱۰/۹	۱۷۲/۹	B۲۰۰
۰/۸	۱/۶	۹/۴	۱/۷	۰/۴	۱/۸	۸/۴	۱۰۰/۴	۷۱/۷	۱۵۷/۵	۱۱/۹	۱۷۵/۱	B۲۵۰
۰/۸	۱/۵	۶/۷	۱/۷	۰/۳	۱/۸	۰/۰	۸۹/۲	۴۰/۵	۱۴۹/۸	۱۰/۹	۱۶۴/۹	B۳۰۰
۰/۹	۱/۷	۶/۸	۱/۷	۰/۴	۱۶/۷	۰/۵	۴۹/۶	۱۰۸/۲	۱۸۶/۷	۶/۸	۱۸۱/۳	H۲۰۰
۰/۹	۱/۷	۱۰/۹	۱/۷	۰/۳	۸/۵	۱۰۵/۴	۶۹/۶	۶۸/۶	۱۱۰/۹	۷/۲	۱۳۷/۸	H۲۵۰
۱/۰	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۰/۳	۱۶/۲	۶۰/۱	۶۵/۸	۱۰۷/۰	۱۳۸/۴	۶/۱	۱۷۴/۰	H۳۰۰
۱/۰	۱/۷	۳۳/۱	۱/۷	۰/۴	۵/۰	۳۲/۵	۳۱۹/۰	۱۱۶/۴	۸۶/۷	۸/۳	۱۰۱۳/۶	P۲۰۰
۰/۷	۱/۶	۴۵/۶	۱/۷	۰/۴	۴/۶	۰/۵	۳۶۲/۶	۱۲۴/۳	۸۱/۵	۱۲/۱	۱۰۷۹/۲	P۲۵۰
۰/۷	۱/۵	۷/۴	۱/۷	۰/۳	۲/۵	۰/۵	۳۲۷/۴	۹۹/۰	۴۰/۵	۱۰/۵	۱۰۳۶/۸	P۳۰۰

جدول ۳- ترکیب عنصری (%) هیدروچارهای تولید شده از باگاس نیشکر (B)، چوب گردوی آمریکایی (H) و پوست بادامزمینی (P) در سه

دمای ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس (۱۱)

C:N	H:C	O:C	%Al	%P	%Fe	%S	%Mg	%Ca	%Na	%K	%O	%N	%H	%C	
۱۲۸/۰۶	۰/۰۷	۰/۳۷	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۲۵/۷۴	۰/۵۴	۵/۱۱	۶۹/۱۵	B۲۰۰
۹۸/۷۹	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۱	۱۹/۲۸	۰/۷۶	۵/۶۴	۷۵/۰۸	B۲۵۰
۹۰/۶۴	۰/۰۷	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۱	۱۵/۳۵	۰/۸۸	۵/۳۴	۷۹/۳۱	B۳۰۰
۳۹۲/۳۴	۰/۰۸	۰/۳۸	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۲۶/۰۳	۰/۱۸	۵/۳۱	۶۸/۶۶	H۲۰۰
۱۲۹/۶۳	۰/۰۷	۰/۳۶	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۱	۲۴/۹۸	۰/۵۴	۵/۰۲	۷۰/۰۰	H۲۵۰
۲۴۱/۴۳	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۱۶/۳۹	۰/۳۳	۵/۱۴	۷۸/۴۷	H۳۰۰
۳۸/۰۵	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۳	۲۳/۳۹	۱/۸۶	۶/۰۴	۷۰/۵۸	P۲۰۰
۴۰/۸۴	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۱۹/۱۱	۱/۸۳	۶/۱۴	۷۴/۷۵	P۲۵۰
۳۷/۰۹	۰/۰۸	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۱۷	۰/۰۳	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۰۳	۱۷/۵۲	۲/۰۶	۶/۰۷	۷۶/۴۲	P۳۰۰

به خاک افزوده شوند، به علت داشتن انواع مواد سمی نظیر فلزات سنگین، عوامل میکروبی بیماری‌زا، ترکیبات آلی سمی، بذر علف-های هرز، ورود نیترات و فسفر به آب‌های سطحی و زیرزمینی و متصاعد کردن آمونیاک و گازهای گلخانه‌ای مشکلات زیست-محیطی را به وجود خواهند آورد؛ ولی با تبدیل این مواد به هیدروچار، خطرات زیست‌محیطی این مواد به حداقل می‌رسد. به-طوری که بر اثر دما و فشار زیاد، انواع میکروب‌ها از بین رفته و مواد آلی سمی تخریب شده و بخش زیادی از فلزات سنگین از ساختمان زیست‌توده خارج شده و وارد بخش محلول هیدروچار می‌شود و فلزات باقی‌مانده در ساختمان هیدروچار زیست‌فراهمی کمتری خواهند داشت. علاوه بر آن، بوی نامطبوع ترکیبات آلی نیز در طی این فرآیند از بین رفته و به علت کاهش حجم، هزینه‌های انتقال و ذخیره نیز کاهش می‌یابد (۲۰ و ۶). با این حال، ممکن است خود هیدروچار (و بیوچار) دارای آلاینده‌های آلی و غیرآلی باشد (۲۱ و ۲۲). با این حال، میزان این آلاینده‌ها در هیدروچار نسبت به زیست‌توده خام کم‌تر بوده و از زیست‌فراهمی کم‌تری برخوردار می‌باشد. بنابراین، در تولید هیدروچار از مواد آلی خام با غلظت فلزات سنگین زیاد (مانند لجن فاضلاب و کودهای دامی) باید به این مسئله توجه نمود.

با کاهش نسبت‌های O:C و H:C، گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار سطح هیدروچار کاهش می‌یابد. در کربونیزه شدن گرمایی، pH آب (حلّال) اثر قابل توجهی بر سازوکارهای شیمیایی سلولز دارد؛ به طوری که pH قلیایی آب باعث افزایش نسبت H:C در هیدروچار شده و فاز مایع بیشتری تولید می‌شود (۶).

فرآیند کربونیزه شدن گرمایی (HTC) ممکن است برای ترسیب کربن (۱۵)، تولید بیوگازهایی نظیر هیدروژن و متان (۱۶) و تولید الکل (۱۷) از انواع زیست‌توده‌ها مورد استفاده قرار گیرد و هیدروچار تولید شده می‌تواند به عنوان کود و اصلاح‌گر خاک (۱۸)، جاذب و تصفیه کننده آب و هوا، پیش‌ماده برای تولید مواد با ارزش نظیر کربن فعال (۱۹)، نانولوله‌های کربنی، گرافیت، کاتالیست، حسگر و غیره (۱۸) مورد استفاده قرار گیرد. هیدروچار به علت داشتن ارزش گرمایی بالا می‌تواند به عنوان سوخت (۱۰) نیز استفاده شود. در زیر به چند نمونه از مهم‌ترین کاربردهای زیست‌محیطی هیدروچار به اختصار اشاره می‌شود:

**کاهش خطرهای زیست‌محیطی با تبدیل زیست‌توده به هیدروچار**  
موادی مانند لجن فاضلاب، ضایعات انسانی، کودهای مرغی و دامی با وجود داشتن ارزش کودی بالا، در صورتی که به صورت مستقیم

### تولید سوخت زیستی تجدیدپذیر

با افزایش روزافزون مصرف انرژی در جهان، نیاز به منابع تجدیدپذیر انرژی و انرژی‌های پاک بیشتر احساس می‌شود. مصرف سوخت‌های فسیلی باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر می‌شود. محصولات فرآیند کربونیزه کردن گرمایی شامل گاز، محلول واکنش و هیدروچار می‌باشد که هر یک از این فازها قابلیت استفاده به‌عنوان سوخت را دارند. به‌عنوان مثال، لئو و همکاران (۲۰۱۴) با تبدیل زیست‌توده‌های خاکاره چوب کاج، پوشال برنج و پوست نارگیل در دمای ۲۵۰ درجه سلسیوس و مدت ۲۰ دقیقه به هیدروچار و پلت کردن (Pelletizing) هیدروچارهای تولید شده، کیفیت پلت‌ها را از نظر سوخت زیستی بررسی و مشاهده کردند که پلت‌های هیدروچار نسبت به پلت زیست‌توده‌های خام آنها دارای میزان کربن تثبیت شده و مقاومت مکانیکی بیشتر و میزان خاکستر و درصد جذب رطوبت کم‌تری بود. در کل، ویژگی‌های سوختی نظیر ارزش گرمایی و دمای سوختن در پلت‌های هیدروچار نسبت به زیست‌توده خام افزایش ولی میزان تولید و انتشار آلاینده‌ها کاهش یافت (۲۳). کاستلو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از فرآیند کربونیزه کردن گرمایی، ضمن تبدیل هیدروچار، گاز متان نیز تولید کردند (۸).

### استفاده از هیدروچار برای حذف آلاینده‌ها

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد هیدروچار از قبیل پایداری بالا، ترسیب کربن، سطح ویژه بالا، ساختار متخلخل، گروه‌های عاملی، ارزانی و سهولت تولید و عدم واکنش‌پذیری زیاد با عوامل محیطی و جذب شونده‌ها، می‌توان از هیدروچار به‌عنوان جاذبی مناسب برای حذف آلاینده‌های مختلف (به‌ویژه فلزات سنگین) از محیط‌های مختلف استفاده کرد (۲۰ و ۲۴). سان و همکاران (۲۰۱۱) جذب آلاینده‌های آلی توسط بیوچار و هیدروچار را مقایسه و اعلام کردند که جذب آلاینده‌های آلی قطبی و غیرقطبی توسط هیدروچار بیشتر از بیوچار بود (۲۴).

برای افزایش سطح ویژه و بهبود ظرفیت جذب هیدروچار، می‌توان سطح آن را با استفاده از روش‌ها و ترکیبات مختلف اصلاح نمود.

به‌عنوان مثال، می‌توان گروه‌های عاملی سطحی هیدروچار را با استفاده از مواد شیمیایی بهبود بخشیده و به اصطلاح، هیدروچار را فعال نمود و یا از هیدروچار به‌عنوان پیش‌ماده‌ای برای تولید کربن فعال استفاده کرد (۱۹). برای این منظور معمولاً از دو روش کلی فیزیکی و شیمیایی استفاده می‌شود. هدف از فعال‌سازی، ایجاد یک ساختار متخلخل کربنی با سطح آزاد زیاد در ماده خام است. عامل فعال‌ساز در روش فیزیکی عموماً بخار آب، دی-اکسیدکربن، اکسیژن یا مخلوط آنها می‌باشد که قادر است در دمای بالا با بخشی از کربن موجود در ماده واکنش داده و آن را به‌صورت گازهای مونواکسیدکربن یا دی‌اکسیدکربن خارج سازد. بدین ترتیب پس از حذف بخشی از کربن ساختمانی توسط عامل فعال‌ساز، محصول باقی‌مانده ساختاری متخلخل خواهد داشت. در روش شیمیایی از عوامل فعال‌ساز اسیدی و با قلیایی استفاده می‌شود. از مهم‌ترین عوامل فعال‌ساز اسیدی و قلیایی که بیش‌ترین کاربرد را دارند می‌توان به ترتیب اسید فسفریک و هیدروکسید پتاسیم را نام برد (۲۵). زو و همکاران (۲۰۱۲) پوست نارگیل را تبدیل به هیدروچار کرده و آن را با استفاده از پراکسید هیدروژن فعال و برای جذب فلزات سنگین از محلول آبی استفاده و نتایج موفقیت‌آمیزی را گزارش نمودند؛ به‌طوری که پراکسید هیدروژن باعث افزایش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار به‌ویژه گروه‌های کربوکسیلی در هیدروچار شد و جذب سرب را تا ۲۲/۸۲ میلی‌گرم بر گرم افزایش داد که این مقدار حدود ۲۰ برابر بیشتر از مقدار سرب جذب شده توسط هیدروچار غیرفعال بود. آنان توان حذف فلزات سنگین توسط هیدروچار فعال را به ترتیب سرب <مس> <کادمیم> <نیکل> گزارش کردند (۲۶).

### استفاده از هیدروچار برای کاهش گازهای گلخانه‌ای

کربن اتمسفر در طی فتوسنتز در ساختمان گیاهان و درختان به‌صورت ترکیب‌های آلی مختلف ذخیره می‌شود و با تبدیل این زیست‌توده‌ها به مواد جامد غنی از کربن مانند هیدروچار، کربن اتمسفر برای چندصد تا چندهزار سال تثبیت شده و ورود گاز دی‌اکسیدکربن به اتمسفر کاهش می‌یابد (۱). سوزاندن بقایای



(۱۳۹۴) با تبدیل پنج نوع بقایای گیاهی شامل بقایای گندم، بقایای ذرت، چوب ذرت، بقایای پنبه و بقایای کنجد در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و مدت ۳ ساعت به بیوجار نشان داد که افزودن ۲ درصد بیوجار به خاک می‌تواند سبب اصلاح برخی ویژگی‌های خاک و افزایش فراهمی برخی عناصر غذایی در خاک-های آهکی شود (۳۲). بنابراین، هیدروچار می‌تواند با افزایش نفوذپذیری خاک و ظرفیت نگهداری آب خاک، کاهش آبیاری، کاهش فرسایش خاک و کاهش نیاز کودی، باعث افزایش کارایی عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک و کاهش آبشویی عناصر شده و بدین ترتیب، ضمن جلوگیری از هدررفت عناصر غذایی، باعث افزایش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی شود (۲۰).

آبل و همکاران (۲۰۱۳) اثر بیوجار و هیدروچار تولید شده از ساقه و باگاس ذرت و چوب راش را بر ویژگی‌های فیزیکی یک خاک شنی بررسی و نشان دادند که هیدروچار (و بیوجار) با کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش حجم منافذ خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش داد. در نتیجه، میزان رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم افزایش یافت (۳۳). بارجمن و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی اثر هیدروچار بر تغییرات نیتروژن در خاک و فراهمی آن برای گیاه نشان دادند که هیدروچار باعث کاهش نیتروژن معدنی خاک بویژه نترات شد و علت آن را به نسبت C:N بالای هیدروچار نسبت دادند. آنان نشان دادند که هیدروچار وزن خشک جو و لوبیا فائولی را افزایش داد. آنان نتیجه گرفتند که استفاده از هیدروچار به عنوان اصلاحگر خاک نیازمند این است که کود دهی نیتروژن معدنی در نظر گرفته شود (۳۴). فنگ و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که در فرآیند HTC، محلول واکنش برخلاف قسمت جامد (هیدروچار)، از نظر عناصر غذایی بسیار غنی بوده و قابلیت افزودن مستقیم به خاک و گیاه به‌عنوان کود را دارد؛ اما این محلول حاوی انواع بسیار متنوعی از ترکیب‌ها و اسیدهای آلی می‌باشد که برای شناخت آنها لازم است که پژوهش‌های بیش‌تری انجام شود (۱۱).

آلی به‌ویژه بقایای کشاورزی سالانه مقادیر بسیار زیادی از گاز دی‌اکسیدکربن را وارد اتمسفر می‌کند و در صورت تبدیل آنها به هیدروچار و یا بیوجار، علاوه بر ترسیب کربن، از انتشار حجم زیادی از گاز دی‌اکسیدکربن به اتمسفر جلوگیری می‌شود. افزون-برآن، با افزودن هیدروچار به خاک، انتشار گازهای گلخانه‌ای مهم نظیر متان، اکسید نیتروژن و دی‌اکسیدکربن از خاک به اتمسفر کاهش می‌یابد (۲۷). این مسئله در زمین‌هایی که کود دامی افزوده می‌شود، اهمیت بیش‌تری دارد. به‌عنوان مثال، در ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا سالانه حدود ۱/۵ میلیارد تن انواع کودهای دامی اعم از گاوی و خوکی تولید می‌شود (۲۷ و ۲۸) و بیش از ۸۰ درصد از آمونیاک متصاعد شده به اتمسفر (حدود ۲/۹ میلیون تن در سال) از این کشورها و از منبع همین کودهای دامی می‌باشد (۲۸ و ۲۹). دیک و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزودن هیدروچار به خاک باعث کاهش انتشار گاز  $N_2O$  از خاک می‌شود (۳۰).

#### استفاده از هیدروچار به‌عنوان اصلاحگر خاک و کاهش آبشویی عناصر

هیدروچار، از یک سو نفوذپذیری خاک و از سوی دیگر ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، عناصر غذایی را جذب و در خاک نگهداری می‌کند. بنابراین، با افزودن هیدروچار به خاک، اولاً به‌علت کاهش رواناب و فرسایش خاک، هدررفت عناصر غذایی مانند فسفر از خاک کاهش می‌یابد، ثانیاً با افزایش ظرفیت نگهداری مواد غذایی مانند نترات در خاک، آبشویی نترات از خاک کاهش می‌یابد و ثالثاً با افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، نیاز آبیاری کاهش و در نتیجه احتمال آبشویی و فرسایش خاک نیز کاهش یافته و هدررفت عناصر غذایی کاهش می‌یابد (۲۷). هیدروچار با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، کارایی مصرف کودهای شیمیایی و عناصر غذایی را در خاک افزایش داده و نیاز به کود را کاهش می‌دهد و از این طریق آلودگی‌های ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی را کاهش می‌دهد (۳۱). به‌عنوان مثال، نجفی قیری

### تشابه و تفاوت بیوچار و هیدروچار

#### تشابه‌ها

(۱) ویژگی‌های هیدروچار مشابه بیوچار به‌شدت وابسته به نوع زیست‌توده و شرایط کربونیزه شدن شامل دما و زمان واکنش و سرعت افزایش دما می‌باشد (۱۳).

(۲) هر دو فرآیند HTC (هیدروچار) و گرماکافت (بیوچار) در شرایط بدون حضور اکسیژن و یا در حضور اکسیژن کم انجام شده و محصولات هر دو فرآیند شامل سه بخش ماده جامد کربنی، بخش مایع و بخش گازی می‌باشد (۱۰). هرچند که نسبت این سه فاز در مورد آنها یکسان نیست.

(۳) در هر دو فرآیند HTC و گرماکافت، با افزایش دما، عملکرد و درصد اکسیژن و هیدروژن کاهش، ولی درصد و میزان آروماتیک بودن کربن و pH افزایش می‌یابد (۱۱).

#### تفاوت‌ها

(۱) برای تولید هیدروچار از فرآیند کربونیزه شدن گرمایی (HTC) ولی برای تولید بیوچار از فرآیند گرماکافت استفاده می‌شود که شرایط انجام هر یک از این فرآیندها و برخی از واکنش‌هایی که در ساختمان زیست‌توده اتفاق می‌افتد متفاوت می‌باشد (۱۱).

(۲) در فرآیند HTC نیاز به خشک کردن پیش‌ماده نیست؛ درحالی‌که در مورد بیوچار، پیش‌ماده باید قبل از انجام فرآیند گرماکافت خشکانده شود و برای خشکاندن زیست‌توده انرژی لازم است (۱۳). این مسئله در مورد زیست‌توده‌های با درصد رطوبت بالا مانند لجن فاضلاب و کودهای دامی اهمیت بیشتری دارد.

(۳) تولید هیدروچار نسبت به بیوچار در دمای کم‌تری انجام می‌شود. بنابراین، تولید هیدروچار نسبت به بیوچار به انرژی کم‌تری نیاز دارد. علاوه بر آن، حضور مداوم جریان گاز بی‌اثر مانند نیتروژن یا آرگون در تولید بیوچار لازم ولی برای هیدروچار ضروری نیست. بنابراین، تولید هیدروچار از نظر اقتصادی باصرفه‌تر می‌باشد (۶).

(۴) در فرآیند HTC، بر اثر دما و فشار و حضور آب، عناصر غذایی زیست‌توده حل و وارد فاز محلول شده و یک محلول غنی

هیدروچار می‌تواند علاوه بر عناصر، از آبشویی آفت‌کش‌ها و ورود آنها به آب‌های زیرزمینی نیز جلوگیری نماید. الستی و قرخلو (۱۳۹۴) تأثیر بیوچار بر جذب و آبشویی علف‌کش‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند (۳۵). با وجود اینکه اثرهای مثبت هیدروچار بر بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک اثبات شده است (۲۷، ۳۱ و ۳۳) ولی نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که افزودن هیدروچار به خاک دارای اثرات ناچیز بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک داشته است. به‌عنوان مثال، نواک و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی اثر بیوچار و هیدروچارهای تولید شده از انواع مواد لیگنوسلولزی و کودهای دامی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی دو نوع خاک با حاصلخیزی بالا (مالی‌سول) و حاصلخیزی پایین (انتی‌سول) نشان دادند که هم بیوچار و هم هیدروچار افزوده شده به خاک دارای اثرهای ناچیزی بر شاخص‌های حاصلخیزی خاک نظیر pH، CEC و فسفر و پتاسیم قابل جذب داشت (۳۶). بارجمن و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که هیدروچار و محلول واکنش آن باعث کاهش جوانه زنی جو شد و علت آن را به وجود برخی اسیدهای آلی در هیدروچار نسبت دادند. با این حال، تاکنون پژوهش‌های کمتری در مورد اثر هیدروچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و رشد گیاه انجام شده و اطلاعات در این زمینه بسیار اندک می‌باشد (۳۷).

کربونیزه کردن گرمایی ممکن است در محیط آبی (HTC) و یا در اتمسفر گازی انجام شود (گرماکافت). گرماکافت عبارت است از حرارت دادن زیست‌توده معمولاً در دماهای کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس در محیط بدون اکسیژن و یا با اکسیژن محدود. برای ایجاد شرایط با اکسیژن محدود و خارج ساختن گاز و بخارات تولید شده در گرماکافت، از جریان مداوم یک گاز بی‌اثر مانند نیتروژن و یا آرگون استفاده می‌شود. مواد جامد کربنی که در طی فرآیند گرماکافت تولید می‌شود بیوچار نامیده می‌شود (۱) و از نظر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با هیدروچار متفاوت می‌باشد. برخی از تشابهات و تفاوت‌های بیوچار و هیدروچار به اختصار به شرح زیر می‌باشد:

تواند بدون تغییر شیمی محلول، انواع آلاینده‌ها را از محیط‌های آبی جذب نماید. با این حال، هر دو ماده به‌علت دارا بودن ویژگی‌های خاص، باعث بهبود ویژگی‌های خاک (به‌ویژه ویژگی‌های فیزیکی) می‌شوند (۱۱).

(۱۲) تاکنون هیدروچار به اندازه بیوچار مورد توجه و مطالعه قرار نگرفته و ماهیت، واکنش‌ها و فرآیندهای مرتبط با آن ناشناخته‌تر از بیوچار می‌باشد (۶، ۱۰ و ۱۳).

سان و همکاران (۲۰۱۴) برای تولید بیوچار و هیدروچار از سه زیست‌توده، درخت گردوی آمریکایی، باگاس و بامبو در دماهای مختلف استفاده و ویژگی‌های هیدروچار و بیوچارهای تولید شده را بررسی کردند. آنان برای تولید بیوچار از سه دمای ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس و برای تولید هیدروچار از ۲۰۰ درجه سلسیوس استفاده و مشاهده کردند که pH و غلظت کربن و عناصر  $Al$ ،  $P$ ،  $K$ ،  $Ca$ ،  $Mg$  در هیدروچار نسبت به بیوچار کم‌تر و درصد هیدروژن، اکسیژن و نسبت  $O:C$  و  $H:C$  در هیدروچار نسبت به بیوچار بیشتر بود. همچنین، سطح ویژه هیدروچار کم‌تر از بیوچار بوده و سطح ویژه و pH بیوچار و هیدروچار با افزایش دمای واکنش افزایش یافت. آنان نشان دادند که دمای بالا باعث افزایش درصد کربن و نیز افزایش مقاومت و پایداری بیوچار و هیدروچار می‌شود (۱۳).

#### خلاهای تحقیقاتی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- (۱) با توجه به تأثیر مستقیم و غیرمستقیم هیدروچار (و بیوچار) بر تغییرات و چرخه نیتروژن، کربن و سایر عناصر غذایی در خاک، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتر در این زمینه انجام شود.
- (۲) پیشنهاد می‌شود در مورد تعیین ویژگی‌های محلول حاصل از واکنش کربونیزه کردن گرمایی تحقیقاتی انجام و امکان کاربرد آن به‌عنوان کود (مصرف خاکی و محلول‌پاشی) مورد بررسی قرار گیرد.
- (۳) با توجه به شباهت ساختمانی هیدروچار به موادی مانند پیت، پیشنهاد می‌شود امکان استفاده از

از عناصر تولید می‌شود که حتی قابلیت استفاده به‌عنوان کود را دارد؛ در حالی که در فرآیند تولید بیوچار، گاز و روغن زیستی تولید می‌شود که کاربرد و استفاده آن‌ها مشکل است (۱۱).

(۵) کاربرد هیدروچار راحت‌تر از بیوچار می‌باشد. چون هیدروچار نسبت به بیوچار راحت‌تر پلت می‌شود. پلت کردن باعث افزایش چگالی انرژی، کاهش هزینه‌های انتقال و راحتی کاربرد می‌شود (۳۸). علاوه بر آن، به‌علت مرطوب بودن هیدروچار، موقع افزودن به خاک هدررفت آن به‌صورت غبار وجود ندارد (برخلاف بیوچار) (۶).

(۶) هیدروچار نسبت به بیوچار عناصر کم‌مقدار کم‌تری داشته و به همین علت، دارای pH اسیدی‌تری نسبت به بیوچار می‌باشد (۱۳).

(۷) هیدروچار نسبت به بیوچار عملکرد (نسبت ماده جامد کربن-دار به زیست‌توده) بیشتری دارد. بنابراین، در هیدروچار نسبت به بیوچار کربن بیش‌تری تثبیت می‌شود (۶).

(۸) در HTC، گاز کم‌تری نسبت به گرماکافت تولید شده و زیست‌توده عمدتاً به هیدروچار و بخش محلول تبدیل می‌شود. بنابراین، در تولید هیدروچار گاز دی‌اکسیدکربن کم‌تری تولید می‌شود (۶).

(۹) هیدروچار به‌علت داشتن گروه‌های عاملی قطبی (مانند  $-OH$ ،  $-C=O$  و  $-COOH$ ) در سطح خود، در مقایسه با بیوچار جاذب‌الرطوبه‌تر می‌باشد (۱۵).

(۱۰) هیدروچار نسبت به بیوچار دارای نسبت  $O:C$  و  $H:C$  بیش‌تر و حلقه‌های آروماتیک کم‌تری می‌باشد. در نتیجه، کربن هیدروچار فراهم‌تر از کربن بیوچار بوده و سرعت تجزیه هیدروچار نسبت به بیوچار بیشتر می‌باشد. با این حال، تثبیت و ماندگاری کربن در هیدروچار نیز همانند بیوچار زیاد می‌باشد (۶ و ۱۵).

(۱۱) هیدروچار نسبت به بیوچار درصد عناصر غذایی کم‌تری دارد (۱۳). بنابراین، در افزودن مستقیم به خاک، بیوچار نسبت به هیدروچار، می‌تواند عناصر غذایی بیش‌تری در اختیار گیاه قرار دهد؛ ولی هیدروچار به‌علت داشتن مقدار عناصر معدنی کم، می-

- 4- Gronwald, M., Don, A., Tiemeyer, B., and Helfrich, M. 2015. Effects of fresh and aged chars from pyrolysis and hydrothermal carbonization on nutrient sorption in agricultural soils. *Soil*, Vol. 1, pp. 475–489.
- 5- Gajic, A., and Koch, H.J. 2012. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) growth reduction caused by hydrochar is related to nitrogen supply. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 41, pp. 1067-1075.
- 6- Libra, J.A., Ro, K.S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.H. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Advanced Biofuels*, Vol. 2, pp. 89-24.
- 7- Yakaboylu, O., Harinck, J., Smit, K.G., de Jong, W. 2013. Supercritical water gasification of manure: A thermodynamic equilibrium modeling approach. *Biomass Bioenergy*, Vol. 59, pp. 253–263.
- 8- Castello, D., Kruse, A, Fiori, L. 2014. Supercritical water gasification of hydrochar, *Chemical Engineering Research and Design* <http://dx.doi.org/10.1016/j>.
- 9- Castello, D., Fiori, L. 2011. Supercritical water gasification of biomass: Thermodynamic constraints. *Bioresearch Technology*, Vol. 102, pp. 7574-7582.
- 10- Kruse, A., Funke, A., Titirici, M.M. 2013. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. هیدروچار به عنوان بستر کشت در کشت‌های گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.
- (۴) با توجه به اینکه pH هیدروچار غالباً کمتر از ۷ بوده و اسیدی می‌باشد، پیشنهاد می‌شود زیست‌توده‌هایی که در مناطق مختلف کشورمان به مقدار زیاد تولید می‌شود و در عین حال دارای ارزش اقتصادی زیادی نمی‌باشند، تبدیل به هیدروچار شده و اثرات آنها بر ویژگی‌های خاک‌های آهکی و قلیایی و کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مورد بررسی قرار گیرد.
- (۵) با توجه به هدررفت زیاد نیتروژن از طریق آبشویی، تصعید آمونیاک و نیترات‌زدایی در شالیزارها و تصعید زیاد متان و اکسیدهای نیتروژن از این خاک‌ها، پیشنهاد می‌شود اثر هیدروچار بر چرخه نیتروژن و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از شالیزار مورد بررسی قرار گیرد.
- (۶) پیشنهاد می‌شود با استفاده از رسانه‌ها (مانند صدا و سیما و روزنامه‌ها) و برگزاری همایش، هیدروچار و کاربردهای آن معرفی و ترویج شود.
- منابع
- 1- Lehmann, J. and Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earth scan, London & Sterling, VA. 416p.
- 2- Uchimiya, M., Chang, S., Klasson, K.T. 2011. Screening biochars for heavy metal retention in soil: role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 190, pp. 432–441.
- 3- Yoshimura, M., and Byrappa, K. 2008. Hydrothermal processing of materials: past, present and future. *Journal of Material Science*, Vol. 48, pp. 2085-2103.

- reforming of oxygenated hydrocarbons over supported metal catalysts. *Applied Catalysis*, Vol. 56, pp. 171–186.
- 17- Akhtar, J., Amin, N.A.S. 2011. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1615–1624.
- 18- Hu, B., Wang, K., Wu, L., Yu, S.H., Antonietti, M., Titirici, M.M. 2010. Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. *Advanced Materials*, Vol. 22, pp. 813–828.
- 19- Jin, F., Enomoto, H. 2009. Hydrothermal conversion of biomass into value added products: technology that mimics nature. *Bioresources*, Vol. 4, pp. 704–713.
- 20- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, Vol. 158(3-4), pp. 436-442.
- 21- Liu, Z., Quek, A., Parshetti, G., Jain, A., Srinivasan, M.P., Hoekman, S.K., Balasubramanian, R. 2013. A study of nitrogen conversion and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions during hydrochar–lignite co-pyrolysis. *Applied Energy*, Vol. 108, pp. 74–81.
- 22- Basso, D., Ragazzi, M., Rada, E.C., Fiori, L. 2014. Release of PCDD/Fs during a hydrothermal carbonization process of organic waste residues. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 76(2), pp. 199-212.
- 23- Liu, Z., Quek, A., Balasubramanian, R. 2014. Preparation and characterization
- Current Opinion in Chemical Biology*, Vol. 17, pp. 515–521.
- 11- Fang, J., Gao, B., Chen, J., Zimmerman, R. 2015. Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 267, pp. 253–259.
- 12- Cui, X., Antonietti, M., Yu, S.H. 2006. Structural effects of iron oxide nanoparticles and iron ions on the hydrothermal carbonization of starch and rice carbohydrates. *Small*, Vol. 2, pp. 756–759.
- 13- Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., Chen, H., Yang, L. 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 240, pp. 574–578
- 14- Guiotoku, M., Hansel, F.A., Novotny, E.H., de Freitas Maia, C.M.B. 2012. Molecular and morphological characterization of hydrochar produced by microwave-assisted hydrothermal carbonization of cellulose. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, Vol. 47(5), pp. 687-692.
- 15- Titirici, M.M., Antonietti, M. 2010. Chemistry and materials options of sustainable carbon materials made by hydrothermal carbonization. *Chemical Society Review*, Vol. 39, pp.103-116.
- 16- Davda, R.R., Shabaker, J.W., Huber, G.W., Cortright, R.D., Dumesic, J.A. 2005. A review of catalytic issues and process conditions for renewable hydrogen and alkanes by aqueous-phase

- soil application of treated and untreated manures. *Journal of Agricultural Science*, pp.1-9.
- 30- Dicke, C., Lanza, G., Mumme, J., Ellerbrock, R., Kern, J. 2014. Effect of HTC-char application on trace gas emissions from two sandy soil horizons. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 43, pp. 1790–1798.
- 31- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, Vol. 105, pp. 47-82.
- ۳۲- نجفی قیری، مهدی، تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر برخی ویژگی‌های خاک و قابلیت جذب بعضی از عناصر غذایی در یک خاک آهکی، ۱۳۹۴، نشریه پژوهش‌های خاک. جلد ۲۹. شماره ۳. ۳۵۱-۳۵۸.
- 33- Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, Vol. 202–203, pp. 183–191.
- 34- Bargmann, I., Rillig, M.C., Kruse, A., Greef, J.M., Kücke, M. 2014. Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 177, pp. 48–58.
- ۳۵- الستی، امید، فرخلو، جاوید، مروری بر تأثیر بیوچار در جذب و آبشویی علف‌کش‌ها، ۱۳۹۴، مجله پژوهش علف‌های هرز. جلد ۷. شماره ۱. ۱-۲۰.
- 36- Novak, J.A., Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Ro, K.S., Watts, D.W., Glaz, B., Busscher, W.J., Hunt, P.G. 2014. Effects of biochars and hydrochars produced from lignocellulosic and animal manure of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 1315–1322.
- 24- Sun, K., Ro, K., Guo, M.X., Novak, J., Mashayekhi, H., Xing, B.S. 2011. Sorption of bisphenol a, 17 alpha-ethinyl estradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars. *Bioresource Technology*, Vol. 102, pp. 5757–5763.
- 25- Wigmans, T. 1989. Industrial aspects of production and use of activated carbon, *Carbon*, Vol. 27(1), pp. 13-22.
- 26- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M., Zimmerman, A.R., Ro, K.S. 2012. Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: Batch and column tests. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 200–202, pp. 673–680.
- 27- Bustamante, M.A., Albuquerque, J.A., Restrepo, A.P., De La Fuente, C., Paredes, C., Moral, R., Bernal, P. 2012. Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added value materials for use in agriculture. *Biomass and Energy*, Vol. 43, pp. 26-65.
- 28- Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T., Oleskowicz-Popiel, P. 2009. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, Vol. 100(22), pp. 5478-5484.
- 29- Monaco, S., Sacco, D., Pelisetti, S., Dinuccio, E., Balsari, P., Rostami, M., Grignani, C. 2011. Laboratory assessment of ammonia emissions after

- 
- 38- Reza, M.T., Lynam, J.G., Vasquez, V.R., Coronella, C.J. 2012. Pelletization of biochar from hydrothermally carbonized wood, *Environmental Progress of Sustainable Energy*, Vol. 31, pp. 225–234.
- 37- Bargmann, I., Rillig, M.C., Buss, W., Kruse, A., Kücke, M. 2013. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, Vol. 199, pp. 360-373.
- on fertility of a Mollisol and Entisol. *Soil Use Management*, Vol. 30, pp. 175-181.