

# ● بیوپچار (Biochar)، روشی کارآمد جهت بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش عملکرد گیاهان زراعی

شریا نوید | دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

## چکیده

کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین واقع شده است که در بیش از ۶۰ درصد از اراضی، میزان کربن آلی کمتر از یک درصد بوده و اغلب واکنش قلیایی یا آهکی است. افزودن مواد آلی به خاک بسته به خصوصیات آن‌ها، بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اثر مثبت و متفاوتی می‌گذارد. بنابراین مواد آلی می‌توانند با بهینه کردن شرایط رشد گیاه، تولید محصولات کشاورزی را از نظر کیفی و کمی افزایش دهند. اخیراً استفاده از بیوپچار در زمین‌های کشاورزی، به عنوان منبع تأمین کننده مواد آلی برای رشد گیاه، بهبود خصوصیات خاک (از جمله: فعالیت آنزیمی، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، وزن مخصوص ظاهری، ظرفیت نگهداری آب و مقدار قابل جذب عناصر)، کاهش تغییرات آب‌وهوایی و افزایش تولید محصولات کشاورزی، مورد توجه محققین قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: پیرولیز، ترسیب کربن، تغییر اقلیم، عناصر غذایی، مواد آلی.

## مقدمه

سال‌های اخیر، مصرف روزافزون کودهای شیمیایی، توسعه کشت متمرک، استفاده از ارقام پرمصرف، عدم برگشت بقایای گیاهی به خاک و سوزاندن آن‌ها، باعث کاهش بیش از حد معمول مقدار ماده آلی، قدرت باروری و حاصلخیزی خاک شده است. با توجه به نقش مواد آلی در بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، مقدار بهینه کربن آلی در خاک برای دستیابی به تولید پایدار، حداقل بین دو تا سه درصد برآورد شده است. افزودن مواد آلی به خاک بسته به خصوصیات آن‌ها، بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک از جمله: فعالیت آنزیمی، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، وزن مخصوص ظاهری، ظرفیت نگهداری آب و افزایش مقدار قابل جذب عناصر اثر مثبت و متفاوتی می‌گذارد. بنابراین مواد آلی می‌توانند با بهینه کردن شرایط رشد گیاه، تولید محصولات را از نظر کیفی و کمی افزایش دهند.

بیوپچار، فرآورده‌ی جانبی غنی از کربن است که از زیست توده بقایای محصولات کشاورزی، چوب، پسماند و غیره، در طی فرآیند پیرولیز (سوزاندن در یک محیط با اکسیژن کم یا بدون اکسیژن)، تولید می‌شود. استفاده از بیوپچار به عنوان یک افزودنی خاک، به طور هم‌زمان به کاهش تغییرات آب‌وهوایی توسط انسان، بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصولات کشاورزی منجر می‌شود.

## تاریخچه و اهمیت بیوپچار

بیوپچار (Biochar)، از ادغام دو واژه بیومس (Biomass)، به معنای زیست توده و چارکول (Charcoal) به معنای زغال، تشکیل شده است. این کلمه از قرن بیستم وارد ادبیات علمی جهان شده است، هرچند استفاده از این ترکیب به سال‌های قبل از کشف قاره آمریکا (تا پانصد سال قبل)، برمی‌گردد. بیوپچار یک کلمه جدید برای بسیاری، اما یک فناوری سنتی در مناطق مختلف جهان می‌باشد، لذا اهمیت بیوپچار در کشاورزی به‌تازگی کشف مجدد شده است.

مدت‌ها قبل از کشف قاره آمریکا توسط کریستف کلمب، قبایل بومی مناطق آمازون و مشخصاً منطقه‌ی تراپرتا از تکنیکی برای افزایش حاصل‌خیزی زمین‌هایشان استفاده می‌کردند (شکل ۱). مسلم است که آن‌ها از علوم شیمی و زیست شناسی اطلاعاتی نداشتند و این روش را با کمک آزمون و خطا یافته بودند. تکنیک آن‌ها شامل سوزاندن ضایعات کشاورزی بود، در حالی که روی آن‌ها را با خاک پوشانده بودند و در واقع بقایای گیاهی را در شرایط غیرهوازی می‌سوزاندند. آزمایش روی خاک‌های تراپرتا نشان داد که این خاک‌ها به شدت حاصل‌خیز بوده و این ترکیب توانست کیفیت و کمیت محصول را به شکل چشم‌گیری افزایش دهد. همچنین سبب شد که ساختار ترکیبی خاک و نگهدارندگی آب بهبود زیادی پیدا کند. نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد

این است که خاک‌های منطقه تراپرتا

پس از گذشت قرن‌ها، هنوز غنی

بوده و کیفیت حاصل‌خیزی

خودش را حفظ کرده

است.

از طرف دیگر نیز گرچه خاک‌ها با سازوکارهای مختلف مانند: رسوب، جذب سطحی و واکنش‌های احیا، ظرفیت طبیعی برای کاهش تحرک فلزات دارند، ولی با افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک، این آلاینده‌ها می‌توانند متحرک شده و در نتیجه آلودگی‌هایی برای محصولات کشاورزی و آب‌های زیرزمینی ایجاد نمایند. بیشتر فلزات سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی، دچار تجزیه بیولوژیکی یا شیمیایی نمی‌شوند. بنابراین مدت زمان طولانی در خاک باقی می‌مانند. نتیجه مستقیم انباشتگی فلزات سنگین در خاک، تهدید اکولوژیکی گیاهان و سایر جانداران در خاک‌های آلوده و در پی آن تهدید سلامت انسان از طریق ورود به زنجیره غذایی است. به‌سازها از طریق ساز و کارهای جذب سطحی، واکنش‌های اسید و باز، رسوب، اکسایش و احیا، کمپلکس شدن، تبادل کاتیونی و هوموسی شدن، باعث غیرپویا شدن و تثبیت فلزات سنگین در خاک می‌شوند. به‌ساز مناسب، تحرک و فراهمی آلاینده‌ها را به‌سرعت کاهش داده و از آبخوبی و جذب آن به‌وسیله گیاهان و جانداران خاک می‌کاهد. بنابراین، کاربرد بیوپچار، با توجه به منافع بالقوه زراعی و زیست‌محیطی که دارد، به عنوان یک ماده اصلاح‌کننده خاک به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه سیاست‌گذاران در کشورهای توسعه یافته قرار گرفته است.

## منابع ماده آلی در ایران

منابع مواد آلی در ایران تنوع زیادی دارد و شامل: بقایای گیاهی حاصل از فعالیت‌های زراعی، کودهای دامی و مرغی، گیاهان پوششی (کودهای سبز)، مواد حاصل از زباله‌های شهری پس از بازیافت آن‌ها، کمپوست حاصل از باگاس نیشکر، بقایای گیاهی، ضایعات کشت و صنعت‌های تولید قارچ خوراکی، کارخانجات دخانیات و چای خشک کنی، ضایعات کارخانجات قند و قاضلاب شهری و نیز سایر موارد مشابه می‌باشد. اگرچه از دیرباز استفاده از بقایای کشاورزی، دامی و شهری به عنوان یکی از راهکارهای تأمین این ماده گران‌بها می‌باشد، اما کاربرد مستقیم این مواد در زمین‌های کشاورزی می‌تواند تولید مواد سمی و پاتوژن‌ها را به‌همراه داشته باشد. بنابراین لازم است این مواد به محصولات پایدار و بی‌ضرر تبدیل شوند که استفاده از بیوپچار در زمین‌های کشاورزی، به‌عنوان منبع تأمین‌کننده مواد آلی برای رشد گیاه و اصلاح‌کننده‌ای برای بهبود خصوصیات خاک رونق زیادی یافته است.





شکل ۲- مزایای بیوپچار

بیوپچار می‌تواند از هر زیست توده‌ای از جمله پسماندهای زراعی (کاه و کلش، شلتوک برنج، دامی، جنگلی (شاخ و برگ و چوب)، خانگی (تایر اتومبیل، لجن فاضلاب و غیره)، کودهای حیوانی و دامی ساخته شود. مواد اولیه تحت یک فرآیند به نام گرماکافت یا تجزیه حرارتی - شیمیایی که نتیجه آن یک بازآرایی در مولکول زیست توده می‌باشد، تبدیل به بیوپچار سیاه رنگ و سایر محصولات می‌شوند. بیوپچار، بسیار متفاوت از زغال سنگ معدنی است. منشأ زغال سنگ معدنی زیست توده است که توسط فرآیندهای زمین‌شناسی در طول دوره‌های زمین‌شناسی شکل گرفته است. برای تولید غیرطبیعی بیوپچار در مقادیر زیاد، معمولاً از دستگاه‌های بزرگی که برای این منظور ساخته می‌شوند، استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها دارای یک مخزن بزرگ می‌باشند که زیست توده در داخل آن ریخته شده و حرارت داده می‌شود. زیست توده مواد آلی در طی فرآیند گرماکافت، تبدیل به گاز زیستی، روغن زیستی و زغال زیستی (بیوپچار)، می‌شود. از گاز و روغن زیستی می‌توان برای تولید انرژی استفاده کرد. ولی بیوپچار به‌علت ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد، به‌عنوان اصلاح کننده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. دستگاه تولید بیوپچار دارای یک مخزن می‌باشد که زیست توده در داخل آن قرار داده می‌شود و بعد از خارج کردن اکسیژن، حرارت داده می‌شود و بدین ترتیب، زیست توده داخل مخزن تبدیل به بیوپچار شده و روغن و گاز زیستی تولید شده نیز از طریق خروجی‌هایی که بدین منظور در مخزن تعبیه شده‌اند، خارج می‌شوند. شرایط فرآیند گرماکافت مانند: حداکثر دمای گرماکافت، سرعت افزایش دما و مدت زمان ماندن در دمای حداکثر تأثیر زیادی بر ویژگی‌های بیوپچار و درصد ترکیب و عناصر بیوپچار می‌گذارد. فرآیند گرماکافت، باعث خارج شدن هیدروژن و اکسیژن از ساختمان زیست توده می‌شود. با کاهش نسبت هیدروژن به کربن و اکسیژن به کربن در ساختمان بیوپچار، درصد آروماتیسیته (Aromaticity)، کربن در بیوپچار افزایش می‌یابد.



شکل ۱- خاک‌های باستانی تراپرتا (خاک‌های سیاه) در جنگل‌های آمازون

مطالعه و تحقیق روی این خاک‌ها با توجه به ویژگی‌ها و منافعی که در کوتاه مدت و درازمدت در پی داشت، در قرن اخیر به طور چشمگیری افزایش یافت. بیوپچار یا زغال زیستی، زغال تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که به‌عنوان کود استفاده می‌شود. این ماده به‌صورت جامد بوده و سرشار از کربن است که می‌تواند آن را به مدت هزاران سال در خود نگاه دارد. بیوپچار شامل کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و خاکستر در مقادیر متنوع است. امروزه بیوپچار توسط فرآیند مدرنیزه شده پیرولیز (Pyrolysis)، یا گرماکافت تولید می‌شود. پیرولیز یک واژه یونانی می‌باشد که خود از ترکیب دو واژه pyro به معنای آتش و lysis به معنای جداسازی تشکیل شده است. لذا به فرآورده‌ی جانبی غنی از کربن پایدار وقتی که زیست توده در طی فرآیند گرماکافت در نتیجه سوزاندن مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود، بیوپچار گفته می‌شود. به‌طور کلی بیوپچار برای تحقق چهار هدف مدیریت ضایعات، کاهش تغییرات اقلیمی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید انرژی و همچنین بهبود خصوصیات خاک استفاده می‌شود (شکل ۲). تحقیقات نشان داده است که بیوپچار می‌تواند به عنوان یک ذخیره کربنی برای صدها تا هزاران سال در خاک باقی بماند و با ترسیب کربن و مدیریت خاک تأثیر عمده‌ای در کاهش گازهای گلخانه‌ای و بهبود پدیده گرمایش جهانی داشته باشد. طبق تعریفی دیگر، بیوپچار یک ماده پایدار غنی از کربن است که بسیار آهسته تجزیه می‌شود و هنگامی که به خاک اضافه گردد، می‌تواند کیفیت خاک را بهبود بخشد. بیوپچار به‌علت سرعت تجزیه پایین نسبت به سایر مواد آلی، ظرفیت زیادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای از قبیل دی‌اکسید کربن و متان که از ضایعات کشاورزی آزاد می‌شود را دارد و می‌تواند کربن را برای دوره‌های طولانی ذخیره کند.

بنابراین، کربن آلی بیوپچار ساختار آروماتیکی داشته و در برابر تجزیه‌های زیستی و غیر زیستی مقاومت بسیار زیادی دارد. با افزایش دما، درصد بیوپچار و درصد کربن آن کاهش یافته ولی درصد آروماتیک بودن کربن افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت و پایداری زیستی بیوپچار می‌شود. همچنین با افزایش دمای گرمakافت درصد تولید گاز زیستی، درصد تولید روغن زیستی تا حدی از دما (حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس)، افزایش و سپس با افزایش دما کاهش می‌یابد. کاهش درصد روغن تولید شده در دمای بالاتر به علت تبدیل آن به گاز زیستی در دمای بالا می‌باشد. بنابراین، بیوپچار تولید شده در دمای گرمakافت کم نسبت به دمای بالا، به علت دارا بودن درصد بیشتری از عناصر غذایی دارای ویژگی اصلاح کنندگی بهتری برای خاک می‌باشد. بیوپچار تولید شده در دمای گرمakافت بالا، به علت مقاومت زیاد کربن در برابر تجزیه، دارای ظرفیت زیادی برای ترسیب کربن می‌باشد.

افزودن مواد طبیعی به خاک جهت اصلاح و بهبود خاک، کاهش فرسایش، کاهش بیابان‌زایی و افزایش بهره‌وری مصرف آب از بهترین گزینه‌ها در این رابطه می‌تواند باشد. توانایی بالای بیوپچار در حفظ آب و مواد غذایی به خصوصیات فیزیکی آن از قبیل ساختار متخلخل و سطح ویژه‌ی بالای آن برمی‌گردد. همین ویژگی باعث در دسترس بودن آب و مواد غذایی برای گیاه و جلوگیری از هدر رفت آب و آبشویی مواد مغذی می‌شود. ظرفیت نگهداری آب خاک، تحت تأثیر ترکیب آلی و معدنی خاک قرار می‌گیرد. با افزایش مواد آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک نیز افزایش می‌یابد. بیوپچار دارای جرم مخصوص کم و تخلخل بالا است و شبیه به خزه اسفنگوم، وقتی خشک است به سختی می‌توان آن را مرطوب کرد، اما می‌تواند مقادیر زیادی آب را نگه دارد. ساختار مولکولی گسترده کربن‌های آروماتیک بیوپچار باعث پایداری زیاد آن در خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک می‌شود. ترکیب ناهمگن بیوپچار باعث می‌شود که برهم‌کنش با خاک، ویژگی‌های آب‌دوست،

آب‌گریز، اسیدی و بازی از خود نشان دهد.

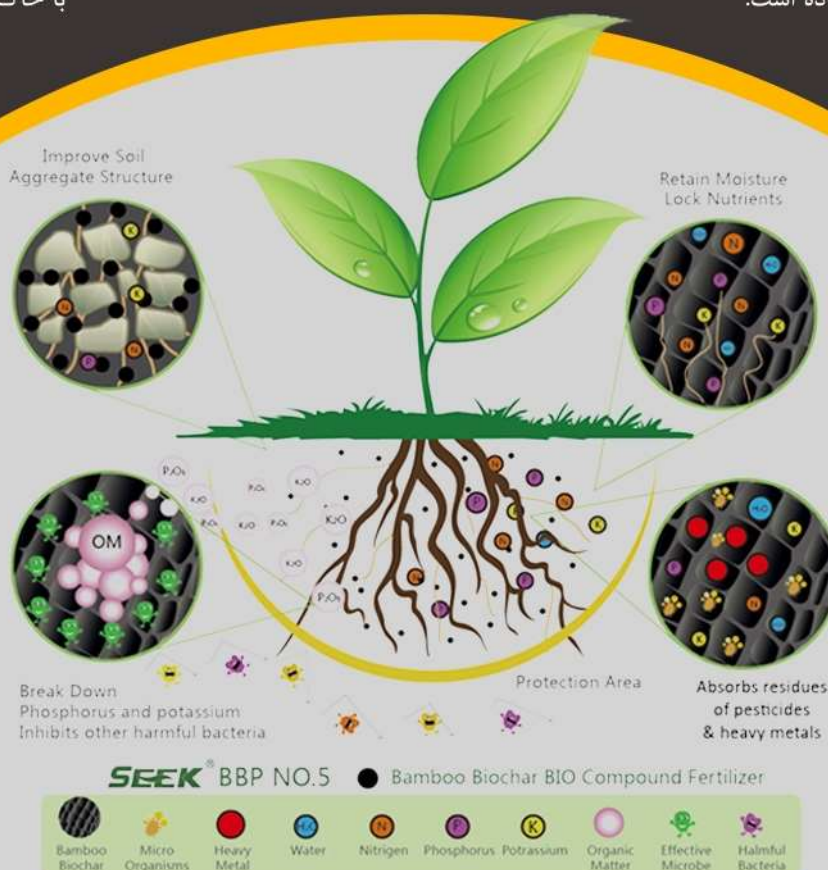
بنابراین، کربن آلی بیوپچار ساختار آروماتیکی داشته و در برابر تجزیه‌های زیستی و غیر زیستی مقاومت بسیار زیادی دارد. با افزایش دما، درصد بیوپچار و درصد کربن آن کاهش یافته ولی درصد آروماتیک بودن کربن افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت و پایداری زیستی بیوپچار می‌شود. همچنین با افزایش دمای گرمakافت درصد تولید گاز زیستی، درصد تولید روغن زیستی تا حدی از دما (حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس)، افزایش و سپس با افزایش دما کاهش می‌یابد. کاهش درصد روغن تولید شده در دمای بالاتر به علت تبدیل آن به گاز زیستی در دمای بالا می‌باشد. بنابراین، بیوپچار تولید شده در دمای گرمakافت کم نسبت به دمای بالا، به علت دارا بودن درصد بیشتری از عناصر غذایی دارای ویژگی اصلاح کنندگی بهتری برای خاک می‌باشد. بیوپچار تولید شده در دمای گرمakافت بالا، به علت مقاومت زیاد کربن در برابر تجزیه، دارای ظرفیت زیادی برای ترسیب کربن می‌باشد.

### الف) تأثیر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

- توزیع اندازه ذرات و ساختمان خاک: بیوپچار بعد از افزوده شدن به خاک، بر اثر هوادهی و قرار گرفتن در معرض فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، با گذشت زمان به ذرات کوچک‌تر (اندازه سیلت و یا کوچک‌تر)، تبدیل شده و بدین ترتیب می‌تواند توزیع اندازه ذرات خاک را تغییر دهد. با افزایش کربن آلی، تخلخل، سطح ویژه و بهبود فعالیت میکروبی خاک، می‌تواند خاکدانه‌سازی را تحت تأثیر قرار داده و ساختمان خاک را بهبود بخشد.

- نفوذ و نگهداری آب در خاک: شرایط خشک حاکم بر کشور ایران باعث شده است که بیش از ۲۰ درصد از مساحت کشور معادل ۳۲/۵۸ میلیون هکتار را بیابان تشکیل دهند. سهم ایران از خشکی‌های جهان حدود ۱/۲ درصد است درحالی‌که ۲/۴ درصد از بیابان‌های جهان را در خود جای داده است.

آبگریزی خاک می‌تواند عوارض شدید جانبی از



محققان معتقدند که بیوپچار باعث بهبود نفوذپذیری خاک می‌شود. بیوپچار می‌تواند توزیع اندازه منافذ، ساختمان، تخلخل و چگالی ظاهری خاک را تغییر داده و الگوی نفوذپذیری و مسیر جریان‌های ترجیحی و ماتریس آب و محلول خاک را تغییر داده و باعث افزایش نفوذپذیری خاک شود. لازم به ذکر است که این اثر بیوپچار کوتاه مدت می‌باشد، چون بعد از افزوده شدن به خاک، به سرعت به ذرات کوچکتر تبدیل می‌شود و ممکن است نفوذپذیری خاک را در بلندمدت کاهش دهد.

**- سطح ویژه (Specific Surface Area):** یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بیوپچار که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، سطح ویژه زیاد آن می‌باشد. سطح ویژه بیوپچار بسیار متغیر بوده و گستره وسیعی دارد و به شدت تحت تأثیر زیست توده اولیه و شرایط تولید بیوپچار قرار می‌گیرد. بیوپچارهای ساخته شده از یک زیست توده یکسان، به علت متفاوت بودن شرایط تولید، ممکن است که دارای سطح ویژه متفاوتی باشند. سطح ویژه و توزیع منافذ ریز بیوپچار با افزایش دمای گرماکافت افزایش می‌یابد و این دو ویژگی به هم مرتبط می‌باشند.

**- فرسایش خاک:** مواد آلی خاصیت آبریزی دارند و در صورتی که به صورت پوشش بر روی سطح ذرات خاک قرار گیرند، ممکن است باعث افزایش دفع آب توسط ذرات خاک شده و فرسایش خاک را تشدید کنند. به عقیده محققین، مواد آلی قرار گرفته در سطوح ذرات خاک عامل اصلی دفع آب خاک می‌باشند. افزایش آبریزی خاک، بعد از آتش‌سوزی در خاک‌ها به تولید ترکیب‌های آلی فرار و آبریز مربوط می‌باشد. چنین ترکیب‌هایی در بیوپچار نیز وجود دارد، ولی افزودن بیوپچار به خاک نه تنها فرسایش‌پذیری خاک را افزایش نمی‌دهد، بلکه با بهبود ویژگی‌های مختلف خاک به ویژه ویژگی‌های فیزیکی خاک، خاکدانه‌سازی و ساختمان خاک را بهبود و فرسایش‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد. در آتش‌سوزی بر اثر گرمای آتش، ترکیب آلی فرار خارج شده از زیست‌توده در بین سطوح ذرات خاک پخش شده و همانند پوشش در سطوح ذرات خاک قرار گرفته و آبریزی خاک را افزایش می‌دهند. درحالی‌که بیوپچار ترکیب آلی فرار در سطوح ذرات باقی می‌ماند و باعث افزایش آبریزی خاک نمی‌شود. علاوه بر آن بیوپچار نسبت به ذرات خاک تمایل بیشتری برای جذب انواع ترکیب‌های آلی دارد و در جذب چنین ترکیب‌هایی موفق‌تر از ذرات خاک عمل می‌کند.

## ب) تأثیر بیوپچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

**- ظرفیت تبادل کاتیونی (Cations Exchange Capacity):** بیوپچار، نسبت به سایر مواد آلی خاک دارای سطح ویژه و بار منفی بیش‌تری می‌باشد که منجر به ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد بیوپچار و توانایی آن در جذب و نگهداری انواع ترکیب‌های آلی و معدنی می‌شود. مطالعات نشان داد که بیوپچار می‌تواند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را تا ۵۰ درصد افزایش و با کاهش شستشوی عناصر غذایی، فراهمی آن‌ها را برای گیاه افزایش دهد. با افزوده شدن بیوپچار به خاک، با اکسایش زیستی و غیر زیستی، گروه‌های عاملی کربوکسیلی سطح بیوپچار افزایش و بار منفی زیادی در سطح بیوپچار ایجاد می‌شود که باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود. بیوپچار تازه افزوده شده به خاک ممکن است در ابتدا ظرفیت تبادل آنیونی از خود نشان دهد، درحالی‌که بیوپچار مسن‌تر، در اسیدیته‌های بیش‌تر از سه، ظرفیت تبادل کاتیونی از خود نشان می‌دهد. تغییرات و پایداری بیوپچار در خاک، تحت تأثیر وضعیت رطوبت خاک نیز قرار می‌گیرد و وضعیت رطوبت خاک ممکن است معدنی شدن و تصاعد کربن بیوپچار را در شرایط مختلف خاک تحت تأثیر قرار دهد. بیوپچار به‌طور بالقوه می‌تواند باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها به ویژه برای خاک‌های با هوادیدگی بالا، خاک‌های ماسه‌ای فقیر از نظر عناصر غذایی شود.

**- فراهمی عناصر غذایی در خاک:** نقش بیوپار در عناصر غذایی خاک، به نوع زیست‌توده اولیه بستگی دارد، زیرا که میزان عناصر موجود در زیست توده گیاهان مختلف متفاوت می‌باشد. در تحقیقات مختلف در خصوص نقش بیوپار در فراهمی عناصر غذایی، نتایج متفاوتی گزارش شده است؛ به‌طوری که با افزودن بیوپار به خاک، هم کاهش و هم افزایش فراهمی عناصر غذایی خاک و جذب آن‌ها توسط گیاه گزارش شد. بیوپار به دو روش کلی بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی خاک تأثیر دارد: یکی افزودن و دیگری نگهداری عناصر غذایی.

معمولاً مقدار خاکستر بیوپارهای تولید شده از چوب، کمتر از بیوپارهای علفی می‌باشد که نشان می‌دهد مقدار عناصر غذایی زیست‌توده علفی بیشتر از چوب می‌باشد. مقدار نیتروژن کمتر در بیوپار چوبی نسبت به علفی، به نسبت C/N بالای چوب مربوط می‌شود که می‌تواند تا ۱۰۰۰ نیز برسد. خاکستر در بیوپار حاوی مواد مغذی گیاهی یا علفی، بیشتر کاتیون‌های بازی مانند: فسفر، کلسیم، پتاسیم، سدیم و منیزیم و عناصر کم مصرف روی و منگز می‌باشد و عناصر بیشتری نسبت به بیوپار چوبی دارند. با وجود این که معمولاً بیوپار علفی از نظر عناصر معدنی غنی‌تر از بیوپار چوبی می‌باشد، ولی تمام این عناصر برای گیاهان قابل استفاده نیستند. به عقیده محققین، بیوپار منبعی مستقیم برای عناصر پتاسیم، کلسیم، فسفر، روی و مس می‌باشد و فراهمی عناصر غذایی بر اثر افزودن بیوپار به خاک می‌تواند از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییر اسیدیته خاک و یا افزوده شدن مستقیم عنصر از بیوپار به خاک افزایش یابد.

عناصر معدنی موجود در زیست توده به استثنای نیتروژن عمدتاً در خاکستر بیوپار یافت می‌شود که در طی فرآیند گرماکافت، نسبت قابل توجهی از نیتروژن زیست توده از طریق تصاعد از دسترس خارج می‌شود. نیتروژن باقیمانده در بیوپار برای در دسترس قرار گرفتن گیاهان تمایل کمی دارد، چون یک جزء از آن درون ساختارهای کربنی آروماتیک قرار دارد. وقتی بیوپار به‌تنهایی به خاک افزوده می‌شود، به‌علت نسبت C/N زیاد (بیشتر از ۴۰۰)، ممکن است باعث غیرمتحرک شدن (Immobilization)، و کمبود نیتروژن در گیاهان شود. احتمالاً یکی از دلایل کاهش عملکرد گیاه پس از مصرف بیوپار در خاک، غیرمتحرک شدن نیتروژن می‌باشد. در برخی از تحقیقات نیز عدم کاهش نیتروژن خاک در اثر افزودن بیوپار به خاک گزارش شده است؛ چرا که کربن و نیتروژن قابل جذب میکروب‌ها در بیوپار محدود می‌باشد و حتی ممکن است بیوپار مولکول‌های آلی با نسبت C/N بالا را از محلول خاک جذب و معدنی شدن را افزایش دهد. تغییرات نیتروژن با افزودن بیوپار به خاک هنوز به‌خوبی مشخص نشده است و تحقیقات بیشتری نیاز است تا اثرهای مختلف بیوپار را بر معدنی و بی‌تحرك شدن نیتروژن در خاک مورد بررسی قرار دهد.

**- اسیدیته خاک:** با وجود این که به‌علت وجود عناصر قلیایی (مانند: کلسیم و منیزیم)، اسیدیته بیوپار عموماً خنثی تا قلیایی می‌باشد، ولی ممکن است اسیدیته آن از چهار تا ۱۲ تغییر کند که به نوع ماده آلی و شرایط گرماکافت بستگی دارد. بیوپارهای با منشأ چوبی دارای اسیدیته کمتری نسبت به بیوپارهای علفی می‌باشند. اسیدیته بیش‌تر بیوپار با منشأ علفی نسبت به چوبی، احتمالاً مربوط به وجود عناصر قلیایی (مانند: سدیم و پتاسیم بیش‌تر در گیاه علفی نسبت به چوب می‌باشد).

در خاک‌های اسیدی می‌توان از بیوپار قلیایی به‌عنوان عامل آهک و افزایش دهنده اسیدیته استفاده کرد. در مواردی که اسیدیته خاک بیش از حد مطلوب برای استفاده از آن می‌باشد، کاهش اسیدیته می‌تواند طیف گسترده‌ای از مزایا از نظر کیفیت خاک و بهبود رشد گیاه ایجاد نماید. اسیدیته خاک به طور مستقیم یا غیرمستقیم رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهم‌ترین نقش اسیدیته خاک کنترل حلالیت عناصر غذایی در خاک می‌باشد. به‌عبارت دیگر قابلیت جذب عناصر غذایی وابستگی زیادی به اسیدیته خاک دارد. عناصر غذایی در اسیدیته‌های مختلف، حلالیت‌های متفاوتی دارند. اسیدیته قلیایی باعث می‌شود که حلالیت عناصر غذایی ضروری برای گیاه کاهش پیدا کند و کمبود عناصر غذایی مثل: سرب (Pb)، آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn)، در گیاه مشاهده شود. یکی از مشکلاتی که در خاک‌های ایران وجود دارد، قلیایی بودن خاک است. کمبود بارندگی و دارا بودن اقلیمی خشک باعث تجمع بازهای تبادلی در خاک و در نتیجه قلیایی شدن خاک می‌شود که بیوپار اسیدی با تحریک رشد میکروارگانیسم‌های مفید باعث اصلاح اسیدیته خاک‌های قلیایی و بهبود رشد گیاه می‌شود.

### ج) تأثیر بیوپار بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک

برخی محققین اظهار داشتند که افزودن بیوپار به خاک باعث بهبود فعالیت میکروبی خاک و در برخی دیگر اثر سمی برخی ترکیب‌های آلی چسبیده به سطوح بیوپار بر ریزجانداران خاک گزارش شده است. سطوح بیوپار به‌علت جذب عناصر غذایی می‌تواند محیط مناسبی برای ریزجانداران خاکی باشد. علاوه بر آن، منافذ ریز موجود در بیوپار می‌تواند ریزجانداران را از شکار شدن توسط شکارچی‌هایی مانند: پروتوزواها و نماتدها محافظت کند و محیط مناسبی برای کلونیزاسیون باکتری و قارچ فراهم کند. با این حال، هنوز به درستی مشخص نشده است که آیا فعالیت میکروبی به درون ذرات بیوپار نفوذ می‌کند و یا این که کلونیزاسیون در سطح خارجی آن که دارای عناصر غذایی و مواد آلی تازه است، انجام می‌شود. بعد از فرآیند گرماکافت، ممکن است ترکیب‌های آلی مختلفی شامل: خاکستر، روغن زیستی و مواد فرار در سطح بیوپار باقی بماند. انتظار می‌رود که ترکیب‌های قابل حل در آب مانند: اسیدها، الکل‌ها، آلدئیدها، کتون‌ها و قندها که توسط ریزجانداران خاک به‌راحتی متابولیزه می‌شود، اثرهای مثبتی بر ریزجانداران خاک داشته باشند.

کرم‌های خاکی به‌علت این که دارای تحرک زیاد بوده و حساسیت بالایی به آلاینده‌های خاک نشان می‌دهند، نشان گرهای خوبی برای ارزیابی سلامتی خاک، به‌ویژه سلامت بیولوژیکی خاک به‌شمار می‌روند. بیوپار می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم و از طریق تأثیر بر ویژگی‌های خاک (مانند: افزایش عناصر غذایی)، بر کرم‌های خاکی و ریزجانداران خاک تأثیرگذار باشد. افزودن بیوپار قلیایی در مقادیر زیاد به خاک،

## Reference

Yu, F., Meng, J., Wang, Q., Zhabg, W., Cheng, X.Y., Chen, W.F. 2017. Effects of straw and biochar addition of soil nitrogen, carbon and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. Journal of Integrative Agriculture. 10(5), 1064-1074.

Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, E., Muszy, N., Ska, E., Ciarkowska, K. 2016. Natural organic amendments for improved phytoremediation of polluted soils: a review of recent progress. Pedosphere. 26, 1-12.

Oldfield, E. E, Wood, S. A, Palm, C. A., Bradford, M. A. 2017. Direct effects of soil organic matter on productivity mirror those observed with organic amendments. Plant and Soil. 423, 363-373.

به علت اثرهای نامطلوب مانند: افزایش اسیدیته، ممکن است اثر منفی بر کرم های خاکی و ریزجانداران خاک داشته باشد. بیوپچار معمولاً در خاک های اسیدی به عنوان عامل آهک استفاده شده و اسیدیته را افزایش می دهد و بدین ترتیب، زیست فراهمی عناصر را افزایش داده و فعالیت میکروبی خاک را بهبود می دهد. با افزایش فعالیت میکروبی خاک، تجزیه مواد آلی خاک شدت گرفته و معدنی شدن مواد آلی نیز افزایش یابد.

## د) تأثیر بیوپچار بر ترسیب کربن

بیوپچار روشی برای ترسیب کربنی است که در خاک از تولید دی اکسید کربن به دست می آید. بنابراین می تواند به کاهش تغییرات اقلیمی و گرم شدن زمین با کاهش مقدار گاز گلخانه ای در جو، کمک کند. به عبارتی سوختن و تجزیه طبیعی بیوماس و دیگر ضایعات کشاورزی مقادیر زیادی دی اکسید کربن و متان وارد جو می کند. بیوپچار می تواند مقدار زیادی از گازهای گلخانه ای را در زمین ذخیره کند و به طور بالقوه رشد سطح گازهای گلخانه ای جو را کاهش یا به تأخیر اندازد. بیوپچار می تواند کربن موجود در خاک و اثر گلخانه ای گاز دی اکسید کربن موجود در خاک را حدود هزاران سال در خود نگه دارد و اثر گلخانه ای گاز دی اکسید کربن را به تأخیر می اندازد. چون این تأخیر بسیار طولانی می باشد، لذا می توان گفت که اثر گلخانه ای این گاز را از بین می برد.

## ه) تأثیر بیوپچار بر رشد و عملکرد گیاهان

عناصر مورد نیاز رشد گیاهان عمدتاً از طریق خاک و کود در اختیار آن ها قرار می گیرد. کاربرد کودهای شیمیایی در کشور به عنوان سریع ترین راه جبران کمبود مواد غذایی خاک و تولید بیشتر، منجر به استفاده مکرر از آن و ایجاد خسارات جبران ناپذیری به محیط زیست شده است. از روش های مناسب جهت کاهش آلودگی محیط زیست و بهبود ویژگی های خاک، استفاده از مواد آلی است. بیوپچار ماده ای با تخلخل بالا است، که گروه های عاملی فراوانی داشته و در جذب سطحی فلزات سنگین به ویژه در محیط های آبی بسیار مؤثر است. این ماده مزایای کودهای آلی را دارا بوده و در جهت اصلاح خاک هایی با عناصر غذایی کم به کار می رود. بیوپچار از طریق افزایش فراهمی و جذب عناصری مانند: فسفر، پتاسیم، کلسیم، روی و مس، باعث افزایش رشد قسمت های مختلف گیاهان می شود. همچنین ممکن است دارای عناصر زیستی قابل دسترس مثل: سلنیوم باشد که می تواند به رشد محصول کمک کند.

