پژوهش‌های خاک / الف / جلد 37 / شماره 1 بهار / 1402

10.22092/IJSR.2023.358547.664

اثر نوع بیوچار و زیست توده بر رشد گیاه نعناع فلفلی (*Mentha L. piperita*) در خاک آلوده به کادمیم

فهیمه بهاروندی، محمد فیضیان[1]، صمد عبدی و افسانه عالی‌نژادیان بیدآبادی

دانشجوی دکترای علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران؛ **Baharvandi.bahar@yahoo.com**

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان لرستان، ایران؛ **feizian.m@lu.ac.ir**

عضو هیات علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، لرستان، ایران؛ **Sabdi1100@yahoo.com**

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران؛ **alinezhadian.a@lu.ac.ir**

ص **33 - 49**

دریافت: **1401/2/19** و پذیرش: **1401/12/9**

چکیده

امروزه روش‌های مختلفی برای کاهش اثرات منفی غلظت بالای فلزات سنگین موجود در خاک، استفاده می‌شود. در این راستا، استفاده از بیوچار، روش ارزان و نسبتاً جدیدی برای کاهش سمیت فلزات سنگین می‌باشد. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر بیوچارهای مختلف، به عنوان بهسازهای خاک، بر بهبود رشد گیاه نعناع فلفلی در خاک آلوده به کادمیم آزمایشی گلدانی به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه عامل شامل سطوح آلودگی کادمیم (50 و 100 میلی‌گرم برکیلوگرم)، نوع ماده آلی (خاک اره صنوبر، بیوچار خاک اره تهیه شده در دمای 300 و 600 درجه سلسیوس، کاه گندم، بیوچار کاه گندم در دمای 300 و 600 درجه سلسیوس) و مقدار ماده آلی (صفر، 2 و 4 درصد وزنی) بر ویژگی‌های رشدی و عملکرد اسانس گیاه نعناع فلفلی انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح کادمیم، مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، میزان کاروتنوئید، میزان فتوسنتز، درصد اسانس و عملکرد اسانس به ترتیب کاهشی برابر 37/6%، 54/9%، 42/9%، 31/6%، 40/5%، 34/8% و 83/3% را نشان دادند. نتایج حاکی از اثرات مثبت بیوچارها در کاهش اثرات منفی کادمیم بود. مقایسه تیمار کادمیم به تنهایی با تیمارهای کادمیم همراه بیوچار نشان دادکه بیوچار علفی (کاه گندم) نسبت به سایر تیمارها توانایی بیشتری در کاهش اثرات منفی کادمیم دارد. در اغلب موارد، بیوچار کاه گندم تولید شده در دو دمای 300 و 600 درجه سلسیوس، در سطوح 2% و 4% برتری نسبی محسوسی در بهبود رشد و عملکرد گیاه، نسبت به سایر تیمارها داشت. بیشترین درصد اسانس مربوط به بیوچار کاه گندم 600 درجه سلسیوس و سطح 2% و 50 میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم با 86% افزایش نسبت به شاهد (بدون کاربرد ماده آلی) بدست آمد. همچنین، این تیمار باعث افزایش 20 درصدی وزن تر اندام هوایی نسبت به شاهد گردید. میزان جذب نیتروژن، پتاسیم و فسفر در این تیمار به ترتیب 100%، 73% و 76% افزایش نسبت به شاهد نشان داد. به طور کلی، نتایج بدست آمده بیانگر پتانسیل بالای بهساز بیوچار کاه و کلش گندم در افزایش و بهبود رشد گیاه نعناع فلفلی در خاک آلوده به کادمیم، نسبت به سایر مواد آلی استفاده شده در این پژوهش بود.

واژه‌های کلیدی: اسانس نعناع فلفلی، بهساز خاک، جذب عناصرغذایی، کاروتنوئید

---

[1]. نویسنده مسئول، آدرس: **feizian.m@lu.ac.ir**

مقدمه

در دهه‌های اخیر، بهره‌گیری از پساب‌ها و فاضلاب‌های خانگی و استفاده بی رویه از برخی کودهای شیمیایی سبب افزایش آلودگی خاک به فلزات سنگین شده است (فاجاردو و همکاران، 2019). وجود فلزات سنگین در خاک، تهدیدی برای کیفیت خاک، رشد گیاه و سلامتی جانداران خواهد بود (تانگ و همکاران، 2020). کادمیم به عنوان یکی از خطرناک‌ترین و سمی‌ترین فلزات سنگین می‌باشد که دارای تحرک زیادی در خاک بوده و به عنوان یک بازدارنده برای رشد گیاه محسوب می‌شود (وانگ وهمکاران، 2019).

در سال‌های گذشته کاربرد بهسازهای آلی برای تثبیت فلزات سنگین خاک، بسیار مورد توجه قرار گرفته است (وو و همکاران، 2017؛ لو و همکاران، 2017؛ یوان و همکاران، 2019). بیوچار یا زغال زیستی یک ماده متخلخل و سرشار از کربن است که در اثر حرارت زیست توده در شرایط اکسیژن کم یا نبود اکسیژن، از زیست توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی تولید می‌شود. کاربرد بیوچار به عنوان ماده‌ای برای ترسیب کربن، موجب کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن به هوا می‌شود (کیم و همکاران، 2012؛ ولف و همکاران، 2010).

افزایش مواد آلی خاک، نگهداری آب در خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش حاصلخیزی، ممانعت از آبشویی عناصر، تخلخل و تهویه زیاد، پتانسیل زیاد در بازیافت مواد مغذی، صرفه اقتصادی و ترسیب بلند مدت کربن از جمله مزایای کاربرد بیوچار در خاک است (گلاسر و همکاران، 2002). داشتن تخلخل زیاد این امکان را به وجود می‌آورد که بیوچار به عنوان جاذب آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین، در پالایش خاک و یا آب‌های آلوده بسیار کارآمد باشد (تان و همکاران، 2015؛ وانگ و همکاران، 2018 و وو و همکاران، 2019). کاربرد بیوچار با توجه به ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالای آن و حضور کربوکسیل و اکسیژن‌های سطحی قادر است تا سمیت و تحرک حاصل از آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را کاهش داده، موجب تثبیت فلزات سنگین و بهبود وضعیت گیاه و خاک از لحاظ آلودگی به این آلاینده‌ها شود (وو و همکاران، 2019).

استفاده روزافزون از فواید گیاهان دارویی، اهمیت کشت آن‌ها را افزایش می‌دهد، اگرچه عوامل ژنتیکی عامل اصلی تولید متابولیت‌های ثانویه است، اما اهمیت عوامل محیطی در تولید آن‌ها نباید نادیده گرفته شود. در این زمینه کبیری و همکاران (2021) اثر زغال زیستی خاک اره تولید شده در دمای 450 درجه سلسیوس در سطح 1 و 2 درصد را بر پاسخ‌های مورفولوژیک گیاه ذرت در یک خاک آلوده به سرب و روی بررسی کردند و اظهار داشتند که کاربرد زغال زیستی در خاک آلوده به فلزات سنگین در سطح 2 درصد، می‌تواند فراهمی سرب و روی را کاهش داده و بهبود شاخص‌های رشدی گیاه ذرت را موجب شود. مطالعات کیم و همکاران (2015) نشان داد که استفاده از زغال زیستی خاک اره تولید شده در دمای 400 درجه سلسیوس، به عنوان یک جاذب کربنی متخلخل و با سطح ویژه بالا، می‌تواند با کاهش تحرک و فراهمی فلزات سنگین کادمیم و سرب رشد و نمو گیاه کاهو را افزایش دهد، به طوریکه علاوه بر کاهش فراهمی فلزات در خاک، کاهش میزان این عناصر در گیاه کاهو در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی مشاهده شده است.

گزارش لی و همکاران (2017) بیانگر اثر مثبت زغال زیستی کاه و کلش گندم در دمای300 و 600 درجه سلسیوس بر جذب فلزات سنگین کادمیم و نیکل از آب آبیاری بود، که این اثر با افزایش دمای تولید زغال زیستی، افزایش می‌یابد. در پژوهشی که توسط لیو و همکاران (2020) انجام شد، مشخص شد که در خاک آلوده با 10 میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، رشد و میزان عناصر غذایی در گیاه سویا به طور معناداری کاهش نشان داد و کاربرد زغال زیستی ساقه برنج و کود آلی در دمای 300 درجه موجب کاهش میزان کادمیم در اندام‌های

هوایی و افزایش جذب عناصر غذایی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم توسط گیاه شد.

گیاه نعناع فلفلی یک گیاه علفی، چند ساله ریزوم‌دارمتعلق به راسته Laminales و خانواده نعنائیان Lamiaceae است. ترکیب اصلی اسانس این گیاه منتول و منتون می باشد که در صنایع غذایی، داروسازی، آرایشی و بهداشتی استفاده می شود(گالئوتی و همکاران، 2002؛ خیری و همکاران، 2017). نکته مهم در تولید گیاهان دارویی حفظ خواص کیفی و کمی آن‌ها از طریق حفظ کیفیت خاک، حذف عوامل بازدارنده رشد از جمله فلزات سنگین و در نهایت ایجاد بستری مناسب برای رشد گیاه است. یکی از اهداف مدیریتی کشت گیاهان دارویی بهبود خواص کمی و کیفی آنها بخصوص در شرایط تنش می‌باشد. آلودگی خاک یکی از عواملی است که رشد و ترکیب شیمیایی بسیاری از گیاهان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به پیامدهای منفی ناشی از وجود کادمیم در خاک و همچنین رویکردهای کشاورزی پایدار و استفاده از نهاده‌هایی که باعث افزایش کارایی سیستم کشت می‌شوند، این پژوهش به منظور بررسی توانایی چند نوع ماده آلی و بیوچار آنها در جذب فلز کادمیم و کاهش اثرات منفی کادمیم بر رشد و عملکرد کمی و کیفی گیاه نعناع فلفلی انجام شد.

مواد و روش

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان در بهار 1399 اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل نوع ماده آلی و بیوچار تهیه شده از آنها (کاه و کلش گندم، خاک اره صنوبر، بیوچار کاه گندم در دمای 300، بیوچار کاه گندم در دمای600، بیوچار خاک اره در دمای 300 و بیوچار خاک اره در دمای600) در سه مقدار از بیوچار و زیست توده (0، 2 و 4 درصد وزنی بیوچار و زیست توده) و کادمیم در دو سطح (50 و 100 میلی گرم در کیلوگرم) بود. در طول آزمایش میانگین دمای روزانه گلخانه 28-22 درجه سلسیوس، رطوبت نسبی 70-60 درصد بود.

تهیه بیوچار

برای تهیّه بیوچار از خاک اره صنوبر بعنوان منبع بیوچار چوبی و کاه گندم، بعنوان منبع بیوچار علفی استفاده شد. زیتوده‌ها خشک و با آسیاب به ذرّات ریز تبدیل گردید، پس از آن در کوره و بدون حضور اکسیژن در دو دمای 300 و 600 درجه سلسیوس به مدّت 3 الی 4 ساعت گرماکافت (پیرولیز) شدند. این کار توسط کوره الکتریکی طراحی شده در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید.

تجزیه آزمایشگاهی خاک و بیوچارهای مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این پژوهش از عمق 0 تا 30 سانتی‌متری از اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان نمونه‌برداری شد. پس از خشک کردن در هوا و عبور از الک دو میلی‌متری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه ازجمله بافت خاک به روش هیدرومتر، ماده آلی به روش اکسایش مرطوب، اسیدیته خاک در خمیر اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع به وسیله هدایت سنج الکتریکی، فسفر قابل استفاده به وسیله عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم (اولسن و همکاران، 1954)، نیتروژن کل به روش کجلدال، عناصر کم مصرف کاتیونی(منگنز، مس، آهن و روی) به روش عصاره‌گیری با DTPA (اندازه گیری توسط دستگاه طیف سنجی جذب اتمی)، و پتاسیم قابل جذب به وسیله عصاره‌گیری با استات آمونیوم به وسیله دستگاه شعله‌سنج اندازه‌گیری شد (جدول1). مقادیر کادمیم کل و قابل دسترس، به ترتیب، با عصاره‌گیرهای 4مولار اسید نیتریک و DTPA استخراج و اندازه گیری گردید که مقادیر بدست آمده کمتر از حد تشخیص دستگاه و غیر قابل تشخیص بودند.

اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار در نسبت یک به ده نمونه به آب، کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب و نیتروژن کل به روش کجلدال

اندازه‌گیری شد. به منظور تجزیه شیمیایی بیوچار یک گرم از هر نمونه برداشته شد و به طور جداگانه در کوره الکتریکی به مدت چهار ساعت در دمای 550 درجه سلسیوس خاکستر گردید و بعد در اسید کلریدریک دو نرمال حل شده و پس از عبور از کاغذ صافی با آب مقطر به حجم رسانده و غلظت آهن، منگنز، روی و مس با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد (راجکوویچ و همکاران،2011) (جدول 2).

جدول 1- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه

بافت	pH	EC	نیتروژن	پتاسیم	فسفر	آهن	روی	کادمیم
		(ds/m)	(%)			(mg/Kg)		
لوم سیلتی	6/9	0/26	0/09	279	14	4/68	1/03	nd

pH: واکنش خاک؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی، nd: غیر قابل تشخیص توسط دستگاه

جدول 2- برخی ویژگی‌های بیوچارها و زیست توده‌های آن

نوع بقایا	pH	EC	N	P	K	Cd
		ds /m	%		gr/kg	
ضایعات چوبی (خاک اره)	5/59	2/48	1/11	0/64	0/47	nd
ضایعات علفی (کاه گندم)	7/11	3/91	1/01	0/61	1/43	nd
بیوچار خاک اره 300	7/11	0/05	0/22	2/16	6/2	nd
بیوچار خاک اره 600	7/67	0/09	0/75	3/25	10/87	nd
بیوچارکاه 300	8/3	0/55	0/41	2/9	27/7	nd
بیوچار کاه 600	9/94	0/68	0/22	4/62	34/7	nd

pH: واکنش خاک؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی؛ N: نیتروژن؛ P: فسفر؛ K: پتاسیم؛ Cd: کادمیم؛ nd : غیر قابل قرائت توسط دستگاه

مورفولوژی سطح بیوچارها و زیست‌توده‌های مورد استفاده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

پس از تهیه بیوچارها، مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از مطالعات تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) دانشگاه لرستان انجام شد.

کشت گیاه و اعمال تیمارها

در ابتدای این تحقیق نمونه خاک تهیه شده از عمق 0تا30 سانتی‌متر دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان، با مقادیر 50 و 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم از منبع نمک نیتراته تیمار شده، سپس موادآلی اولیه و بیوچارهای تهیه شده از آنها در دو دمای 300 و 600 درجه سلسیوس در سه سطح(0 ، 2% و 4%) به هر خاک آلوده شده با فلز کادمیم بطور جداگانه افزوده گردید. نمونه‌ها کاملا مخلوط و در ظروف پلاستیکی ریخته شد و به مدت 4ماه (120روز) در فضای گلخانه و در دمای 25 درجه سلسیوس و رطوبت حدود ظرفیت مزرعه (تنظیم شده با روش توزین) خوابانیده شد. بعد از این بازه زمانی گلدان-های 5 کیلویی تهیه شده و در هرگلدان سه عدد ریزوم نعناع فلفلی قرار داده شد، آبیاری گلدان‌ها براساس روش وزنی تا حد ظرفیت زراعی صورت گرفت.

در پایان دوره رشد کامل بوته‌ها (هشت هفته بعد از کاشت)، ارزیابی میزان عناصر پر مصرف شامل نیتروژن، پتاسیم و فسفر در اندام هوایی گیاه، عناصر کم مصرف شامل آهن، روی، مس و منگنز، مقادیر کادمیم، میزان و عملکرد اسانس، ارتفاع بوته و وزن خشک شاخساره انجام شد. برای تهیه عصاره اندام هوایی گیاه

بعد از شستشو با آب مقطر، گیاهان برداشت شده به مدت 48 ساعت درون آون با دمای 70 درجه سلسیوس قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها نیز محاسبه گردید. سپس در دمای 550 درجه سلسیوس خاکستر شده و سپس 5 میلی‌لیتر اسید کلریدریک 2 نرمال به آن افزوده شد تا نمونه حل شود. سپس نمونه‌های حل شده از کاغذ صافی عبور داده شد و حجم محلول صاف شده با آب مقطر به حجم 50 میلی‌لیتر رسانده شد. فسفر به روش رنگ سنجی و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (وسترمن، 1996) و غلظت پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر میکرو و کادمیم در نمونه‌های تهیه شده با دستگاه جذب اتمی قرائت گردید. برای اندازه‌گیری میزان نیتروژن گیاهی از روش تیتراسیون بعد از تقطیر و به کمک دستگاه کجل تک (,Analyzer 2300 Kjeltec) FOSS انجام گرفت. وزن تر گیاه، وزن خشک ساقه و وزن خشک برگ (بعد از 48 ساعت درون آون با دمای 70 درجه سلسیوس) نیز با ترازوی دیجیتال اندازه گیری شد.

به منظور تعیین مقدار اسانس در گیاه، نمونه‌های 14 گرمی از اندام‌های هوایی خشک شده نعناع فلفلی تهیه و به همراه 200 میلی لیتر آب مقطر (نسبت 1:10 ماده خشک به آب مقطر) در بالن ژوژه 500 میلی‌لیتری دستگاه کلونجر قرار داده شد .برای تعیین میزان درصد اسانس و عملکرد اسانس، به ترتیب از رابطه 1 و 2 استفاده شد.

رابطه (1)

100*{وزن خشک /وزن اسانس خارج شده (میلی گرم)}=درصد اسانس

رابطه (2)

وزن خشک برگ در گلدان * درصد اسانس= عملکرد اسانس

برای سنجش میزان کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید از روش لیختن تالر(1987) استفاده شد. در این روش ابتدا 0/1 گرم برگ توزین و در هاون چینی با ازت مایع کاملاً ساییده شد. سپس نمونه را با 10 میلی‌لیتر استون خالص مخلوط کرده، عصاره به دست آمده در فالکون 15 میلی‌لیتری ریخته شد و به مدت 15 دقیقه با دستگاه سانتریفیوژ (مدل KL 16-2 سیگما 4) با دور 4000 در دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس محلول رویی برداشته و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب محلول در طول موج های 470، 662 و 645 نانومتر اندازه‌گیری شد. در نهایت میزان کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید بر حسب میلی‌گرم برگرم وزن تر برگ از روابط زیر محاسبه گردید.

رابطه (3) $CA = 11.24 \times A662 - 2.04 \times A645$

رابطه (4) $CB = 20.13 \times A645 - 4.19 \times A662$

رابطه (5)

$C(A+B) = CA+$

رابطه (6)

$C(X+C) = 1000 \times (A470 - 1.90\,CA - 63.14\,CB) / 214$

در این روابط CA میزان کلروفیل a ، CB میزان کلروفیل b، C (A + B) میزان کلروفیل کل، C (X+C) میزان کاروتنوئید است.

اندازه‌گیری فتوسنتز

فتوسنتز با دستگاه فتوسنتز متر مدلGFS3000 بین ساعات 9 تا 12 و در شدت نور حدود 1100میکرومول فوتون بر مترمربع برثانیه اندازه گیری شد، برای این کار از برگ‌های سالم و کاملاً توسعه یافته‌ی قسمت میانی بوته‌ها استفاده گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس طرح آزمایشی مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار SPSS 21 صورت گرفت و مقایسه میانگین تیمارها نیز با آزمون دانکن در سطح 0/05 درصد انجام شد.

نتایج و بحث

برهمکنش مواد آلی و کادمیم بر صفات گیاه:

نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل نوع ماده آلی و سطوح کادمیم بر صفات اندازه‌گیری شده در جدول‌های 3 و 4 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده

می‌شود تیمارها بر همه صفات اثر معنی‌دار در سطح یک درصد دارند. اثر متقابل نوع ماده آلی و سطوح کادمیم بر همه صفات به جز درصد اسانس، درصد فسفر و مس معنی‌دار است. پژوهشگران بیان کردند که بیوچار حاوی دامنه‌ای از عناصر غذایی است و این عناصر را با سرعت‌های متفاوتی آزاد می‌کند و اثرات مختلفی بر حاصلخیزی خاک دارد (مخرجی و زیمرمن، 2013). بیوچار می‌تواند یک منبع تغذیه مستقیم برای گیاه باشد و جعفری دریافتند کاربرد کودهای آلی کمپوست مصرف شده و بیوچار آن باعث جذب بهتر عناصر غذایی و همچنین مولفه‌های رشدی در گیاه می‌گردد. این محققان میزان 3 درصد وزنی بیوچار را به عنوان مناسب‌ترین سطح پیشنهاد می‌کنند و دلیل موثر بودن بیوچار در افزایش مولفه‌های رشدی را به نقش بیوچار در کاهش تنش خشکی و شوری و قابلیت نگهداری آب نسبت می‌دهند. به طور کلی با استفاده از بیوچار می‌توان ضایعات را به

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع ماده آلی و سطح کادمیم بر ویژگی‌های رشدی و جذب عناصر گیاه نعناع فلفلی

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر کل	وزن خشک کل	پتاسیم	نیتروژن	فسفر	کادمیم
سطوح کادمیم	1	554/84**	501/22**	/22** 20	35/65**	0/18**	0/11**
نوع ماده آلی	12	58/22**	14/79**	0/86**	3/85**	0/02**	0/01**
سطوح کادمیم * نوع ماده آلی	12	3/74**	0/38**	0/15*	0/14**	0/00	0/00*
CV		24	28	21	21/3	30	12

*و ** به ترتیب از لحاظ آماری در سطح 5 % و 1 % معنی‌دار میباشد.

موجب فراهمی بسیاری از عناصر برای گیاه شود و محققان، دلیل افزایش عناصر در گیاه را بهبود شرایط حاصلخیزی و افزایش غلظت عناصر قابل استفاده خاک در اثر افزودن بیوچار به خاک بیان کردند (لهمان و جوزف، 2015). در تحقیق عباس‌پور و همکاران (1396) بیوچار چوب درخت گردو، تولید شده در دمای400 تا 700درجه سلسیوس، به میزان 10تن در هکتار اثر معنی‌داری بر وزن خشک گیاه سیاه دانه نسبت به تیمار شاهد داشت. در پژوهش کرمی‌نیا (1398) در بررسی اثر کمپوست مصرف شده قارچ و بیوچار تولیدی آن در دمای 600 درجه سلسیوس تحت تنش شوری بر رشد گیاه نحو مؤثری مدیریت نمود، تا حد زیادی از تغییرات اقلیمی ناشی از آزادشدن دی‌اکسیدکربن خاک جلوگیری کرد و در نهایت خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک را بهبود بخشید (رودریگز، 2010). نجفی قیری (2014) در اثر کاربرد بیوچارهای حاصل از بقایای گیاهی تولید شده در دمای450 درجه سلسیوس، افزایش فوق‌العاده‌ای در عناصر پتاسیم و نیتروژن نسبت به شاهد ملاحظه کرد. در تحقیق آزمایشگاهی دیگری که توسط زلفی و همکاران(2016) انجام شد، مصرف کود مرغی و تمامی بیوچارهایی که در دماهای مختلف، از آن ساخته شده بودند، در سطح 3 درصد سبب افزایش کربن آلی، شوری و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد.

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع ماده آلی و سطح کادمیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه نعناع فلفلی

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	فتوسنتز	اسانس	عملکرد اسانس
سطوح کادمیم	1	27/23**	21/33**	96/77**	11/58**	64/67**	6/18**	0/03**
نوع ماده آلی	12	3/06**	1/49**	7/94**	3/36**	4/37**	1/87**	0/00**
سطوح کادمیم * نوع ماده آلی	12	1/27**	0/49**	3/12**	0/07**	0/93**	0/07	0/00*
CV		18/3	23/9	25/7	29	29/8	17	17/1

مقایسه میانگین اثرات متقابل ماده آلی و سطوح کادمیم بر ویژگی‌های گیاه نعناع فلفلی در جدول‌های 5 و 6 آمده است.

اثرات افزایش سطوح آلودگی کادمیم بر صفات فیزیولوژیکی و رشدی گیاه

با توجه به نتایج جدول 5 با افزایش سطح کادمیم در تیمار کادمیم 50 به 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم بدون ماده آلی میزان کلروفیل a 37/6 درصد کاهش، میزان کلروفیل b 54/9 درصد کاهش، کلروفیل کل 42/9 درصد کاهش، میزان کاروتنوئید 31/6 درصد کاهش، میزان فتوسنتز 40/5 درصد کاهش، درصد اسانس 34/8 درصد کاهش، عملکرد اسانس 83/3 درصد کاهش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول 6 با افزایش سطح کادمیم وزن تر کل 18/8 درصد کاهش، وزن خشک کل 56/6 درصد کاهش، میزان فسفر 42/8 درصد کاهش، میزان پتاسیم 46/3 درصد کاهش، 54/4 درصد کاهش، میزان کادمیم 33/3 درصد افزایش نشان می‌دهند. فلزات سنگین با ورود به گیاه، سبب تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن و رادیکال‌های آزاد می‌شوند، که در نتیجه آن منجر به اکسیداسیون کنترل نشده و واکنش‌های زنجیره‌ای رادیکال شده و در نهایت به مولکول‌های زیستی سلولی مانند اسیدهای نوکلئیک، لیپیدها و پروتئین‌ها آسیب می‌رسانند وسبب کاهش بیوماس گیاه می‌شوند (فانیندرا و همکاران، 2015).

بر اساس گزارشات انجام گرفته، کادمیم با اثر سمیت خود بر فعالیت آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن سبب کاهش رشد و بیوماس گیاه می‌شود (آلکانتارا و همکاران، 1994؛ ماتیس، 1975). همچنین فودور (1995) گزارش داد که تجمع کادمیم فعالیت ATPase غشای پلاسمایی را کاهش می‌دهد و نفوذپذیری غشاء و هموستاز یون‌های فلزی را تغییر می‌دهد. الخطیب و الکاسمه (2014) در بررسی پایداری ژنتیکی گیاه *Solanum nigrum* متأثر از وجود کادمیم نشان دادند که سطوح بالای این عنصر سبب کاهش سطح محافظت کننده‌های اسمزی، عمدتاً پرولین، و تغییر پایداری ژنتیکی این گیاه و در نهایت به کاهش بیوماس گیاه منجر می‌شود.

اثرات نوع بیومس بر کاهش اثرات منفی کادمیم

با توجه به نتایج جدول 5 افزایش سطح بیومس شامل بیومس خام و بیوچار آنها از 2 درصد به 4 درصد باعث افزایش سطح صفات فیزیولوژیکی گیاه شده است، هر چند این افزایش در اغلب موارد از لحاظ آماری معنی-دار نیست اما از لحاظ عددی افزایشی است، این موضوع نشان دهنده اثر بیوچار بر کاهش اثرات منفی کادمیم است. همان طور که مشاهده می‌شود بیوچار علفی 600 درجه در دو سطح 2 و 4 درصد در سطح کادمیم 50 باعث افزایش معنی دار میزان کلروفیل a نسبت به تیمار کادمیم به تنهایی شده است. این روند در مورد کلروفیل b و کلروفیل کل نیز مشاهده می‌شود. در سطح کادمیم 50، میزان کاروتنوئید در تیمار بیوچار چوبی 300 درجه در سطح 2 درصد 57/7 درصد افزایش داده است در تیمار 100 کادمیم هم این روند در مورد کاروتنوئید مشاهده می‌شود. میزان فتوسنتز در اکثر تیمارهای بیوچار افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار کادمیم به تنهایی در دو سطح 50 و 100 کادمیم نشان می‌دهد. نکته قابل توجه افزایش معنی دار درصد اسانس در تیمارهای حاوی بیوچار نسبت به تیمار کادمیم به تنهایی است.

بررسی نتایج جدول 6 نیز حاکی از اثر مثبت بیوچار بخصوص بیوچار علفی در کاهش اثرات منفی کادمیم است. در همه صفات ذکر شده در جدول 6 بیوچار علفی نسبت به سایر تیمارها توانایی بیشتری در کاهش اثرات منفی کادمیم نشان می‌دهد. در سطح 50 کادمیم کمترین میزان جذب کادمیم در تیمار بیوچار علفی 2 درصد مشاهده می شود.

بر اساس گزارشات هو همکاران (2017)، وجود گروه‌های عاملی مختلف مانند کربوکسیل، فنل و گروه‌های اکسیژن در بیوچار، یون‌های عناصر سنگین را با فرآیند تبادل یونی تثبیت کرده و جذب آنها توسط گیاهان را

کاهش می‌دهد. در گزارشی دیگر، لی و همکاران (2015) نشان دادند، که بیوچار با رهاسازی کلسیم و منیزیم موجود بر روی سطوح خود (به دلیل CEC بالاتر) سبب تثبیت عناصر سنگین شده و میزان دسترسی آنها برای گیاهان را کاهش می‌دهد. زو و همکاران (2017) نیز نشان دادند که بیوچارها دسترسی فلزات سنگین و اثرات مضر آنها بر گیاهان، را با تشکیل کمپلکس‌های سطحی کاهش می‌دهند. تان و همکاران (2017) در تحقیقات خود نشان دادند که گروه های عاملی مانند COOH و OH در بیوچار، محل اتصال عناصر سنگین را به کمپلکس‌هایی که جذب این عناصر را افزایش می‌دهند، فعال می‌کنند. این محققین همچنین نشان دادند که یون‌های مختلفی از جمله سیلیسم، گوگرد و کلر در ساختار بیوچار نیز با عناصر سنگین ترکیب می‌شوند و تحرک آن‌ها در خاک را کاهش می‌دهند. کائو و هریس (2010) گزارش کردند که مواد معدنی موجود در بیوچار با تشکیل رسوبات نامحلول از عناصر سنگین، دسترسی و تحرک آنها را در خاک کاهش می‌دهند. که به عنوان مثال میتوان به ترسیب سرب و کاهش تحرک و در دسترس بودن آن بواسطه وجود فسفر معدنی موجود در بیوچار، اشاره کرد (لیانگ و همکاران، 2021).

جدول 5- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل ماده آلی و سطوح کادمیم بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه نعناع فلفلی

	تیمار	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کارتنوئید	فتوسنتز (میکرومول CO_2 بر متر مربع بر ثانیه)	اسانس (%)	عملکرد اسانس (گرم در گلدان)
		میلی گرم بر گرم وزن تر						
1	کادمیم 50 بدون ماده آلی	5/07^{e}	2/24^{efg}	7/32^{efg}	1/52^{k}	5/18^{i}	1/72^{hi}	0/06de
2	بیوچار چوبی 300 درجه 2% ;کادمیم50	6/28^{c}	3/23^{cd}	9/51^{d}	3/60^{a}	6/68^{ab}	3/21^{a}	0/09^{bcd}
3	بیوچار چوبی 300 درجه 4% ;کادمیم50	6/49^{c}	3/62^{bc}	10/11^{c}	3/83^{ab}	6/83^{bcd}	2/80^{abc}	0/1^{cd}
4	بیوچار چوبی 600 درجه 2% ;کادمیم50	6/12^{c}	3/78^{bc}	9/90^{dc}	3/32^{cd}	6/70^{dce}	2/60^{abc}	0/11^{abcd}
5	بیوچار چوبی 600 درجه 4% ;کادمیم50	6/15^{c}	3/83^{ab}	9/98^{c}	3/31^{cd}	6/54^{def}	2/90^{ab}	0/13^{ab}
6	بیوچار علفی 300درجه 2% ;کادمیم50	7/32^{b}	3/52^{bc}	10/84^{b}	3/12de	7/08^{ab}	3/15^{a}	0/14^{a}
7	بیوچار علفی 300درجه 4% ;کادمیم50	7/56^{ab}	3/23^{c}	10/79^{b}	3/16de	7/12^{ab}	3/21^{a}	0/14^{a}
8	بیوچار علفی درجه600 2% ;کادمیم50	7/73^{a}	3/77^{ab}	11/50^{a}	3/32^{cd}	7/13^{ab}	3/17^{a}	0/12^{abc}
9	بیوچار علفی درجه600 4% ;کادمیم50	7/76^{a}	4/20^{a}	11/96^{a}	3/50^{bc}	7/15^{a}	3/15^{a}	0/11^{abcd}
10	ماده چوبی آلی 2% ;کادمیم50	5/12de	2/66^{ef}	7/78^{ef}	1/84^{j}	6/24^{fg}	2/00^{fgh}	0/08de
11	ماده چوبی آلی 4% ;کادمیم50	5/15de	2/34^{efgh}	7/49^{efg}	1/92^{j}	6/33^{efg}	1/79^{ghi}	0/08de
12	ماده علفی آلی 2% ;کادمیم50	5/23de	2/16^{fgh}	7/40^{efg}	1/91 ^{j}	6/38^{defg}	2/14^{efgh}	0/09de
13	ماده علفی آلی 4% ;کادمیم50	5/29de	2/31^{efgh}	7/62^{efg}	2/11^{ij}	6/29^{fg}	2/42^{cdef}	0/09 ^{de}
14	کادمیم 100 بدون ماده آلی	3/16^{f}	1/01^{i}	4/18^{h}	1/04^{m}	3/08^{m}	1/12^{j}	0/01^{g}
15	بیوچار چوبی 300 درجه 2% ;کادمیم100	5/27de	2/14^{gh}	7/41^{efg}	2/74^{fg}	5/02^{i}	2/47^{bcde}	0/03^{fg}
16	بیوچار چوبی 300 درجه 4% ;کادمیم100	5/26de	2/21^{efgh}	7/48^{efg}	2/87^{ef}	5/83^{h}	2/50^{bcde}	0/05^{f}
17	بیوچار چوبی 600 درجه 2% ;کادمیم100	5/16de	2/59^{efg}	7/75^{ef}	2/43^{gh}	4/57^{i}	2/20^{defg}	0/06de
18	بیوچار چوبی 600 درجه 4% ;کادمیم100	5/18de	2/70de	7/88^{e}	2/62^{fgh}	4/88^{ij}	2/23^{defg}	0/09de
19	بیوچار علفی 300درجه 2% ;کادمیم100	5/38de	2/12^{gh}	7/50^{efg}	2/59^{fgh}	6/08^{gh}	2/51^{bcde}	0/1^{bcd}
20	بیوچار علفی 300درجه 4% ;کادمیم100	5/33de	2/16^{fgh}	7/50^{efg}	2/39^{hi}	6/12^{gh}	2/74^{abc}	0/1^{bcd}
21	بیوچار علفی درجه600 2% ;کادمیم100	5/29de	2/09^{gh}	7/39^{efg}	2/45^{gh}	6/11^{gh}	2/65^{bcd}	0/11^{abcd}
22	بیوچار علفی درجه600 4% ;کادمیم100	5/40^{d}	2/13^{gh}	7/54^{efg}	2/32^{hi}	6/13^{gh}	2/53^{bcde}	0/11^{abcd}
23	ماده چوبی آلی 2% ;کادمیم100	5/08^{e}	2/00^{h}	7/09^{g}	1/44^{kl}	3/19^{m}	1/80^{ghi}	0/03^{fg}
24	ماده چوبی آلی 4% ;کادمیم100	5/14de	2/07^{gh}	7/21^{fg}	1/20^{klm}	3/35^{lm}	1/39^{ij}	0/03^{fg}
25	ماده علفی آلی 2% ;کادمیم100	5/14^{e}	2/01^{h}	7/16^{g}	1/15^{lm}	3/62^{l}	1/39^{ij}	0/04^{f}
26	ماده علفی آلی 4% ;کادمیم100	5/10de	2/04^{h}	7/14^{g}	1/21^{klm}	4/00^{k}	1/41^{ij}	0/05^{f}

حروف مشترک در هر ستون مطابق آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح 5 درصد، اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند.

ادامه جدول 6-نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل ماده آلی و سطوح کادمیم بر ویژگی‌های رشدی و جذب عناصر گیاه نعناع فلفلی

	تیمار	وزن تر کل (گرم)	وزن خشک کل (گرم)	میزان فسفر %	میزان پتاسیم %	میزان نیتروژن %	میزان کادمیم (میلی گرم بر کیلوگرم)
1	کادمیم 50	35/81^{g}	10/27^{f}	0/21^{efg}	2/03^{hijk}	2/26^{i}	0/27^{cde}
2	بیوچار چوبی 300 درجه 2% ;کادمیم50	38/92^{bc}	12/86^{bc}	0/32^{bc}	2/8^{bcd}	3/70^{d}	0/22^{fghij}
3	بیوچار چوبی 300 درجه 4% ;کادمیم50	39/92^{b}	13/21^{b}	0/35^{ab}	2/76^{cde}	3/77^{d}	0/2^{ghij}
4	بیوچار چوبی 600 درجه 2% ;کادمیم50	38/77^{bcd}	12/48^{bc}	0/35^{ab}	2/43^{defgh}	3/93^{cd}	0/17^{hijk}
5	بیوچار چوبی 600 درجه 4% ;کادمیم50	39/49^{b}	12/60^{bc}	0/36^{ab}	2/56^{defg}	3/83^{cd}	0/16^{jk}
6	بیوچار علفی 300درجه 2% ;کادمیم50	42/66^{a}	13/87^{a}	0/36^{ab}	2/9^{bcd}	4/01^{cd}	0/22^{fghi}
7	بیوچار علفی 300درجه 4% ;کادمیم50	43/03^{a}	14/38^{a}	0/36^{ab}	3/5^{a}	4/66^{a}	0/22^{efghi}
8	بیوچار علفی درجه600 2% ;کادمیم50	43/11^{a}	14/14^{a}	0/34^{ab}	3/33^{ab}	4/43^{ab}	0/15^{k}
9	بیوچار علفی درجه600 4% ;کادمیم50	43/11^{a}	14/29^{a}	0/37^{a}	3/1^{abc}	4/13^{bc}	0/17^{ijk}
10	ماده چوبی آلی 2% ;کادمیم50	36/63^{f}	10/94^{e}	0/26^{cde}	2/73^{cdef}	2/64^{gh}	0/20^{ghij}
11	ماده چوبی آلی 4% ;کادمیم50	37/64^{e}	10/97^{e}	0/24de	2/4^{efghi}	2/57^{h}	0/21^{fghi}
12	ماده علفی آلی 2% ;کادمیم50	38/10de	11/51de	0/28^{cd}	2/26^{fghi}	2/62^{h}	0/23^{defgh}
13	ماده علفی آلی 4% ;کادمیم50	38/41^{cde}	12/08^{cd}	0/26^{cde}	2/2^{ghij}	2/67^{gh}	0/23^{defgh}
14	کادمیم 100	29/07^{l}	4/76^{m}	0/12^{i}	1/09^{m}	1/03^{l}	0/36^{a}
15	بیوچار چوبی 300 درجه 2% ;کادمیم100	34/64^{h}	7/55^{j}	0/23de	1/63^{kl}	2/07^{j}	0/25^{cdef}
16	بیوچار چوبی 300 درجه 4% ;کادمیم100	35/93^{fg}	8/22^{i}	0/24de	1/7^{jkl}	1/78^{j}	0/24^{cdef}
17	بیوچار چوبی 600 درجه 2% ;کادمیم100	35/15^{gh}	6/82^{k}	0/27^{cd}	1/9^{ijk}	2/83^{efgh}	0/22^{efghi}
18	بیوچار چوبی 600 درجه 4% ;کادمیم100	35/16^{gh}	7/61^{j}	0/26^{cde}	2/06^{hijk}	2/9^{efgh}	0/22^{fghi}
19	بیوچار علفی 300درجه 2% ;کادمیم100	38/38^{cde}	9/54^{gh}	0/26^{cde}	2/06^{hijk}	2/99^{efg}	0/27^{cde}
20	بیوچار علفی 300درجه 4% ;کادمیم100	39/03^{bc}	10/03^{fg}	0/27^{cd}	2/03^{hijk}	3/09^{e}	0/27^{cd}
21	بیوچار علفی درجه600 2% ;کادمیم100	38/36^{cde}	9/19^{h}	0/27^{cd}	2/03^{hijk}	2/72^{fgh}	0/27^{cde}
22	بیوچار علفی درجه600 4% ;کادمیم100	38/84^{bcd}	9/85^{fg}	0/22^{def}	2/1^{ghijk}	3/06^{ef}	0/27^{cd}
23	ماده چوبی آلی 2% ;کادمیم100	30/08^{jk}	4/95^{m}	0/15^{hi}	1/1^{m}	1/22^{kl}	0/32^{ab}
24	ماده چوبی آلی 4% ;کادمیم100	29/32^{kl}	5/96^{l}	0/15^{hi}	1/33^{lm}	1/2^{kl}	0/28^{bc}
25	ماده علفی آلی 2% ;کادمیم100	30/82^{ij}	6/51^{kl}	0/17^{gh}	1/4^{lm}	1/36^{kl}	0/33^{ab}
26	ماده علفی آلی 4% ;کادمیم100	31/48^{i}	6/67^{k}	0/18^{fgh}	1/33^{lm}	1/40^{k}	0/32^{ab}

حروف مشترک در هر ستون مطابق آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح 5 درصد، اختلاف معنی داری با یکدیگر ندارند.

وزن تر و خشک: بیشترین وزن تر و خشک مربوط به تیمارهای بیوچار علفی 300 و 600 درجه در سطح دو و چهار درصد در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم است و بین این دو تیمار اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار (1400) در یک آزمایش گلدانی بیشترین وزن تر و خشک گیاه ریحان را در سطح 10 درصد حجمی بیوچار کاه و کلش گندم در دمای 300 درجه برای گیاه ریحان گزارش کردند. این محققان بیان می‌کنند که بیوچار تا حدی حاوی نیتروژن است و می‌تواند نیتروژن کل خاک را افزایش دهد و اثر مثبتی بر ارتفاع و وزن تر و خشک گیاه داشته باشد. در پژوهش‌هایی که توسط سایر محققان صورت گرفته نتایج مشابهی در رابطه با افزایش وزن تر و خشک گیاه با کاربرد بیوچار مشاهده شده که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد (بوالحسنی و همکاران، 1398؛ اسمیدر و سینگ، 2014). جذب فلزات سنگین می‌تواند باعث اختلال در سوخت وساز گیاه و کاهش رشد شود و از طرف دیگر مقادیر زیاد این فلزات در خاک باعث کاهش فعالیت زیستی و حاصلخیزی خاک می‌شود و در نتیجه باعث کاهش وزن خشک گیاه می‌شود(امانی و علیزاده سالطه، 1399). از طرف دیگر برخی محققان بیان می کنند کادمیم به دلیل اختلال در جذب آب باعث کاهش

جوانه زنی و کاهش رشد گیاه می شود (ناگاجیوتی و همکاران، 2010).

نیتروژن اندام هوایی: بیشترین مقدار نیتروژن اندام هوایی در تیمار کاربرد 4 و 2 درصد بیوچار علفی تولید شده در دمای 300 درجه سلسیوس در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده گردید. پیرولیز در دماهای مختلف باعث تولید بیوچار با محتوای غذایی متفاوت می‌شود. پیرولیز انجام شده در دمای خاص می-تواند منجر به تجمع عناصر غذایی خاص در بیوچار گردد. دمای پایین پیرولیز برای حفظ و نگهداری نیتروژن مناسب است برای اینکه نیتروژن حساس به گرما است (چان و همکاران،2007). بیوچار می‌تواند تثبیت بیولوژیکی خاک را افزایش دهد و در نتیجه محتوای نیتروژن گیاه را افزایش یابد (میا و همکاران، 2014). نیگوسی و همکاران (2012) گزارش کردند بیوچار در سطوح 5 و 10 تن در هکتار می‌تواند محتوای نیتروژن کاهو را افزایش دهد.

فسفر اندام هوایی: بیشترین مقدار فسفر اندام هوایی در تیمار کاربرد 4 و 2 درصد بیوچار علفی تولید شده به ترتیب در دمای 300 و 600 درجه سلسیوس، در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده گردید ضمن اینکه این تیمارهای با بیوچار چوبی با همین تیمارهای حرارتی و سطوح اختلاف معنی‌دار ندارند. ژنگ و همکاران بیان کردند، افزودن بیوچار کاه و کلش برنج در سطح 5 درصد منجر به افزایش معنی‌دار فسفرقابل استفاده به مقدار 13/8% در مقایسه با تیمار بدون بیوچار می‌گردد(ژنگ و همکاران، 2013). افزایش فسفر اندام هوایی با کاربرد بیوچار در ذرت (ژنگ و همکاران، 2012)، ریحان (فخرآبادی و خوش‌سیمای چنار، 1400) و گلرنگ (عرب بافرانی و همکاران، 1399) نیز گزارش شده است. چینتالا و همکاران (2019) گزارش کردند، بیوچار می‌تواند قابلیت استفاده فسفر را از طریق جذب سطحی و همچنین از طریق افزایش CEC خاک، افزایش دهد و به دنبال آن جذب فسفر توسط گیاه ذرت افزایش یافت.

پتاسیم اندام هوایی: بیشترین میزان پتاسیم در تیمار بیوچار علفی 300 درجه با مقدار 4 درصد در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد و این تیمار با تیمار بیوچار علفی 600 درجه در دو سطح 2 و 4 درصد اختلاف معنی‌دار ندارد. وان زیوتن و همکاران (2010) بیان می‌کنند که بیوچار با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک فراهمی پتاسیم برای گیاه را افزایش می‌دهد ضمن اینکه بیوچار یک منبع سرشار از کاتیون‌های محلول است. عرب بافرانی و همکاران (1399) در بررسی اثر بیوچار ضایعات شاخ و برگ درخت پسته بر خصوصیات رشدی گیاه گلرنگ دریافتند بالاترین میزان پتاسیم اندام هوایی در سطح 4 درصد بیوچار به دست می‌آید.

درصد اسانس

بیشترین درصد اسانس مربوط به تیمارهای بیوچار علفی 300 و 600 درجه در سطح دو و چهار درصد در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم است ضمن اینکه این تیمارها با تیمار بیوچار چوبی 2 درصد با سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم اختلاف معنی‌دار ندارند. اسانس، ترکیبات پیچیده ترپنوییدی هستند که واحدهای ایزوپنتینیل پیروفسفات و دی متیل آلیل پیروفسفات نیاز به آت پ و آن آ دی پی اچ و عناصری از جمله نیتروژن، آهن، منیزیم و فسفر دارند و بیوچار با افزایش دسترسی گیاه به این عناصر، موجب افزایش غدد ترشح کننده اسانس و درنهایت افزایش منجر به افزایش ترکیبات تشکیل دهنده اسانس می‌شود. نیتروژن، پتاسیم و فسفر موجود در بیوچار، درصد و عملکرد اسانس را با افزایش توسعه و تقیسم سلول‌های حاوی اسانس و بیوسنتز مواد موثره را در گیاهان دارویی افزایش می‌دهد (امیدبیگی، 1379).

میزان کادمیم

در تمام صفات اندازه‌گیری شده بالا رفتن میزان کادمیم باعث کاهش میزان صفات اندازه‌گیری شده است. بیوچار از طریق مکانیسم‌هایی مانند جذب سطحی، تشکیل کلات‌ها پایدار، تبادلات یونی و یا رسوب و

کمپلکس با مواد آلی، تحرک و فراهمی فلزات سنگین را در خاک کاهش می‌دهد (دای و همکاران، 2018). براساس گزارشات محققان، بیوچار به علت داشتن گروه‌های عاملی اکسیژنی و سطح ویژه بالاتر نسبت به زیست توده اولیه، توانایی جذب فلزات سنگین را دارد (علی و همکاران، 2019). برخی محققان، کاهش فراهمی عناصر سنگین از جمله کادمیم را به تغییر اجزا و اشکال فلزات سنگین و انتقال آن‌ها به اجزای پایدارتر خاک نسبت می‌دهند (احمد و همکاران، 2016). غلظت زیاد کادمیم در محیط رشد، جذب آهن توسط گیاه را مختل می‌کند. سمیت کادمیم ممکن است باعث کمبود فسفر یا بروز مشکلات مربوط به انتقال منگنز درگیاه شود به طور معمول کادمیم در جذب و انتقال عناصری مانند کلسیم، منیزیم، فسفر، پتاسیم و همچنین آب در گیاه دخالت دارد. کادمیم بر فرایندهای اصلی گیاهان نظیر فتوسنتز، تکثیر سلولی و جذب آب توسط ریشه گیاه تأثیر می‌گذارد(راموس و همکاران، 2002)

کلروفیل a ،کلروفیل b و کلروفیل کل:

یشترین میزان کلروفیل a در تیمارهای بیوچار علفی 300 درجه با سطح 4 درصد و بیوچار علفی 600 درجه در دو سطح 2 و 4 درصد با میزان 50 میلی گرم بر کیلوگرم بدست آمد. بیشترین میزان کلروفیل b و کلروفیل کل در تیمار بیوچار علفی 600 درجه در دو سطح 2 و 4 درصد با میزان 50 میلی گرم بر کیلوگرم بدست آمد.

کارتر و همکاران (2013) در بررسی اثر بیوچار بر خصوصیات خاک و رشد دو گیاه کلم و کاهو افزایش میزان کلروفیل را با افزایش بیوچار گزارش کردند. این نتیجه با نتایج گامارل دوالا و همکاران (2017) و تانر و همکاران (2019) مطابقت دارد. بین محتوای نیتروژن و شاخص سبزینگی همبستگی مثبت وجود دارد و از آن جا که اضافه کردن بیوچار به خاک باعث اضافه شدن نیتروژن به خاک و در نتیجه افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه می‌شود، از این طریق سبزینگی نیز افزایش می‌یابد(اسمیل و ژنگ، 1994). کوشکی و همکاران (1400) بیشترین میزان کلروفیل کل را در 6 تن در هکتار بیوچار به همراه 100 درصد آبیاری برای گیاه نعناع فلفلی گزارش کردند. مشاهده می‌شود با افزایش سطح کادمیم میزان کلروفیل گیاه کاهش می‌یابد فلز کادمیم با دخالت در بیوسنتز کلروفیل و دخالت در فرایند پراکسیداسیون لیپید در غشاهای فتوسنتزی باعث کاهش محتوی کلروفیل می‌شود (گونکالوز و همکاران 2007).

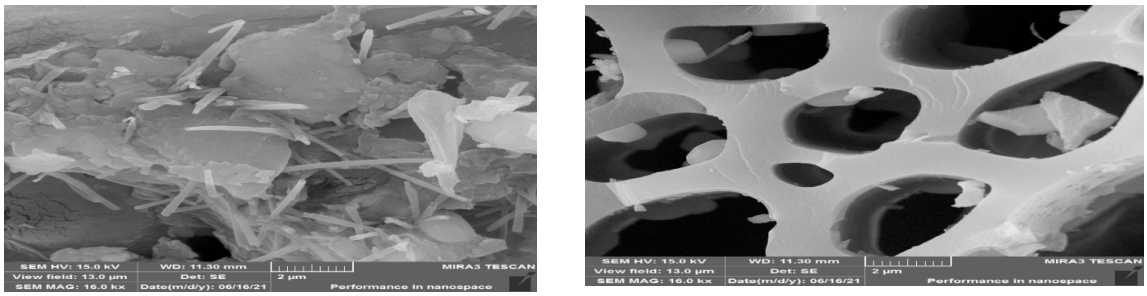
فتوسنتز

بیشترین میزان فتوسنتز مربوط به تیمارهای بیوچار علفی 300 و 600 درجه در سطح دو و چهار درصد در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم است و بین این دو تیمار اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. بیوچار با افزایش محتوای عناصر در خاک با افزایش نسبت اندام هوایی به ریشه باعث افزایش سطح فعال فتوسنتزی گیاه می‌شود(اشمیت و همکاران، 2014). از طرف دیگر افزایش میزان کادمیم باعث کاهش میزان فتوسنتز شده است. عنصر کادمیم میل ترکیبی بالایی برای اتصال به گروههای سولفیدریل آنزیم‌ها دارد و در نتیجه باعث غیرفعال شدن آنزیم‌های دخیل در مراحل فیزیولوژی گیاه بخصوص فتوسنتز (با اختلال در چرخه کلوین و واکنش‌های نوری) می‌شود. حضور این عنصر در محیط رشد گیاه باعث تشکیل انواع ROS در گیاه می‌شود که باعث آسیب جدی به ترکیبات سلولی می‌شود (گونکالوز و همکاران 2007).

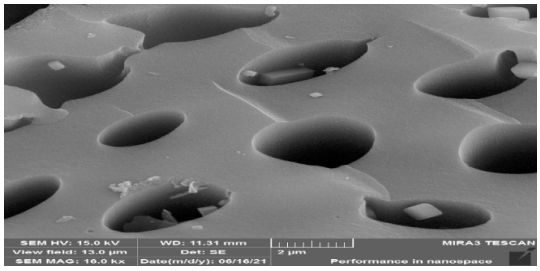
مورفولوژی سطح بیوچار و زیست‌توده

نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو زیست توده علفی و چوبی فرایند آتشکافت باعث ایجاد حفرات زیادی در نمونه شده که در نتیجه باعث افزایش سطح به حجم بیوچار نسبت به زیست توده خام می‌شود و ظرفیت تبادل یونی بیوچار را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر به وضوح مشاهده می‌شود که تعداد حفرات در بیوچار خاک اره صنوبر نسبت به بیوچارکاه وکلش گندم بسیار بیشتر

است و مطابق نتایج به دست آمده از مباحث قبلی کارایی بیوچار با بافت چوبی از بیوچار با بافت علفی، به دلیل داشتن درصد حفرات و تخلخل زیادتر همچنین سطح ویژه بالاتر، در تثبیت و نگهداری کادمیم و کاهش جذب آن توسط گیاه نعناع فلفلی بیشتر است. ماجور و همکاران (2010) بیان می‌کنند به واسطه ایجاد سطوح دارای بار منفی در نتیجه کاربرد بیوچار ظرفیت تبادلی خاک افزایش چشمگیری می‌یابد. علاوه بر این لهمان و جوزف (2015) بیان می‌کنند در سطح بیوچار برخی از گروههای عاملی اکسیژن‌دار مانند گروه‌های کربوکسیلاتی و هیدروکسیلی افزایش می‌یابند و در نتیجه ظرفیت تبادل کاتیونی آن افزایش می‌یابد.

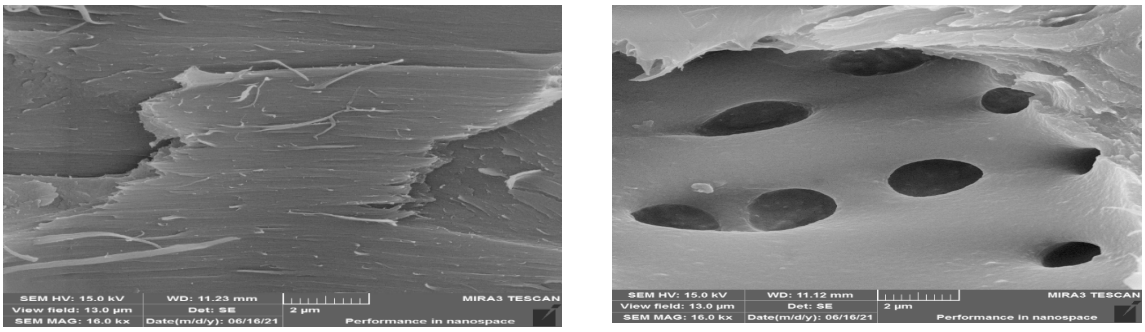


الف ب

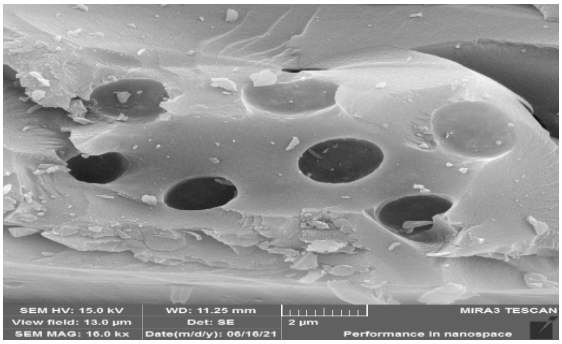


ج

شکل 1- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از زیست توده علفی(الف)، بیوچار علفی 300 درجه سانتی گراد(ب) بیوچارعلفی 600 درجه سانتی گراد (ج)



الف ب



ج

شکل 2- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از زیست توده چوبی(الف)، بیوچارچوبی 300 درجه سانتی گراد(ب) بیوچار چوبی 600 درجه سانتی گراد (ج)

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد تیمار 2 و 4 درصد بیوچار کاه و کلش گندم تولید شده در دمای 300 و 600 درجه سلسیوس، در سطح کادمیم 50 میلی‌گرم بر کیلوگرم بر صفات رشدی و فیزیولوژیکی گیاه نعناع فلفلی نسبت به سایر تیمارها معنی‌دار است و با توجه به اینکه در مزارع کشاورزی حجم زیادی از کاه و کلش گندم بر جا می‌ماند تبدیل این بقایا به بیوچار مـی‌تـواند گامی موثر در جهت کشاورزی پایدار و کاهش آلودگی محیط زیست باشد. احتمالاً بیوچار با بافت علفی (کاه گندم) به دلیل داشتن محتوای غذایی غنی-تر نسبت به بیوچار با بافت چوبی (خاک اره صنوبر) باعث بهبود مقدار کلروفیل، سطح برگ و ارتفاع گیاه و نهایتاً زیست توده گیاه گردید. همچنین کاربرد بیوچار چوبی (خاک اره صنوبر) در خاک آلوده به کادمیم، به دلیل بافت متخلخل غنی‌تر، سطح ویژه و CEC بالاتر نسبت به بیوچار علفی موجب کاهش جذب عنصر کادمیم توسط نعناع فلفلی گردید.

فهرست منابع:

1. امانی، م.، علیزاده سالطه، س. 1399. تأثیر تنش فلزات سنگین (کادمیوم) بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان دارویی مختلف. فصل‌نامه علمی ایمنی زیستی. 11 (4) :49-76.
2. امیدبیگی، ر.، 1379 .رهیافتهای تولید و فـرآوری گیاهـان دارویـی (جلد سوم). انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، 397 صفحه.
3. بوالحسنی، ز.، ع. م. رونقی.، ر. قاسمی.، و م. زارعی. 1398. اثر بیوچار پوسته برنج و باکتری محرک رشد بر عملکرد و ترکیب شیمیایی اسفناج در خاک تحت تنش شوری. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک). الف :33 (3) : 335-349.
4. خیری، ع.، ه. توری.، و ن. مرتضوی. 1396. تأثیر تنش خشکی و جاسمونیک اسید روی صفات مورفولوژیکی و فیتوشیمیایی نعناع فلفلی .(Mentha piperita L.) تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران33(2): 268-280.
5. عباس پور، ف.، ح.ر. اصغری.، پ. رضوانی مقدم.، و ح. عباسدخت. 1396. تاثیر کاربرد بیوچار در بهبود برخی ویژگی های خاک و رشد گیاه دارویی سیاه دانه (.Nigella sativa L) در شرایط تنش آبی،کنفرانس بین المللی علوم کشاورزی، گیاهان دارویی و طب سنتی،مشهد،

6. عرب بافرانی, ز.، م.ج. قانعی بافقی.، و م. شیرمردی. 1399. اثر بیوچار ضایعات شاخ و برگ درخت پسته بر خصوصیات رشدی گیاه گلرنگ .مجله مدیریت خاک و تولید پایدار.10(3):73-94.

7. فخرآبادی, ح.، و م. خوش سیمای چنار. 1400. اثر کم‌آبیاری و بیوچار بر روی خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی ریحان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. 15(4):941-954.

8. کرمی نیا، ف.، ن. رنگزن.، ح. نادیان.، و ا. لطفی جلال آبادی. 1398. اثر کمپوست مصرف شده قارچ و بیوچار آن بر عملکرد گیاه جعفری تحت تنش شوری. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران), 50(6), 1453-1465.

9. کوشکی, ا.، ا. عالی نژادیان بیدآبادی.، و ع. ملکی. 1400. بررسی اثر بیوچار پوسته برنج و رژیم‌های مختلف آبیاری بر رشد، درصد اسانس و غلظت برخی عناصر غذایی در نعناع فلفلی (Mentha piperita L.) . تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران37(5): 733-752.

10. Ahmad, M., A.U. Rajapaksha., J.E. Lim., B.Y. Kim., J.H. Ahn., Y.H. Lee., M.I. Al-Wabel., S.E. Lee., and S.S. Lee .2016. Lead and copper immobilization in a shooting range soil using soybean stover- and pine needle-derived biochars: chemical, microbial and spectroscopic assessments. Journal of Hazardous Materaials. 301:179–186

11. Al- Khateeb W., and Al-Qwasemeh H. 2014. Cadmium, copper and zinc toxicity effects on growth, proline content and genetic stability of Solanum nigrum L., a crop wild relative for tomato; comparative study. Physiology and Molecular Biology of Plants, 20(1): 31-39.

12. Alcántara E., Romera F. J., Cañete M., and De la Guardia M. D. 1994. Effects of heavy metals on both induction and function of root Fe (lll) reductase in Fe-deficient cucumber (Cucumis sativus L.) plants. Journal of Experimental Botany, *45*(12): 1893-1898.

13. Ali, N., S. Khan., Y. Li., N. Zheng., and H. Yao. 2019. Influence of biochars on the accessibility of organochlorine pesticides and microbial community in contaminated soils. Science of the Total Environment. 647: 551–560.

14. Cao X., and Harris W. 2010. Properties of dairy-manure-derived biochar pertinent to its potential use in remediation. Bioresource technology. 101(14), 5222-5228.

15. Carter, S., S. Shackley., S. Sohi., T. Suy., and S. Haefele. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (Lactuca sativa) and cabbage (Brassica chinensis). Agronomy, 3: (2) 404-418.

16. cheeken manure in different temperatures, on chemical properties of a calcareous soil. Journal of Water and Soil Science, 75: 73-86. (In Persian with English abstract).

17. Chintala R., Mollinedo J., Schumacher T.E., Malo D.D., and Julson J.L. 2014a. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. Archives of Agronomy and Soil Science, 60: 393–404.

18. Dai, Z. M., A. Enders., J. Rodrigues., K. Hanley., P. Brookes., J. M. Xu. 2018. Soil fungal taxonomic and functional community composition as affected by biochar properties. Soil Biology and Biochemistry. 126: 159–167.

19. Fajardo, C., G. Costa., M. Nande., P. Botías., J. García-Cantalejo., and M. Martín. 2019. Pb, Cd, and Zn soil contamination: monitoring functional and structural impacts on the microbiome. Applied Soil Ecology. 135 : 56-64.

20. Fodor E., Szabó-Nagy A., and Erdei L. 1995. The effects of cadmium on the fluidity and H+-ATPase activity of plasma membrane from sunflower and wheat roots. Journal of plant physiology, 147(1), 87-92.

21. Galeotti, N., L.D.C. Mannelli., G. Mazzanti., A. Bartolini., and C. Ghelardini. 2002. Menthol: a natural analgesic compound. Neuroscience Letters. 322(3): 145-148.

22. Gamareldawla, H.D., B.Agbnaa., S. Donglia., Z. Liu., A. Nazar., S.G. Elshikh., and C.T. Luis. 2017. Effect of irragation and biochar on the growth, yeild and quality of tomato. Scientia Horticulturae**.** 245: 667-675.

23. Glaser, B., J. Lehmann., and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A Review. Biology and Fertility of Soils, 35: 219-230.
24. Goncalvez, J., Beker, A., Cargnelutti, D., Tabaldi, L., Pereira L., Battisti,V., Spanevello, R., Morsch ,V., Nicoloso, F. and Schetinger, M. 2007. Cadmium toxicity causes oxidative stress and induces response of the antioxidant system in cucumber seedling. Brazilian Journal Plant Physiology. 19 (3): 223-232.
25. Ho S. H., Zhu S., and Chang J. S. 2017. Recent advances in nanoscale-metal assisted biochar derived from waste biomass used for heavy metals removal. Bioresource technology. 246, 123-134.
26. Kabiri, P., H. Motaghian., and A. Hosseinpur. 2021. Impact of biochar on release kinetics of Pb (II) and Zn (II) in a calcareous soil polluted with mining activities. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 21(1), 22-34.
27. Kim, H. S., K. R. Kim., H. J. Kim., J. H. Yoon., J. E. Yang., Y. S. Ok., G. Owens., and K. H. Kim. 2015. Effect of biochar on heavy metal immobilization and uptake by lettuce (Lactuca sativa L.) in agricultural soil. Environmental Earth Sciences. 74(2), 1249-1259.
28. Kim, K. H., J. Y. Kim., T. S. Cho., and J. W. Choi. 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (Pinus rigida). Bioresource technology, 118: 158-162.
29. Lehmann, J., and S. Joseph. 2015. Biochar for environmental management: science, technology and implementation, Routledge. 976 p.
30. Li M., Lou Z., Wang Y., Liu Q., ZhangY., Zhou J., and Qian G. 2015. Alkali and alkaline earth metallic (AAEM) species leaching and Cu (II) sorption by biochar. Chemosphere. 119, 778-785.
31. Li, H., X. Dong., E. B. da Silva., L. M. de Oliveira., Y. Chen, and L. Q. Ma. 2017. Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications. Chemosphere. 178: 466-478.
32. Liang M., Lu L., He H., Li J., Zhu Z., and Zhu Y. 2021. Applications of Biochar and Modified Biochar in Heavy Metal Contaminated Soil: A Descriptive Review. Sustainability, 13(24), 14041.
33. Liu, M., Z. Zhao., L. Wang., and Y. Xiao. 2021. Influences of rice straw biochar and organic manure on forage soybean nutrient and Cd uptake. International Journal of Phytoremediation. 23(1): 53-63.
34. Lu, K., X.Yang., G. Gielen., N. Bolan., Y. S. Ok., N. K. Niazi., S. Xu., Y. Guodong., X. Chen., X. Zhang., D. Liu., Z. Song., X. Liu., and H. Wang. 2017. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. Journal of environmental management, 186: 285-292.
35. Major, J., M. Rondon., D. Molina., S.J. Riha., and J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. Plant and soil. 333: 1-2. 117-128.
36. Mathys W. 1975. Enzymes of heavy□metal□resistant and non□resistant populations of Silene cucubalus and their interaction with some heavy metals in vitro and in vivo. Physiologia Plantarum, 33(2): 161-165.
37. Mia, S., M. Abuyusuf., M.A. Sattar., A.B. Islam., T. Hiemstra., and S. Jeffery. 2014. Biochar amendment for high nitrogen and phosphorous bioavailability and its potentiality of use in Bangladesh agriculture: a review. The Patuakhali Science and Technology University. 5: 145-156.
38. Mukherjee, A. and A. R. Zimmerman. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. Geoderma, *193*, 122-130.

39. Nagajyoti, P.C., Sreekanth, T.V.M. and Lee, K.D. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. Environmental Chemistry Letters. 8 (3): 199–216.
40. Najafi ghiri M. 2014. The effect of different biochars on some soil properties and availability of some nutrients in a calcareous soil. Journal of Soil Researches, 29(2): 351-358.
41. Nigussie, A., E. Kissi., and M. Misganaw. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (Lactuca sativa) grown in chromium polluted soils. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 12 (3): 369-376.
42. Olsen, S.R., C.V. Cole., F.S. Watanabe., and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. Circular, Washington DC, 939: 1-18.
43. Phaniendra A., Jestadi D. B., and Periyasamy L. 2015. Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases. Indian journal of clinical biochemistry. 30(1): 11-26.
44. Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., and Lehmann, J. 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, 48(3): 271-284.
45. Ramos, I., Esteban, E., Lucena, J.J. and Garate, A. ,2002. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of Lactuca spp. Cd-Mn intraction. Plant Science. 162 (5): 761-767.
46. Rodriguez Tejerina, V.M. 2010. Biochar as a Strategy for Sustainable Land Management, Poverty Reduction and Climate ChangeMitigation/Adaptation? Thermolysis of lignin for value-added products.
47. Schmidt, H.P., C. Kammann., C. Niggli., M.W. Evangelou., K.A. Mackie., and S. Abiven. 2014. Biochar and biocharcompost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. Agriculture, Ecosystems and Environment, 191: 117-123.
48. Smeal, D., and H. Zhang. 1994. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 25: 9-10. 1495-1503.
49. Smider, B. and B. Singh. 2014. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. Agriculture, Ecosystems and Environment: 191, 99-107.
50. Tan Z., Wang Y., Zhang L., and Huang Q. 2017. Study of the mechanism of remediation of Cd-contaminated soil by novel biochars. Environmental Science and Pollution Research, *24*(32), 24844-24855.
51. Tang, J., M. He., Q. Luo., M. Adeel., and F. Jiao. 2020. Heavy Metals in Agricultural Soils from a Typical Mining City in China: Spatial Distribution, Source Apportionment, and Health Risk Assessment. Polish Journal of Environmental Studies. 29(2):1379–1390.
52. Tanure, M.M.C., L.M. da Costa., H.A. Huiz., R.B.A. Fernandes., P.R. Cecon., J.D.P. Junior., and J.M.R. da Luz. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. Soil and Tillage Research, 192: 164-173.
53. Van Zwieten, L., S. Kimber., S. Morris., K.Y. Chan., A. Downie., J. Rust., S. Joseph., and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and soil. 327(1): 235-246.
54. Wang, P., H. Chen., P. M. Kopittke., and F. J. Zhao. 2019. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety. Environmental pollution, 249, 1038-1048.
55. Wang, S., Y. Xu., N. Norbu, and Z. Wang. 2018. Remediation of biochar on heavy metal polluted soils. In *IOP* Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 108, No. 4, p. 042113). IOP Publishing.

56. Westermann, R., K. Spies., G. Stahl, and F. W. Hesse. 1996. Relative effectiveness and validity of mood induction procedures: A meta-analysis. European Journal of social psychology, 26(4), 557-580.
57. Woolf, D., J. E. Amonette., F. A. Street-Perrott., J. Lehmann., and S. Joseph. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature communications, 1(1), 1-9.
58. Wu, B., Z. Wang., Y. Zhao., Y. Gu., Y. Wang., J. Yu., and H. Xu. 2019. The performance of biochar-microbe multiple biochemical material on bioremediation and soil micro-ecology in the cadmium aged soil. Science of the total environment. 686 : 719-728.
59. Wu, H., C. Lai., G. Zeng., J. Liang., J. Chen., J. Xu., J. Dai., X. Li., J. Liu., M. Chen., L. Lu., L. Hu, and J. Wan. 2017. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review. Critical reviews in biotechnology, *37*(6), 754-764.
60. Xu X., ZhaoY., Sima J., Zhao L., Mašek O., and Cao X. 2017. Indispensable role of biochar-inherent mineral constituents in its environmental applications: A review. Bioresource Technology. 241, 887-899.
61. Yuan, C., F. Li., W. Cao., Z. Yang., M. Hu., and W. Sun. 2019. Cadmium solubility in paddy soil amended with organic matter, sulfate, and iron oxide in alternative watering conditions. Journal of hazardous materials, *378*, 120672.
62. Zhang, A., Y. Liu., G. Pan., Q. Hussain., L. Li., J. Zheng., and X. Zhang. 2012. Effect of biochar on maize yield and greenhouse emission from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. Plant and soil. 351(1): 263-275
63. Zhang, Q.Z., X.H. Wang., Z.L. Du., X.R. Liu., and Y.D. Wang. 2013. Impact of biochar on nitrate accumulation in an alkaline soil. Soil Research. 51(6): 521-528.
64. Zolfi M., Rownaghi A.M., Karimian N., Ghasemi R., and Yasrebi J. 2016. The effect of biochars produced of

Effect of Different Feedstock and Their Biochars on the Growth of Peppermint (*Piperita* L.) in Cadmium-Contaminated Soil

F. Baharvandi, M. Feizian[1], S. Abdi, and A. Alinejadian Bidabadi

Ph.D. Student Department of Soil Science, College of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran; E-mail: Baharvandi.bahar@yahoo.com

Corresponding Author, Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran; E-mail: Feizian.m@lu.ac.ir

ssistant Professor of Soil and Water research institute, Lorestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agriculture Research Lorestan, Iran; E-mail: Sabdi1100@yahoo.com

Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Lorestan, Iran; E-mail: Alinezhadian.a@lu.ac.ir

Received: May, 2021, and Accepted: February; 2023

Abstract

Today, various methods are used to reduce the negative effects of high concentration of heavy metals in the soil. In this regard, the use of biochar is a relatively cost effective and new method to reduce the toxicity and mobility of heavy metals. In this study, in order to investigate the effect of biochar on improving peppermint plant growth in cadmium-contaminated soil, a pot experiment was conducted using a factorial design in the form of a completely randomized design. Treatments included three factors of cadmium (Cd) levels (50 and 100 mg/kg), the type of organic matter (spruce sawdust, sawdust biochar prepared at 300 and 600 °C, wheat straw, wheat straw biochar at 300 and 600 °C) and the amount of organic matter (zero, 2%, and 4 % by weight). Growth characteristics and performance of peppermint plant essential oil were determined. The results showed that with increasing Cd level, there was a reduction in chlorophyll a 37.6%, chlorophyll b 54.9%, total chlorophyll 42.9%, carotenoid level 31.6%, photosynthesis rate 40.5%, essential oil percentage 34.8%, and essential oil content showed 83.3% reduction. The results indicate the positive effects of biochar in reducing the negative effects of Cd. Comparison of Cd treatment alone with Cd treatments along with biochar showed that herbal biochar had a greater ability to reduce the negative effects of Cd than other treatments. In most cases, wheat straw biochar at two temperatures of 300 and 600 degrees at the level of 2% and 4% was superior in improving plant growth and performance. The highest percentage of essential oil belonged to wheat straw biochar at 600 ^{o}C and level of 2% and 50 mg/kg of Cd with 86% increase compared to the control, with an increase of 20% in the weight of aerial parts. The amount of N, K, and P absorption in this treatment increased by 100%, 73%, and 76%, respectively, compared to the control. The obtained results show the ability of straw and wheat stubble biochar to increase and improve plant growth compared to other organic materials used in this study.

Keywords: Peppermint essential oil, Soil amelioration, Nutrients uptake, Carotenoid, Mentha, Biochar

[1.] Corresponding author: E-mail: Feizian.m@lu.ac.ir