مقاله پژوهشی

نشریه علمی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران | شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/IJMAPR.2021.354663.2994
جلد ۳۷، شماره ۵، صفحه ۷۵۲-۷۳۳ (۱۴۰۰) | شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350905.1400.37.5.2.1

بررسی اثر بیوچار پوسته برنج و رژیم‌های مختلف آبیاری بر رشد، درصد اسانس و غلظت برخی عناصر غذایی در نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.)

انیس کوشکی[۱]، افسانه عالی‌نژادیان بیدآبادی[۲*] و عباس ملکی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک و حفاظت خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

پست الکترونیک: alinezhadian.a@lu.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۰ | تاریخ اصلاح نهایی: شهریور ۱۴۰۰ | تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

به‌منظور بررسی اثر کاربرد بیوچار پوسته برنج بر ویژگی‌های مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی (وزن تر و خشک اندام هوایی، ارتفاع گیاه، درصد و عملکرد اسانس، و محتوی کلروفیل‌ها، کاروتنوئیدها، نیتروژن، فسفر و پتاسیم) نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۳ و ۶ تن در هکتار) و آبیاری (۱۰۰٪ آبیاری کامل (شاهد)، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ درصد آبیاری کامل) با چهار تکرار در آبان سال ۱۳۹۸ به‌صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین وزن تر اندام هوایی تیمارهای ۳ تن در هکتار بیوچار + ۱۲۰٪ آبیاری کامل (۲۴/۲ گرم در گلدان) و ۳ تن در هکتار بیوچار + ۶۰٪ آبیاری کامل (۱۳/۳ گرم در گلدان) مشاهده گردید. در سطح ۶۰٪ آبیاری کامل، وزن خشک، ارتفاع، عملکرد اسانس، غلظت نیتروژن و فسفر اندام هوایی گیاه در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۳۹/۸، ۳۳/۳، ۲۶/۲، ۱۷/۲ و ۸/۷ درصد کاهش معنی‌داری نشان داد؛ در حالی‌که درصد اسانس و غلظت پتاسیم اندام هوایی روند افزایشی داشت. با اعمال تنش آبی، مقدار کلروفیل *a*، *b*، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها کاهش یافت. بیشترین مقدار کلروفیل کل در تیمار ۶ تن در هکتار بیوچار + ۱۰۰٪ آبیاری کامل مشاهده شد. کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار سبب افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک اندام هوایی، ارتفاع گیاه، درصد و عملکرد اسانس، رنگیزه‌های فتوسنتزی و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی در مقایسه با تیمار عدم کاربرد بیوچار گردید. یافته‌ها نشان داد که بیشتر ویژگی‌های بررسی شده در تیمار ۶ تن در هکتار بیوچار + ۱۲۰٪ آبیاری کامل افزایش یافتند. هرچند با توجه به اهمیت نعناع فلفلی از جنبه تولید اسانس، بیشترین درصد اسانس در بالاترین سطح تنش آبی حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، کم آبیاری، عملکرد اسانس، ویژگی‌های فیزیولوژیکی، کاروتنوئید.

مقدمه

گیاهان برای رسیدن به رشد و عملکرد بهینه وابسته به حداقل نیاز آبی هستند و برای رسیدن به اهداف اقتصادی باید این نیاز تأمین شود. بااین‌حال گیاهان در طی دوران رشد خود ممکن است با تنش‌های محیطی متعددی روبرو شوند که براساس حساسیت و مرحله رشد گیاه اثرهای

متفاوتی بر رشد و عملکرد آنها دارد (Ziaei *et al*., 2016). تنش آبی از مهمترین عوامل محدودکننده رشد فیزیولوژیک و تغذیه‌ای گیاهان محسوب می‌شود که کاهش زیست‌توده و عملکرد را در پی خواهد داشت (Ihuoma & Madramootoo, 2017). از این‌رو وقوع تنش آبی در طی دوره رشد امری اجتناب‌ناپذیر است. روابط آبی تمام فرایندهای فیزیولوژیک را که با حلالیت و قابل دسترس بودن عناصرغذایی ارتباط دارند، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Alam, 1999). کاهش وزن تر و خشک اندام‌های گیاه تحت تنش خشکی می‌تواند به‌دلیل کاهش قابل توجه در فتوسنتز و تورژسانس سلولی باشد (Sankar *et al*., 2007). یافته‌های پژوهشی نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک برگ نعناع فلفلی در تنش خشکی شدید نسبت به شاهد شد (Tazikehmiyandare *et al*., 2012). Basiri و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که اعمال تنش خشکی باعث کاهش صفات هوایی شامل وزن تر و خشک ساقه، وزن تر و خشک ریشه، سطح برگ و ارتفاع ساقه گیاه نعناع فلفلی گردید.

خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلایل مختلف ازجمله عدم وجود پوشش گیاهی کافی و بازگشت مقدار کم بقایای گیاهی به خاک، حاوی مقدار کمی مواد آلی هستند (Karami *et al*., 2009). مواد آلی نقش مؤثری در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و تأمین مواد غذایی مورد نیاز گیاهان دارند. بنابراین می‌توان از ماده آلی برای اصلاح ویژگی‌های نامناسب خاک و بهبود پایداری محصول استفاده کرد (Razzaghi & Rezaei, 2017). اضافه کردن مواد آلی به خاک به‌صورت بقایای گیاهی یک شیوه مدیریتی مهم است که می‌تواند قابلیت دسترسی عناصر غذایی و رشد گیاه را افزایش دهد (Mazaheri & Majnoon Hosseini, 2008). زیرا افزودن بقایای گیاهی به خاک، تجزیه سریع و آزادسازی عناصر غذایی را برای حفظ باروری خاک به‌دنبال دارد (Naeem *et al*., 2017). سالانه مقدار زیادی بقایای گیاهی برنج در نظام‌های کشت و کار ایران تولید می‌شوند که گاهی به‌عنوان ضایعات سوزانده شده و یا در برخی قسمت‌های مزرعه رها می‌گردند. سوزاندن بقایا، هدرروی عناصر غذایی مانند نیتروژن و گوگرد و همچنین آلودگی هوا و مشکلات سلامتی برای انسان‌ها را به‌دنبال دارد (Tipayarom & Oanh, 2007). بقایای برنج می‌توانند یا به‌صورت کمپوست و یا کاربرد مستقیم در خاک بازیافت شوند.

بیوچار، ترکیب پایداری از کربن، ماده‌ای متخلخل و بسیار ریزدانه است که در دمای کم تا متوسط تحت شرایطی با اکسیژن محدود تولید می‌شود و طی فرایند نوعی سوخت زیستی به‌صورت مایع یا گاز نیز تولید می‌شود که برای مصارف مختلف قابل استفاده است (Sohi *et al*., 2009). بیوچار را می‌توان از بقایای محصولات کشاورزی مانند کاه گندم، ذرت، سبوس برنج و تفاله نیشکر تهیه کرد. بیوچار از طریق راه‌های مختلفی مانند نگهداری آب و مواد غذایی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (Glaser *et al*., 2002)، بهبود خصوصیات فیزیکی خاک (Sohi *et al*., 2009)، بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی (Ippolito *et al*., 2012)، کاهش گازهای گلخانه‌ای و افزایش مقدار ترسیب کربن (Chan *et al*., 2008) موجب افزایش عملکرد گیاهان می‌شود.

استفاده روزافزون از گیاهان دارویی اهمیت کشت این گیاهان را دو برابر کرده است. اگرچه تولید ترکیب‌های متابولیکی ثانویه عمدتاً توسط خصوصیات ژنتیکی گیاهان کنترل می‌شود، بااین‌حال عوامل محیطی و مدیریتی ازجمله مدیریت تغذیه‌ای گیاه در کمّیت و کیفیت این مواد تأثیر قابل توجهی دارد (Hajlaoui *et al*., 2009). نعناع فلفلی گیاهی علفی، چندساله، ریزوم‌دار و هیبرید متعلق به راسته (Lamiales) و خانواده نعناعیان (Lamiaceae) است. اسانس این گیاه یکی از معروف‌ترین و رایج‌ترین روغن‌های اسانس مورد استفاده است و این به‌دلیل ترکیب‌های اصلی آن یعنی منتول و منتون می‌باشد. خانواده نعناعیان با انتشار و توزیع جهانی از قطب شمال تا جنوب به‌طور گسترده در بسیاری از کشورها عمدتاً به‌عنوان گیاه دارویی با ارزش کشت می‌شود (Kheiry *et al*., 2017). از اسانس نعناع فلفلی و ترکیب‌های آن در صنایع غذایی، داروسازی،

شیرینی‌سازی، ادویه‌سازی و آرایشی و بهداشتی استفاده می‌شود؛ از دیگر خواص نعناع فلفلی می‌توان به درمان سرماخوردگی، تب، تهوع، سردرد، سرفه و اشتهاآور بودن آن اشاره کرد (Galeotti *et al*., 2002).

با توجه به اهمیت کشت گیاه دارویی نعناع فلفلی، نکته مهم در تولید این گیاه، بهبود خواص کمّی و کیفی آن بدون کاربرد نهاده‌های مضر شیمیایی است. از سوی دیگر مقدار جذب عناصر غذایی با رژیم‌های آبیاری تغییر می‌کند و این تغییرات به‌طور مستقیم رشد و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بر کمّیت و کیفیت گیاهان دارویی نیز مؤثر می‌باشد، زیرا قابلیت دسترسی به آب از عوامل کلیدی تأثیرگذار در تولیدات گیاهان دارویی می‌باشد. به‌صورت مستقیم در چرخه بیوشیمیایی تأثیر داشته و این چرخه خود نیز در متابولیسم محصولات ثانویه و اصلی نقش اصلی دارد. بر این اساس این پژوهش به‌منظور ارزیابی اثر بیوچار پوسته برنج بر مقدار رشد و غلظت برخی عناصر غذایی نعناع فلفلی و بررسی درصد اسانس این گیاه با کاربرد سطوح مختلف آبیاری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر بیوچار حاصل از سبوس برنج و رژیم‌های مختلف آبیاری بر ویژگی‌های مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نعناع فلفلی، آزمایشی در شرایط گلخانه به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سطوح مختلف بیوچار (صفر، ۳ و ۶ تن در هکتار) و آبیاری (۱۰۰٪ آبیاری کامل (بدون تنش)، ۶۰، ۸۰ و ۱۲۰ درصد آبیاری کامل) با چهار تکرار در آبان سال ۱۳۹۸ به‌صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان انجام شد.

نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی خاک مورد استفاده

برای انجام این پژوهش، خاک مورد نیاز از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از مزرعه دانشکده کشاورزی لرستان (در ارتفاع ۱۱۴۸ متری از سطح آزاد دریا و واقع در طول جغرافیای ۴۷ درجه شرقی و ۱۰۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه شمالی و ۲۶ دقیقه) جمع‌آوری 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 (Gee & Bauder, 1986)، ماده آلی به روش اکسایش مرطوب (Nelson & Sommers, 1996)، اسیدیته خاک در خمیر گل اشباع (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع به‌وسیله هدایت‌سنج الکتریکی (Rhoades *et al*., 1996)، فسفر قابل استفاده به‌وسیله عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (Olsen *et al*., 1954)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner, 1996)، عناصر کم مصرف کاتیونی (منگنز، مس، آهن و روی) به‌روش عصاره‌گیری با DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) و پتاسیم به‌وسیله عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Knudsen *et al*., 1982) و به‌وسیله دستگاه شعله‌سنج اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

تهیه و تجزیه آزمایشگاهی بیوچار پوسته برنج

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار پوسته برنج، مانند اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی در نسبت یک به ده نمونه به آب (Singh *et al*., 2010)، کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب (Nelson & Sommers, 1996) و نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner, 1996) اندازه‌گیری شدند. به‌منظور تجزیه شیمیایی بیوچار پوسته برنج، یک گرم از هر نمونه برداشته شد و به‌طور جداگانه در کوره‌ای الکتریکی به مدت چهار ساعت در دمای ۵۵۰ 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 (Harns & Kratchvil, 1982)، پتاسیم به‌وسیله دستگاه شعله‌سنج (Jones *et al*., 1991) و غلظت فسفر به روش آمونیوم مولیبدات وانادات (Chapman & Pratt, 1962) اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Sand	Silt	Clay	Cu	Zn	Mn	Fe	K_{ava}	P_{ava}	N	OC	EC	pH
	%				mg.kg^{-1}				%	%	dS.m	
۵۸/۳	۱۵	۲۶/۷	۱/۰۵	۰/۳۲	۷/۶۵	۴/۴۸	۱۵۴/۵	۱۷/۳	۰/۰۷	۰/۸	۰/۶	۶/۵

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار مورد مطالعه

Cu	Zn	Mn	Fe	Na	Mg	Ca	K	P	N	CEC	OC	EC	pH
mg.kg^{-1}				meq.l^{-1}			mg.kg^{-1}		%	Cmol(+).kg^{-1}	%	dS.m^{-1}	
۸/۸۵	۲۳/۵	۲۴۲/۴	۵/۵	۰/۱۹	۰/۸۲	۱/۹	۲۰/۰۳	۴۰/۴	۵/۱۹	۳۴/۰۱	۴۲۱/۱	۱/۰۱	۷/۵۱

کشت گیاه و اعمال تیمارها

برای شروع آزمایش، در هر گلدان تعداد سه ریزوم کشت و بعد تا استقرار نشاء (مستقر شدن نشاء)، آبیاری تمام گلدان‌ها براساس تخلیه رطوبتی انجام شد. پس از استقرار گیاه، برای اعمال تیمارهای آبیاری، مقدار آب مورد نیاز گیاه در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری کامل (٪۱۰۰ نیاز آبی گیاه)، به‌صورت وزنی و با توزین گلدان‌های این تیمار تا رساندن به وزن گلدان در حالت ظرفیت زراعی بدست آمد. پس از آن در سایر تیمارهای آبیاری که ضریبی از تیمار ۱۰۰٪ آبیاری کامل هستند، مقدار آب محاسبه و به گلدان‌ها افزوده شد.

بعد از هشت هفته پس از کاشت، اندام هوایی گیاه در هر گلدان از نزدیک سطح خاک قطع و پس از توزین و شستشو با آب معمولی و بعد با آب‌مقطر، نمونه‌های گیاهی در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت و تا رسیدن به وزن ثابت در آون خشک شدند. سپس نمونه‌های خشک شده توزین شده و به‌وسیله آسیاب برقی برای تجزیه آزمایشگاهی پودر شدند. در نمونه‌های گیاهی، غلظت پتاسیم با دستگاه شعله‌سنج، غلظت عناصر نیتروژن و فسفر نیز به‌ترتیب با روش‌های کجلدال (Bremner, 1996) و آمونیوم مولیبدات وانادات (Chapman & Pratt, 1962) اندازه‌گیری شدند. به‌منظور تعیین مقدار اسانس در گیاه، نمونه‌های ۳۰ گرمی از اندام‌های هوایی خشک شده نعناع فلفلی تهیه و به‌همراه ۳۰۰ میلی‌لیتر آب‌مقطر (نسبت ۱:۱ ماده خشک به آب‌مقطر) در بالن ژوژه ۵۰۰ میلی‌لیتری دستگاه کلونجر قرار داده شد. برای تعیین میزان درصد اسانس از رابطه ۱ زیر استفاده شد.

پس از محاسبه درصد اسانس و عملکرد سرشاخه از رابطه زیر عملکرد اسانس برای هر نمونه محاسبه می‌شود.

رابطه ۱ درصد اسانس = [وزن اسانس استخراج شده (میلی‌گرم)/وزن خشک سرشاخه (۱۰گرم)]×۱۰۰

رابطه ۲ عملکرد اسانس = (درصد اسانس) × وزن تر برگ در گلدان

کلروفیل و کاروتنوئید به روش لیچتنتالر (Lichtenthaler, 1987) اندازه‌گیری شد. میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید برحسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ، به‌ترتیب از طریق روابط ۶-۳ محاسبه شدند.

رابطه ۳ $CA = 11.24 \times A662 - 2.04 \times A645$

رابطه ۴ $CB = 20.13 \times A645 - 4.19 \times A662$

رابطه ۵ $C(A + B) = CA + CB$

رابطه ۶ $C(X+C) = 1000 \times (A470 - 1.90\ CA - 63.14\ CB) / 214$

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 22 و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن (در سطح ۵٪) انجام شد. ترسیم شکل‌ها هم در اکسل انجام شد.

نتایج

وزن تر، وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی گیاه

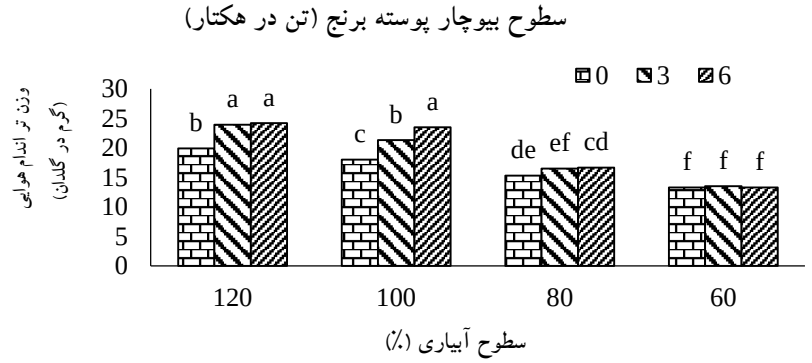
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر اصلی سطوح بیوچار و آبیاری بر وزن تر، وزن خشک و ارتفاع گیاه معنی‌دار شد. در حالی‌که اثر متقابل تیمارها فقط بر وزن تر اندام هوایی معنی‌دار گردید.

یافته‌ها حکایت از آن دارد که بیشترین وزن تر اندام هوایی مربوط به سطح کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار و ۱۲۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۲۴/۲ گرم در گلدان است، هرچند تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۰۰٪ آبیاری کامل ندارد. همچنین کمترین وزن تر اندام هوایی در تیمار عدم کاربرد بیوچار و سطح آبی ۶۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۱۳/۳ گرم در گلدان مشاهده گردید (شکل ۱).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر برخی صفات گیاه نعناع فلفلی

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	ارتفاع	درصد اسانس	عملکرد اسانس	کلروفیل a
بیوچار	۳	۱۹/۹۵**	۲/۰۴۲**	۴۵/۲۵**	۰/۹۲۸**	۰/۰۰۴**	۳۲/۸۱**
آبیاری	۲	۱۷۰/۳**	۱۳/۷۸**	۷۵۷/۹*	۰/۵۹۹**	۰/۰۰۲**	۳۱/۶۲**
بیوچار×آبیاری	۶	۶/۹۵۳**	۰/۰۹۸ns	ns۱/۳۷۷	۰/۰۳۷ns	۰/۰۰۰ns	۴/۳۰۱**
خطا	۲۴	۱/۱۱۲	۰/۲۵۰	۴/۳۴۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۶۰۴
منابع تغییرات		کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئید	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
بیوچار	۳	۱۰/۰۵**	۷۸/۲۸**	۱/۲۷۸**	۰/۰۹۸*	۰/۰۰۲**	۰/۷۹۲**
آبیاری	۲	۲/۷۷۳**	۵۲/۹۳**	۱/۵۴۵**	۰/۷۹۹**	۰/۰۲۱**	۱/۰۱۱**
بیوچار×آبیاری	۶	۰/۵۰۴ns	۶/۶۴۱**	۰/۲۳۶**	۰/۰۱۳ns	۹/۵۸ns	۰/۱۲۷**
خطا	۲۴	۰/۳۳۲	۱/۰۵۴	۰/۰۳۹	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷

* و **: به‌ترتیب از لحاظ آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار می‌باشد. ns: از لحاظ آماری معنی‌دار نمی‌باشد.

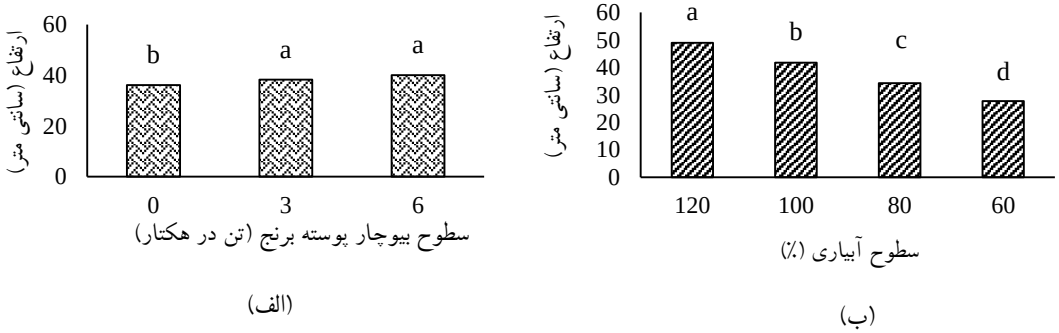


شکل ۱- اثر متقابل بیوچار پوسته برنج و سطوح آبیاری بر وزن تر اندام هوایی

شکل ۲- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر وزن خشک اندام هوایی

کاربرد ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی به مقدار ۱۳/۵۵٪ و ۲۸/۱۳٪ در مقایسه با تیمار شاهد شده است. در حالی‌که بین سطح ۳ تن در هکتار بیوچار و تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲- الف). اعمال سطح آبی ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری کامل، وزن خشک اندام هوایی را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۲۸/۶۸٪ و ۳۹/۸۹٪ کاهش داد. در حالی‌که بین این دو سطح تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲- ب).

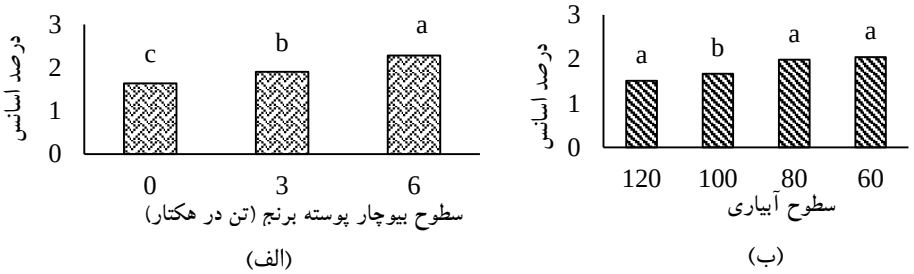
همچنین بکار بردن ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه به میزان ۶٪ و ۱۰/۷۳٪ در مقایسه با تیمار شاهد شد. اعمال سطح آبی ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری کامل، ارتفاع گیاه را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب به‌طور معنی‌داری به مقدار ۱۷/۷۳٪ و ۳۳/۳۴٪ کاهش داد (شکل ۳- الف) و اعمال ۱۲۰٪ آبیاری کامل سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه به مقدار ۱۷/۶۱٪ در مقایسه با تیمار شاهد (۱۰۰٪ آبیاری کامل) شد (شکل ۳- ب).



شکل ۳- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر ارتفاع گیاه

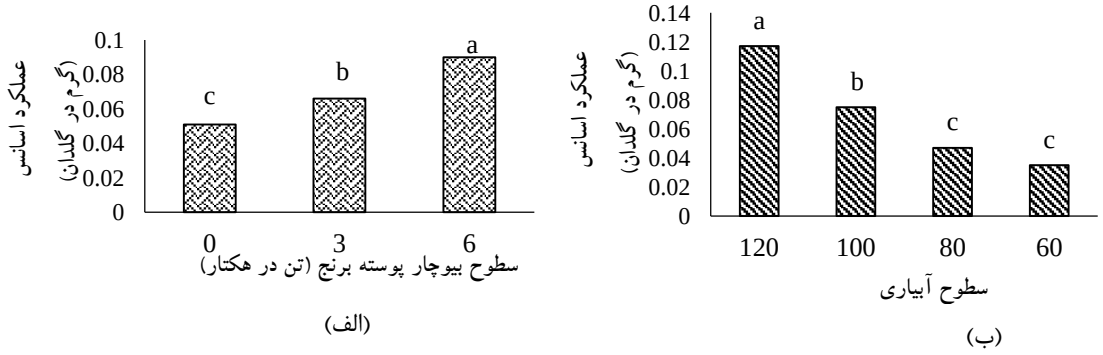
درصد و عملکرد اسانس

نتایج تجزیه واریانس بیانگر این بود که اثرهای اصلی سطوح بیوچار و آبیاری بر درصد اسانس و عملکرد اسانس در سطح ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۳). کاربرد ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار درصد اسانس به مقدار ۹/۶۷٪ و ۳۴/۳۰٪ در مقایسه با تیمار شاهد گردید (شکل ۴- الف). همچنین اعمال سطح آبی ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری کامل، مقدار درصد اسانس را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۱۹٪ و ۲۲/۷۲٪ افزایش داد. اعمال ۱۲۰٪ آبیاری کامل سبب کاهش معنی‌دار درصد اسانس به میزان ۹/۷۷٪ در مقایسه با تیمار شاهد (۱۰۰٪ آبیاری کامل) شد (شکل ۴- ب).



شکل ۴- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر درصد اسانس

با افزایش سطوح بیوچار، مقدار عملکرد اسانس گیاه نیز افزایش پیدا کرد. به‌طوری که کاربرد ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ۲۷/۹۰٪ و ۸۱/۳۹٪ در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۵- الف). اعمال سطح آبی ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری کامل، عملکرد اسانس را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب به‌طور معنی‌داری به مقدار ۱۴/۷۵٪ و ۲۶/۲۲٪ کاهش داد. در حالی‌که اعمال سطح آبی ۱۲۰٪ آبیاری کامل سبب افزایش معنی‌دار عملکرد اسانس در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۵- ب).

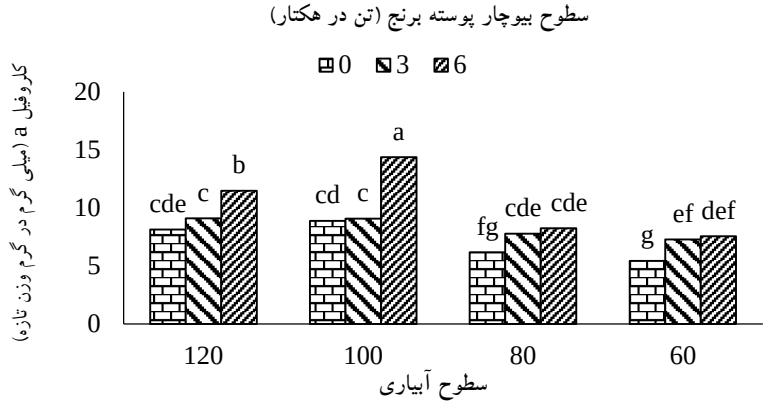


شکل ۵- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر عملکرد اسانس

رنگیزه‌های فتوسنتزی

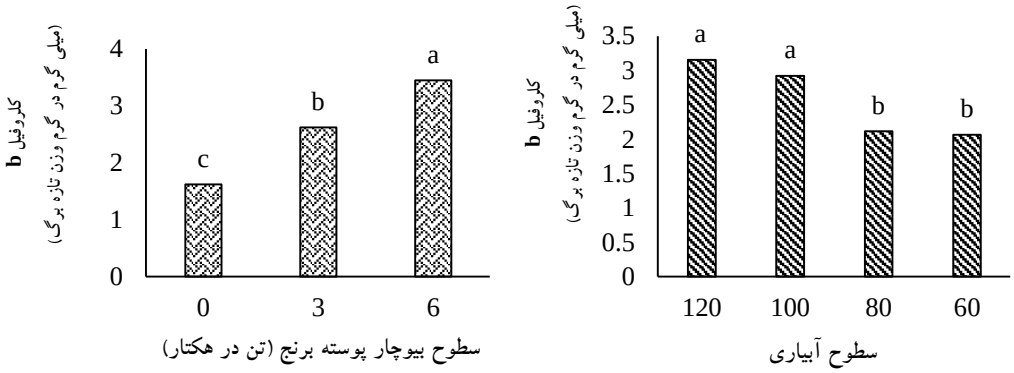
اثرهای اصلی سطوح بیوچار و آبیاری بر کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید در سطح ۱٪ و اثر متقابل تیمارها بر تمام صفات بجز کلروفیل b در سطح ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۳).

نتایج حاصل از شکل ۶ نشان داد که بیشترین مقدار کلروفیل a و کلروفیل کل با کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار و ۱۰۰٪ آبیاری کامل به‌ترتیب به مقدار ۱۴/۳۸ و ۱۸/۷۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ بدست آمد. در حالی‌که کمترین مقدار کلروفیل a و کلروفیل کل مربوط به تیمار عدم کاربرد بیوچار و ۶۰٪ آبیاری کامل به‌ترتیب به مقدار ۵/۴۴ و ۶/۵۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ مشاهده شد.



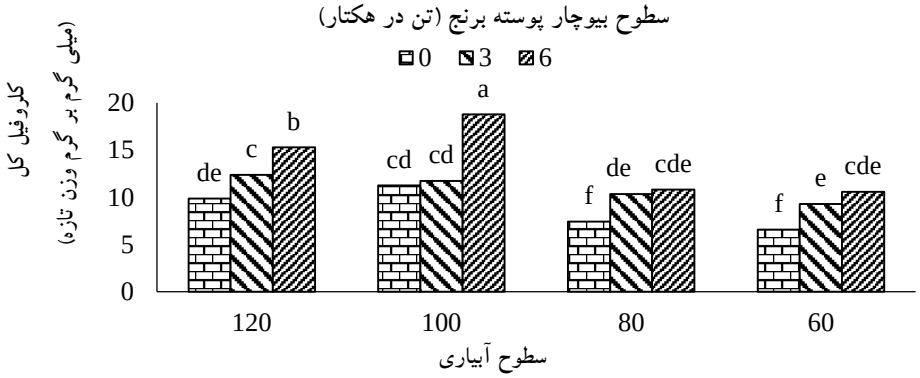
شکل ۶- اثر متقابل بیوچار پوسته برنج و سطوح آبیاری بر کلروفیل a

کاربرد ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار سبب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل b به مقدار ۶۱/۷٪ و ۱۱۲/۷٪ در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۷- الف). همچنین اعمال سطح آبی ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری کامل، مقدار کلروفیل b را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۲۷/۶۳٪ و ۲۹/۲۴٪ کاهش داد. هر چند بین این دو سطح تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. اعمال ۱۲۰٪ آبیاری کامل سبب افزایش معنی‌دار مقدار کلروفیل b به‌میزان ۷/۹۴٪ در مقایسه با تیمار شاهد (۱۰۰٪ آبیاری کامل) شد؛ در حالی‌که با شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۷- ب).



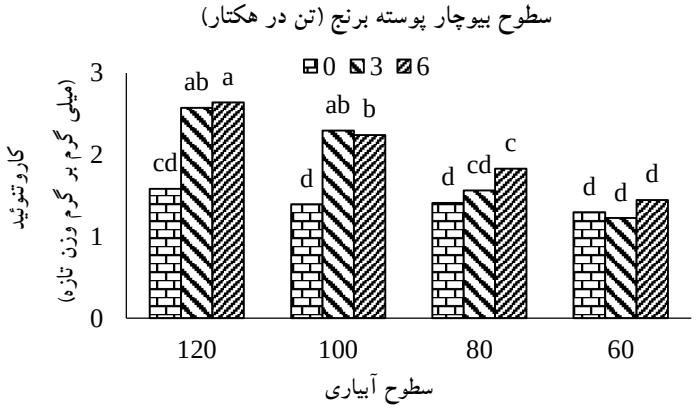
شکل ۷- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر کلروفیل b

نتایج حاصل از شکل ۸ نشان داد که بیشترین مقدار کلروفیل کل مربوط به سطح کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار و ۱۰۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۱۸/۷۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ بدست آمد. در حالی‌که کمترین مقدار کلروفیل کل مربوط به تیمار عدم کاربرد بیوچار و ۶۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۶/۵۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ بود.



شکل ۸- اثر متقابل بیوچار پوسته برنج و سطوح آبیاری بر کلروفیل کل

نتایج حاصل از شکل ۹، حکایت از آن دارد که بیشترین میزان کاروتنوئید در سطح کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار و ۱۲۰٪ آبیاری کامل به‌ترتیب به مقدار ۲/۶۴۱ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ مشاهده شد. همچنین کمترین مقدار کاروتنوئید در تیمار ۳ تن در هکتار بیوچار و ۶۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۱/۲۲۵ میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ مشاهده گردید.

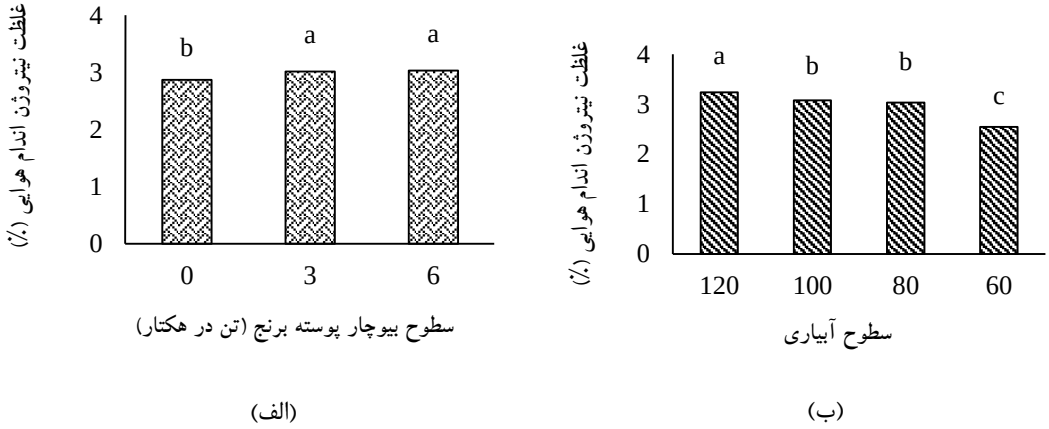


شکل ۹- اثر متقابل بیوچار پوسته برنج و سطوح آبیاری بر کاروتنوئید

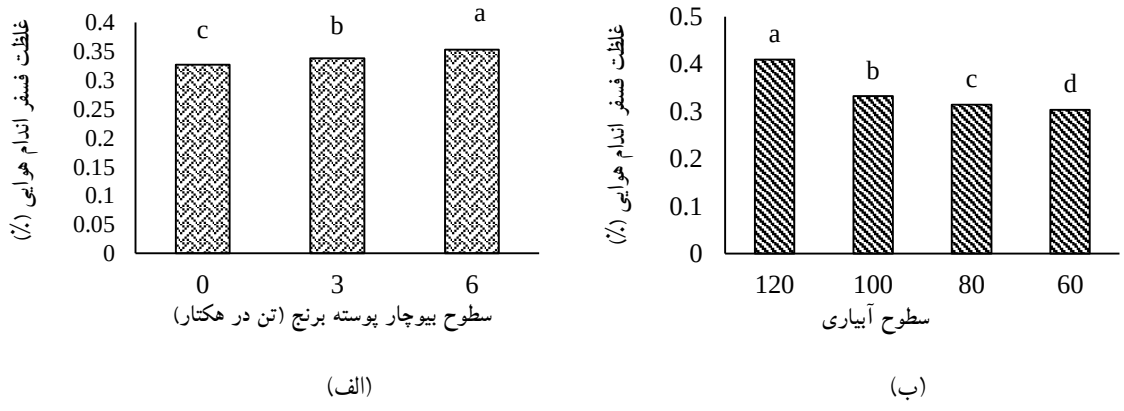
عناصر غذایی در اندام هوایی

نیتروژن

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) بیانگر این است که اثرهای اصلی سطوح بیوچار و آبیاری بر غلظت نیتروژن اندام هوایی به‌ترتیب در سطح ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار شده است. در حالی‌که اثرهای متقابل آنها معنی‌دار نشد. کاربرد ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار سبب افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن اندام هوایی به‌ترتیب به میزان ۵/۰۸٪ و ۵/۷۱٪ در مقایسه با تیمار شاهد شد. در صورتی‌که بین این دو سطح تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۱۰- الف). همچنین اعمال سطح آبی ۶۰٪ آبیاری کامل، غلظت نیتروژن را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری به مقدار ۱۷/۲۶٪ کاهش داد. در حالی‌که بین سطح ۸۰٪ آبیاری با شاهد تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. اعمال ۱۲۰٪ آبیاری کامل سبب افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن اندام هوایی گیاه به میزان ۵/۲۰٪ در مقایسه با تیمار شاهد (۱۰۰٪ آبیاری کامل) شد (شکل ۱۰- ب).



شکل ۱۰- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر غلظت نیتروژن اندام هوایی



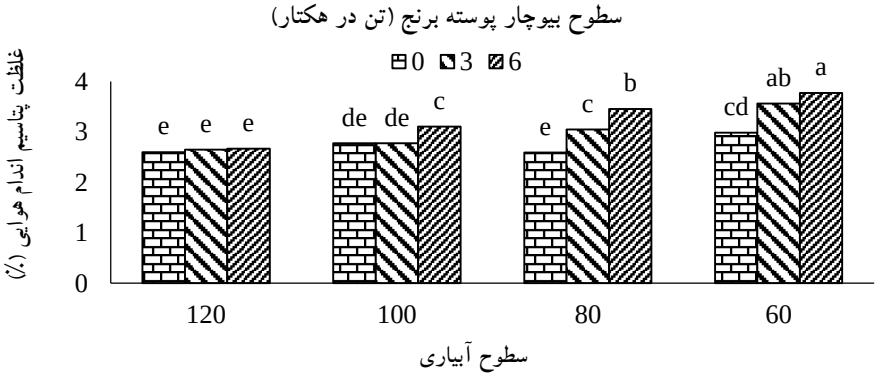
شکل ۱۱- اثرهای اصلی بیوچار و سطوح آب بر غلظت فسفر اندام هوایی

فسفر

طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، تنها اثرهای اصلی سطوح بیوچار و آبیاری بر غلظت فسفر اندام هوایی در سطح ۱٪ معنی‌دار شده است. کاربرد ۳ و ۶ تن در هکتار بیوچار سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر اندام هوایی به‌ترتیب به میزان ۳/۳۶٪ و ۷/۹۵٪ در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۱۱- الف). اعمال سطح آبی ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری کامل، غلظت فسفر را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب ۵/۴۲٪ و ۸/۷۳٪ کاهش داد. اعمال ۱۲۰٪ آبیاری کامل سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر اندام هوایی گیاه (۲۳/۱۹٪) در مقایسه با تیمار شاهد (۱۰۰٪ آبیاری کامل) شد (شکل ۱۱- ب).

پتاسیم

نتایج حاصل از شکل ۱۲، نشانگر اینست که بیشترین مقدار غلظت پتاسیم اندام هوایی مربوط به سطح کاربرد ۶ تن در هکتار بیوچار و ۶۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۳/۷۷۱٪ بود. در حالی‌که با سطح کاربرد ۳ تن در هکتار بیوچار تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین کمترین مقدار غلظت پتاسیم اندام هوایی مربوط به عدم کاربرد بیوچار و ۱۲۰٪ آبیاری کامل به مقدار ۲/۶٪ بود.



شکل ۱۲- اثر متقابل بیوچار پوسته برنج و سطوح آبیاری بر غلظت پتاسیم اندام هوایی

بحث

بیوچار می‌تواند بهبود خصوصیات فیزیکی خاک مانند ساختمان خاک را به‌دنبال داشته باشد. این مسئله در بهبود شرایط فیزیکی خاک مانند تهویه و ظرفیت نگهداشت آب نیز تأثیرگذار بوده و منجر به بهبود رشد گیاه می‌گردد (Novak *et al.*, 2010). در این پژوهش نیز بیوچار توانسته است وزن خشک و تر اندام هوایی گیاه را افزایش دهد. علاوه‌براین بیوچار می‌تواند خصوصیات شیمیایی خاک مانند گروه‌های عاملی و ظرفیت تبادل کاتیونی و دسترسی گیاه به عناصر غذایی را افزایش دهد و در رشد بهتر گیاه مؤثر باشد (Khare *et al.*, 2017). در پژوهش Bolhassani و همکاران (۲۰۱۹) نیز بیوچار پوسته برنج باعث بهبود رشد گیاه اسفناج شد و بیشترین وزن گیاه خشک در تیمار ۱٪ وزنی بیوچار بدست آمد که با این پژوهش همخوانی داشت. نتایج تحقیقی که Smider و Singh (۲۰۱۴) برای بررسی اثر بیوچار تولید شده از زباله سبز گیاه گوجه‌فرنگی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بر گیاه ذرت اجرا کردند، نشان داد که کاربرد ۵ و ۱۵ گرم در کیلوگرم بیوچار سبب افزایش وزن خشک اندام هوایی و محصول ماده خشک برگ ذرت شد.

تنش ناشی از کمبود آب در این پژوهش منجر به کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی شد که احتمالاً علل اصلی آن می‌تواند ناشی از اختلال در تعادل بین تولید گونه‌های فعال اکسیژن و فعالیت دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه باشد که توانسته در سیستم انتقال الکترون در گیاه اختلال ایجاد کند، درنتیجه منجر به کاهش کارایی فتوسنتز و عملکرد گیاهان شود (Soares *et al.*, 2018). در راستای این نتیجه پژوهشگران نیز در تحقیقی در گیاه نعناع فلفلی بیان نمودند که تنش خشکی سبب کاهش وزن تر و خشک ساقه گردید (Gorgini Shabankareh & Khorasaninejad, 2017). در پژوهش Soltanian و همکاران (۲۰۲۰)، بیشترین وزن خشک زیست‌توده گیاه سرخارگل در تیمار عدم تنش آبی (۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه) مشاهده شد و اختلاف معنی‌داری با تیمارهای رطوبتی متوسط و شدید داشت و کاهش مقدار آبیاری در تیمارهای ۷۵٪ و ۵۰٪ نیاز آبی به‌ترتیب موجب کاهش ۹/۵۳٪ و ۲۳/۵۴٪ وزن خشک زیست‌توده شد.

در شرایط تنش آبی، کاهش ماده خشک می‌تواند به‌دلیل فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ گیاه، بسته شدن روزنه‌ها و همچنین کاهش میزان فتوسنتزی به‌دلیل محدودیت‌های بیوشیمیایی ناشی از کمبود آب باشد (Chehregani Rad *et al.*, 2016). البته تنش خشکی از طریق کاهش فشار آماس سلولی سبب کاهش رشد و ارتفاع گیاه خواهد شد. به‌دلیل اینکه رشد سلول‌ها در ابتدا با قابلیت آب گیاه در ارتباط است. کاهش فشار آماس سلولی روی تقسیم سلولی و طویل شدن سلول در گیاهان حساس به تنش اثر می‌گذارد (Levitt, 1980). دسترسی گیاه به آب و عناصر غذایی کافی، به‌ویژه نیتروژن از طریق تأثیر بر تقسیم و بزرگ شدن سلول‌ها در افزایش ارتفاع بوته مؤثر است. در این راستا در این پژوهش نیز تنش آبی منجر به کاهش ارتفاع گیاه گردید که با تحقیق Saedi و همکاران (۲۰۲۰) و کاهش ارتفاع بر اثر مواجه شدن با تنش خشکی در گیاه نعناع فلفلی مطابقت داشت.

در این پژوهش تنش آبی موجب افزایش درصد اسانس برگ شد، زیرا شرایط تنش تولید و نگهداری مواد ثانویه در گیاه را افزایش می‌دهد. این مواد چون از اکسیداسیون درونی سلول‌ها جلوگیری می‌کنند، در شرایط تنش افزایش می‌یابند (Safikhani *et al.*, 2007). همچنین تنش آبی می‌تواند بر متابولیسم گیاه مانند تولید پروتئین‌ها و آنزیم‌ها اثر بگذارد و آن را دچار اختلال کند. در این شرایط در اثر افزایش تجزیه کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک، تولید آلکالوئیدها، اسانس‌ها و مواد معطر گیاهان افزایش می‌یابد (Smailan, 2003). تصور بر این است که در شرایط وقوع تنش خشکی و کم‌آبی، میزان تولید مواد مؤثره به‌دلیل جلوگیری از اکسیداسیون درون سلولی افزایش می‌یابد و از سوی دیگر با کاهش سطح اندام رویشی در اثر تنش خشکی، تعداد غده‌های مترشحه اسانس زیاد می‌شود که در پی آن مقدار اسانس افزایش خواهد یافت (Babai, 2012).

Abyar و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که بیشترین درصد اسانس در گیاه نعناع فلفلی از آبیاری در ۵۰٪ ظرفیت زراعی بدست آمد. نتایج مطالعه Parsa و همکاران (۲۰۱۹) در شرایط تنش خشکی بر روی گیاه نعناع فلفلی نیز نشان داد که با افزایش سطح تنش خشکی درصد اسانس افزایش یافت و بین تیمارهای مختلف تنش خشکی از نظر افزایش درصد اسانس تفاوت معنی‌داری وجود داشت. بیشترین درصد اسانس مربوط به رژیم آبیاری ۵۰٪ ظرفیت زراعی (۱٪/۶۴) و کمترین آن در رژیم آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی به مقدار ۱/۱۲٪ گزارش شد. یافته‌های محققان در این زمینه با این پژوهش همخوانی داشت. در پژوهش Afkari (۲۰۱۸)، اثر تنش خشکی بر روی درصد و عملکرد اسانس گیاه ریحان به‌ترتیب در سطوح ۵٪ و ۱٪ معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف تنش خشکی بر درصد اسانس نشان داد که بالاترین درصد اسانس با مقدار ۱/۵۷٪ مربوط به تیمار D_1 (آبیاری کامل و بدون تنش) و کمترین درصد اسانس با مقدار ۱/۱۴٪ مربوط به تیمار D_3 (آبیاری با تنش خشکی) بود.

در این پژوهش، افزایش درصد اسانس در برگ موجب افزایش عملکرد اسانس نشد، زیرا احتمالاً کاهش عملکرد خشک گیاه بر اثر تنش از افزایش عملکرد اسانس

جلوگیری کرده است. با توجه به اینکه عملکرد اسانس تابعی از درصد اسانس و وزن خشک می‌باشد، بنابراین هر گونه افزایش در این دو مورد می‌تواند منجر به افزایش عملکرد اسانس تولیدی گردد. در پژوهش گلخانه‌ای که توسط Forouzandeh و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد، کاهش عملکرد اسانس و افزایش درصد اسانس در نتیجه تنش خشکی تا ۶۰٪ رطوبت قابل استفاده گیاه زراعی در گیاه نعناع فلفلی گزارش شد که هم‌راستا با این پژوهش بود. از سوی دیگر یافته‌های پژوهش Khorasaninejad و همکاران (۲۰۱۱) بر روی گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش قابل توجه پارامترهای رشدی، درصد و عملکرد اسانس شد که با این تحقیق همخوانی نداشت.

اسانس‌ها اغلب ترکیب‌هایی ترپنوئیدی هستند که واحدهای سازنده آنها مانند ایزوپنتنیل پیروفسفات (IPP) و دی‌متیل آلیل پیروفسفات (DMAPP) نیاز مبرم به NADPH و ATP دارند و حضور عناصری مانند نیتروژن، منیزیم، آهن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های اخیر ضروریست (Kapoor *et al*., 2002). بیوچار حاوی عناصر غذایی می‌باشد و با در دسترس قرار گرفتن عناصر غذایی در طول دوره رشدی گیاه منجر به افزایش غدد ترشح‌کننده اسانس گیاه می‌شود که در نهایت منجر به افزایش ترکیب‌های تشکیل‌دهنده اسانس خواهد شد (Maffei & Mucciarelli, 2003). نتایج این پژوهش بر گیاه نعناع فلفلی نیز بیانگر اینست که کاربرد بیوچار باعث افزایش درصد اسانس گردید که با نتایج Rezaeiyan (۲۰۱۴) همخوانی نشان داد. نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در بیوچار، درصد و عملکرد اسانس را در گیاهان دارویی افزایش می‌دهند، زیرا این عناصر در توسعه و تقسیم سلول‌های جدید حاوی اسانس و بیوسنتز اسانس و مواد مؤثره گیاهان دارویی نقش مهمی ایفاء می‌کنند (Omidbeigi, 2005).

گزارش‌های مختلفی در رابطه با افزایش و یا کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش آبی وجود دارد. کاهش مقدار کلروفیل در شرایط تنش می‌تواند به‌دلیل کاهش سنتز کلروفیل و یا ناشی از تخریب آن باشد. البته بیشتر مطالعات کاهش مقدار کلروفیل را در شرایط تنش خشکی به‌خوبی نشان داده‌اند (Keshavarz Afshar *et al*., 2017؛ Nazar *et al*., 2015). Kheiry و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود گزارش کردند که تنش کم‌آبی سبب کاهش میزان کلروفیل کل در نعناع فلفلی گردید. نقش اصلی کاروتنوئید جلوگیری از آسیب اکسیداتیو می‌باشد، در واقع کاروتنوئیدها از طریق فروکش کردن سریع وضعیت برانگیخته کلروفیل، حفاظت نوری را انجام می‌دهند. در شرایط تنش مقدار کاروتنوئید کاهش یافته و نمی‌تواند نقش حفاظتی خود را انجام دهد، ولی کاهش آنها نسبت به کلروفیل‌ها کمتر است. کاهش محتوای کاروتنوئید به‌دلیل اکسید شدن توسط اکسیژن فعال و تخریب ساختار آنهاست (Wang *et al*., 2010). در شرایط تنش خشکی گیاه به‌منظور جذب آب از طریق تجمع کربوهیدرات‌های محلول و پرولین، قابلیت اسمزی خود را کاهش می‌دهد و به‌عبارت دیگر تنظیم اسمزی انجام می‌شود. بیوچار بر چرخه عناصر و جلوگیری از هدرروی کربن، نیتروژن و فسفر در خاک نقش دارد و پژوهشگران بیان کردند که بیوچار دارای دامنه‌ای از شکل‌های عناصر غذایی بوده که با سرعت‌های متفاوتی آزاد شده و تأثیرات متفاوتی را بر حاصلخیزی خاک دارد (Mukherjee & Zimmerman, 2013) و ازجمله موجب افزایش کلروفیل گیاه می‌شود. بنابراین می‌توان بیان کرد که آهن و منیزیم دو عنصر مهم و اساسی در تشکیل و ساخت کلروفیل به‌شمار می‌روند. آهن در ساختمان سیتوکروم به‌عنوان ناقل الکترون در سیستم‌های فتوسنتزی برای تنفس، عملیات اکسیداسیون و احیاء و ساخت کلروفیل دخالت دارد (Briat *et al*., 2015). منیزیم نیز تنها عنصر فلزی موجود در کلروفیل و به‌عنوان هسته مرکزی سازنده کلروفیل می‌باشد. بنابراین منیزیم به‌طور غیرمستقیم در متابولیسم و فتوسنتز گیاهان دخالت دارد. Sousaraei و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که کاربرد بیوچار بقایای کشاورزی (برنج، پنبه و کلزا) سبب افزایش مقدار کلروفیل‌ها و کاروتنوئید در گیاه ذرت

شد که از این جهت با نتایج این پژوهش مطابقت داشت.

کمبود رطوبت، سرعت انتشار و همچنین جریان توده‌ای را در خاک کاهش داده و باعث می‌شود که مقدار انتقال یون آمونیوم و نیترات به سطح ریشه کاهش پیدا کند و گیاه نتواند نیتروژن کافی دریافت کند. این امر به کاهش غلظت نیتروژن در بافت‌های گیاهی کمک می‌کند (Malakouti & Homaei, 1994). Gonzalez-Dugo و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که جذب نیتروژن توسط گیاه در شرایط تنش خشکی در بیشتر گیاهان کاهش می‌یابد، حتی اگر نیتروژن معدنی در اختیار گیاه قرار گیرد. محلول خاک عموماً با ترکیب‌های آنیونی، کاتیونی و آلی ازجمله ترکیب‌های نیتروژنی بارگیری می‌شود. این ترکیب‌ها زمانی به ریشه‌های گیاه منتقل می‌شوند که تعرق گیاه زمینه را برای جذب و جریان آب فراهم نماید (Porporato *et al.*, 2003). در شرایط تنش خشکی، افزایش غلظت ترکیب‌های نیتروژنی در اطراف ریشه منجر به افزایش فشار اسمزی و تلاش بیشتر گیاه برای حفظ آب سلول‌ها و کاهش تعرق می‌گردد (Pierret *et al.*, 2005). بنابراین مقدار نیتروژن محلولی که به سطح ریشه‌ها می‌رسد به غلظت آن در محلول خاک و جریان آب در بافت‌های گیاه بستگی دارد. در این پژوهش، مقدار بیشتر نیتروژن گیاه در تیمار دریافت کننده ۱۲۰٪ آبیاری کامل در مقایسه با تیمار شاهد، احتمالاً به‌دلیل جذب بیشتر نیتروژن توسط گیاه در اثر فراهمی بیشتر آب بوده است. همچنین Azemi Ardakani و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند با افزایش تنش خشکی، جذب نیتروژن در گونه توت آمریکایی کاهش یافت. در شرایط تنش خشکی به‌دلیل غیر متحرک بودن فسفر در خاک، کاهش رشد ریشه و جذب آب و عناصر غذایی، دسترسی گیاه به فسفر کاهش یافته، در نتیجه می‌تواند سبب کاهش غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه شود (Bagheri & Heidari Sharifabad, 2007). افزایش غلظت پتاسیم در اندام هوایی با افزایش تنش رطوبتی را می‌توان به فاکتور رقت و کاهش رشد و نمو گیاه نسبت داد. در زمانی که رطوبت خاک مناسب باشد ممکن است درصد پتاسیم در بافت‌های گیاهی کاهش یابد و این موضوع می‌تواند به علت رقیق شدن آن باشد. به‌طور کلی نظر بر این است که در اثر تنش خشکی، مقدار جذب پتاسیم در گیاه افزایش می‌یابد و دلیل آن تنظیم فشار اسمزی و نقش یون پتاسیم در کنترل روزنه است. در این پژوهش با افزایش مقدار بیوچار، مقدار پتاسیم گیاه افزایش یافت ولی در تیمار ۱۲۰٪ آبیاری کامل، بین تیمارهای دریافت‌کننده بیوچار تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد که احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد که فاکتور رقّت، آبشویی و خروج پتاسیم قابل استفاده خاک با کاربرد تیمار ۱۲۰٪ نیاز آبی گیاه، تأثیری بیش از اثر کاربرد بیوچار داشته است.

Dastbandan Nejad و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی، میزان پتاسیم جذب شده ۲ تا ۳ برابر شرایط طبیعی است. آنان همچنین گزارش کردند که علت افزایش جذب پتاسیم تحت تنش خشکی را می‌توان به سازوکار جذب فعال این یون به‌وسیله گیاه نسبت داد که بدین‌وسیله مقاومت خود را در برابر تنش بالا می‌برد. بیوچار می‌تواند منبع تغذیه مستقیم برای گیاه باشد و بسیاری از عناصر غذایی ازجمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم را برای گیاه فراهم کند و سبب افزایش غلظت این عناصر در گیاه شود (Gaskin *et al.*, 2008). بهبود شرایط حاصلخیزی و افزایش سطح پتاسیم قابل استفاده در خاک را در اثر افزودن بیوچار دلیل افزایش غلظت پتاسیم در گیاهان رشد کرده در خاک‌های تیمار شده با بیوچار بیان کردند (Lehmann *et al.*, 2013). Bolhassani و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که کاربرد بیوچار پوسته برنج سبب افزایش غلظت عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اندام هوایی اسفناج شد.

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی باید گفت که تولید گیاهان دارویی در نظام‌های زراعی کشور و ازجمله استان لرستان اهمیت شایانی دارد. آب و مواد غذایی مناسب دو عامل مهم در کمّیت و کیفیت گیاهان دارویی ازجمله نعناع فلفلی می‌باشند. در این پژوهش با افزایش تنش آبی، وزن خشک و تر گیاه، ارتفاع، عملکرد اسانس، کلروفیل کل و کلروفیل a و b، کاروتنوئید، فسفر و نیتروژن کاهش و مقدار پتاسیم و

درصد اسانس افزایش یافت. همچنین کاربرد بیوچار باعث افزایش تمامی صفات اندازه‌گیری شد. در بیشتر صفات اندازه‌گیری شده در این آزمایش، تیمار ۱۲۰٪ آبیاری کامل و ۶ تن در هکتار بیوچار مطلوب‌تر از بقیه تیمارها ارزیابی گردید. هر چند که در برخی ویژگی‌ها تفاوت معنی‌داری بین تیمار سه و شش تن در هکتار بیوچار مشاهده نشد. یادآوری می‌شود که بیشترین کاربرد گیاه نعناع فلفلی به‌منظور تهیه اسانس است و هدف از کاشت این گیاه عملکرد کیفی (درصد اسانس) آن می‌باشد، زیرا اسانس آن مصارف دارویی، غذایی، آرایشی و بهداشتی فراوانی دارد. در این پژوهش، اعمال تنش شدید آبی (۶۰٪ آبیاری کامل) منجر به حصول بیشترین درصد اسانس شد و در حقیقت تولید بالاترین درصد اسانس با ۴۰٪ صرفه‌جویی در مصرف آب بدست آمد. همچنین در راستای تولید گیاه دارویی سالم و همگام با کشاورزی پایدار، می‌توان کاربرد بیوچار را جایگزین کود شیمیایی کرد، زیرا بیوچار یک منبع غنی از عناصر غذایی می‌باشد که با سرعت‌های متفاوت آزاد شده و سبب حاصلخیزی خاک می‌شود؛ بنابراین کاربرد آن برای بهبود رشد و عملکرد گیاه مفید است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد. بنابراین نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از کارشناسان محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان خانم دکتر یزدان‌خواه، خانم مهندس تقی‌پور و خانم مهندس سهرابی تشکر و قدردانی نمایند.

منابع مورد استفاده

- Abyar, S., Fakheri, B., Mahdinezhad, N. and Haratirad, M., 2017. Effects of different levels of vermicompost on growth indices and essential oil of peppermint (*Mentha piperita* L.) under different irrigation regimes. Journal of Agronomy and Plant Breeding, 13(2): 29-42.
- Afkari, A., 2018. Effects of drought stress and nitrogen fertilizer rate on some physiological characteristics, essential oil percentage, and yield of basil (*Ocimum basilicum* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 33(6): 1047-1059.
- Alam, S.M., 1999. Nutrient uptake by plants under stress conditions: 285-313. In: Pessarakli, M., (Ed.). Handbook of Plant and Crop Stress, CRC Press, 1198p.
- Azemi Ardakani, M., Dehestani-Ardakani, M. and Soltani Gerdfaramarzi, S., 2019. The effects of culture media on the increasing of drought stress tolerance of Osage orange tree (*Maclura pomifera* L.). Iranian Journal of Forest, 11(1): 105-117.
- Babai, B., 2012. Effect of cystocels on quantitative and qualitative characteristics basil (*Ocimum bosilicum* L.) under drought. Master of thesis, Zabol University, Zabol.
- Bagheri, A. and Heidari Sharif Abad, H., 2007. Effect of drought and salt stresses on yield, yield components, and ion content, of hull-less barley (*Hordeum sativum* L.). Agroecology Journal, 3(2): 1-15.
- Basiri, M., Ghamarnia, H. and Ghobadi, M., 2020. Effect of different deficit irrigation and salinity management on leaf, shoot and root growth of (*Mentha piperita* L.). Water and Irrigation Management, 10(1): 1-14.
- Bolhassani, Z., Ronaghi, A., Ghasemi, R. and Zarei, M., 2019. Influence of rice-husk derived biochar and growth promoting rhizobacteria on the yield and chemical composition of spinach in soil under salinity stress. Iranian Journal of Soil Research, 33(3): 335-348.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total: 1085-1121. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E., (Eds.). Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, 1390p.
- Briat, J.F., Dubos, C. and Gaymard, F., 2015. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. Trends in Plant Science, 20(1): 33-40.
- Chan, K., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. and Joseph. S., 2008. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. Soil Research, 45: 629-634.
- Chapman, H.D. and Pratt, P.F., 1962. Methods of analysis for soils, plants and waters. Soil Science, 93(1): 60-62.
- Chehregani Rad, A., Khorzaman, N., LariYazdi, H. and Shirkhani, Z., 2016. Changes in growth characteristics and physiological indices in Zn-Stressed Phaseolus vulgaris plants on hydroponic medium. Journal of Developmental Biology, 8(2): 31-39.

Analysis and Interpretation Guide. Micro and Macro Publishing Inc., Athens, Georgia, 453p.
- Kapoor, R., Giri, B. and Mukerji, K.G., 2002. Glomus macrocarpum: a potential bioinoculant to improve essential oil quality and concentration in Dill (*Anethum graveolens* L.) and carum (*Trachyspermum ammi* Sprague). World Journal of Microbiology and Biotechnology, 18: 459-463.
- Karami, M., Afyuni, M., Rezaee Nejad, Y. and Khosh Goftarmanesh, A., 2009. Cumulative and residual effects of sewage sludge on zinc and copper concentration in soil and wheat. Journal of Water and Soil Science, 12 (46): 639-654.
- Keshavarz Afshar, R., Hashemi, M., DaCosta, M., Spargo, J. and Sadeghpour, A., 2017. Biochar application and drought stress effects on physiological characteristics of *Silybum*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 47(6):743-752.
- Khare, P., Dilshad, U., Rout, P.K., Yadav, V. and Jain, S., 2017. Plant refuses driven biochar: Application as metal adsorbent from acidic solutions. Arabian Journal of Chemistry, 10(2): S3054-S3063.
- Kheiry, A., Tori, H. and Mortazavi, N., 2017. Effects of drought stress and jasmonic acid elicitors on morphological and phytochemical characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 33: 268-280.
- Khorasaninejad, S., Mousavi, A., Soltanloo, H., Hemmati, Kh. and Khalighi, A., 2011. The effect drought stress on growth parameters, essential oil yield and constituent of pepprmint (*Mentha piperita* L.). Journal of Medicinal Plants Research, 22(5): 5360- 5365.
- Knudsen, D., Peterson, G.A. and Pratt, P.F., 1982. Lithium, sodium, and potassium: 225-246. In: Page, A.L., (Ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., 1159p.
- Lehmann, J., Hanley, K., Enders, A., Hyland, C. and Riha, S., 2013. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. Plant and Soil, 365: 239-254.
- Levitt, J., 1980. Responses of Plants to Environmental Stress, Volume 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses. Academic Press, 510p.
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and cartenoides pigments of hotosynthetice biomembranes. Methods in Enzymology, 148: 350-382.
- Lindsay, W.L. and Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-428.
- Dastbandan Nejad, S., Saki Nejad, T. and Lack, S., 2010. Effect of drought stress and different levels of potassium fertilizer on K^+ accumulation in corn. Natural Sciences, 8(5): 23-27.
- Forouzandeh, M., Sirousmehr, A., Ghanbari, A., Asgharipour, M. and Khammari, E., 2011. Effect of drought stress and municipal compost on quantitive and qualitive of peppermint (Mentha piperita L.). Iranian Journal of Field Crops Research, 9(4): 670-677.
- Galeotti, N., Mannelli, L.D.C., Mazzanti, G., Bartolini, A. and Ghelardini, C., 2002. Menthol: a natural analgesic compound. Neuroscience Letters, 322(3): 145-148.
- Gaskin, J.W., Steiner, C., Harris, K., Das, K.C. and Bibens, B., 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. Transactions of the ASABE, 51(6): 2061-2069.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W., 1986. Particle size analysis, hydrometer methods: 383-411. In: Klute, A., (Ed.). Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 1188p.
- Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W., 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.
- Gonzalez-Dugo, V., Durand, J.L. and Gastal, F., 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops: a review. Agronomy for Sustainable Development, 30: 529-544.
- Gorgini Shabankareh, H. and Khorasaninejad, S., 2017. The effect of application of different levels of vermicompost on some morphophysiological characteristics and essential oil of peppermint medicinal plant under deficit water. Electronical Journal of Crop Production, 10: 59-74.
- Hajlaoui, H., Trabelsi, N., Noumi, E., Snoussi, M., Fallah, H., Ksouri, R. and Bakhrouf, A., 2009. Biological activities of the essential oils and methanol extract of tow cultivated mint species (*Mentha longifolia* and *Mentha pulegium*) used in the Tunisian. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 25(12): 2227-2238.
- Harns, E. and Kratchvil, S., 1982. An Introduction to Chemical Analysis. Holt Rinehart, New York, 256p.
- Ihuoma, S.O. and Madramootoo, C.A., 2017. Recent advances in crop water stress detection. Computers and Electronics in Agriculture, 141: 267-275.
- Ippolito, J.A., Laird, D.A. and Busscher, W.J., 2012. Environmental benefits of biochar. Journal of Environmental Quality, 41(4): 967-972.
- Jones, J.R., Wolf, J.B. and Mills, H.A., 1991. Plant Analysis: A Practical Sampling, Preparation,

ability to understand the roles and functions of fine roots. New Phytologist, 166: 967-980.
- Porporato, A., D'Odorico, P., Laio, F. and Rodriguez-Iturbe, I., 2003. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles I. Modeling scheme. Advances in Water Resources, 26: 45-58.
- Razzaghi, F. and Rezaei, N., 2017. Effect of different biochar levels on physical properties of soils with different textures. Journal of Soil and Water Resources Conservation, 7(1): 75-87.
- Rezaeiyan, A., 2014. Biochar and mycorrhizal arbuscular effect on cadmium absorption, transfer and accumulation in peppermint plant. Master of thesis, Department of soil science, The Shahrood University of Technology, Shahrood.
- Rhoades, J.D., 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids: 417-435. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E., (Eds.). Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 1390p.
- Saedi, F., Sirousmehr, A. and Javadi, T., 2020. Effect of nano-potassium fertilizer on some morpho-physiological characters of peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress. Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 33(1): 35-45.
- Safikhani, F., Heydari sharifabad, H., Syadat, A., Sharifi Ashorabadi, E., Syednejad, S.M. and Abbaszadeh, B., 2007. The effect of drought stress on percentage and yield of essential oil and physiological characteristics of *Deracocephalum moldavica* L. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 23(1): 86-99.
- Sankar, B., Jaleel, C.A., Manivanna, P., Kishorekumor, A., Somasundaram, R. and Panneerselva, R., 2007. Droughtinduced biochemical modifications and proline metabolism in *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench. Acta Botanica Croatica, 66: 43-56.
- Singh, A., Agrawal, M. and Marshall, F.M., 2010. The role of organic vs. inorganic fertilizers in reducing phytoavailability of heavy metals in a wastewater-irrigated area. Ecological Engineering, 36(12): 1733-1740.
- Smailan, K., 2003. General Agronomy. Payame Noor University of Tehran Publications, 364p.
- Smider, B. and Singh, B., 2014. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils. Agriculture, Ecosystems & Environment, 191: 99-107.
- Soares, C., Carvalho, M.E., Azevedo, R.A. and Fidalgo, F., 2018. Plants facing oxidative challenges-A little help from the antioxidant
- Maffei, M. and Mucciarelli, M., 2003. Essential oil yield in peppermint /soybean strip intercropping. Field Crops Research, 84(3): 229-240.
- Malakouti, M.J. and Homaei, M., 1994. Soil Fertility in Dry Areas: Problems and Solutions. Tarbiat Modares University Press, Tehran, 494p.
- Mazaheri, D. and Majnoon Hosseini, N., 2008. General Agriculture. Tehran University Press, Tehran, 80p.
- Mukherjee, A. and Zimmerman, A.R., 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. Geoderma, 193(1): 122-130.
- Naeem, M.A., Khalid, M., Aon, M., Abbas, Gh., Tahir, M., Amjad, M., Murtaza, B., Yang, A. and Akhtar, S.S., 2017. Effect of wheat and rice straw biochar produced at different temperatures on maize growth and nutrient dynamics of a calcareous soil. Archives of Agronomy and Soil Science, 68: 2048-2061.
- Nazar, R., Umar, S., Khan, N.A. and Sareer, O., 2015. Salicylic acid supplementation improves photosynthesis and growth in mustard through changes in proline accumulation and ethylene formation under drought stress. South African Journal of Botany, 98: 84-94.
- Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter: 961-1010. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E., (Eds.). Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 1390p.
- Novak, J., Busscher, W.J., Watts, D.W., Laird, D.A., Ahmedna, M.A. and Niandou, M.A., 2010. Short-term CO_2 mineralization after additions of biochar and switcgrass to a Typic Kandiudult. Geoderma, 154(3-4): 281-288.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. Circular, Washington DC, 939: 1-18.
- Omidbeigi, R., 2005. Approaches to the Production of Medicinal Plants (Vol. 1). Astan Quds Razavi Publications, 440p.
- Parsa, M., Kamaei, R. and Yousefi, B., 2019. Effects of different biofertilizers on elements, essential oil and yield of Peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress conditions. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 35(5): 860-875.
- Pierret, A., Moran, C.J. and Doussan, C., 2005. Conventional detection methodology is limiting our

networks. Environmental and Experimental Botany, 161: 4-25.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E. and Bol, R., 2009. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. CSIRO Land and Water Science Report, 5: 17-31.
- Soltanian, B., Rezvani Moghaddam, P. and Asili, J., 2020. Effects of water deficit stress and fertilizer sources on morphological characteristics and phenolic compounds in medicinal plant purple coneflower (*Echinacea purpurea* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 36(1): 130-141.
- Sousaraei, N., Baranimotlagh, M., Khormali, F. and Dordipour, E., 2019. The effect of biochars prepared from agricultural residues on growth parameters and chlorophyll content of corn (*Zea mays*) in greenhouse condition. Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization (Scientific Journal of Agriculture), 42(1): 13-31.
- Tazikehmiyandare, M., Niyakan, M. and Ahmadigosefidi, M., 2012. Effect of pretreatment of salicylate on the growth and photosynthetic pigments parameters of peppermint (*Mentha piperita* L.) under different levels of stiffness. Journal of Plant Science Research, 28(4): 654-663.
- Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil asidity: 475-490. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E., (Eds.). Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 1390p.
- Tipayarom, D. and Oanh, N.T.K., 2007. Effects from open rice straw burning emission on air quality in the Bangkok metropolitan region. Science Asia, 33: 339-345.
- Wang, L., Fan, L., W. Loescher, W., Duan, W., Liu, G., Cheng, J., Luo, H. and Li. S., 2010. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. BMC Plant Biology, 10: 34-48.
- Ziaei, A., Moghaddam, M. and Kashefi, B., 2016. The effect of superabsorbent polymers on morphological traits of rosemary (*Rosmarinus officinalis*) under drought stress. Journal of Statistical Planning and Inference, 7(2): 99-111.

Effects of rice husk biochar and different irrigation regimes on growth, essential oil percentage, and concentration of some nutrients in peppermint (*Mentha piperita* L.)

A. Koushki[1], A. Alinejadian-Bidabadi[2*] and A. Maleki[3]

1- M.Sc. student of Soil Physics and Soil Conservation, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2*- Corresponding author, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Soil Science Department, Lorestan University, Khoramabad, Iran, E-mail: alinezhadian.a@lu.ac.ir; alinejadian@yahoo.com

3- Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Engineering Department, Lorestan University, Khoramabad, Iran

Received: May 2021 Revised: August 2021 Accepted: September 2021

Abstract

To investigate the effects of rice husk biochar application on the various physiological and biochemical characteristics (fresh and aerial parts dry weight, plant height, percentage and essential oil yield,and content of chlorophylls, carotenoids, nitrogen, phosphorus, and potassium) of peppermint (*Mentha piperita* L.) under different irrigation regimes, a factorial pot experiment with different levels of biochar (0, 3, and 6 $t.ha^{-1}$) and irrigation (100% of full irrigation (control), 60, 80, and 120% of full irrigation) was conducted in a completely randomized design with four replications in the research greenhouse of Lorestan University in 2019. The results showed that the highest and lowest of aerial parts fresh weight were obtained in the 3 $t.ha^{-1}$ biochar + 120% of full irrigation (24.2 $g.pot^{-1}$) and 3 $t.ha^{-1}$ biochar + 60% of full irrigation (13.3 $g.pot^{-1}$) treatments, respectively. At the 60% of full irrigation level, the dry weight, height, essential oil yield, and N and P concentration of the plant aerial parts significantly decreased by 39.8, 33.3, 26.2, 17.2, and 8.7%, respectively compared to the control; while the essential oil percentage and K concentration of aerial parts had an increasing trend. The amount of *a*, *b*, and total chlorophyll, and carotenoids decreased under the water stress conditions. The highest amount of total chlorophyll was observed in the 6 $t.ha^{-1}$ biochar + 100% of full irrigation treatment. The application of 6 $t.ha^{-1}$ biochar increased the fresh and aerial parts dry weight, plant height, percentage and essential oil yield, photosynthetic pigments, and N, P, and K concentration of aerial parts compared to the no biochar application, significantly. The results showed that the 6 $t.ha^{-1}$ biochar + 120% of full irrigation treatment increased most of the traits studied. However, due to the importance of peppermint in terms of essential oil production, the highest essential oil percentage was obtained at the highest level of water stress.

Keywords: Biochar, deficit irrigation, essential oil yield, physiological characteristics, carotenoids.