University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6591.2230

Original article

Changes in shoots, roots and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds with the application of biochar and salicylic acid in saline soil

M. Nasiri[1*], B. Andalibi[2], S. Khomari[3], I. Goli Kalanpa[4]

1. *PhD student of Plant Physiology and Crop Production, Department of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, city of Zanjan, Iran*
2. *Assistant Professor, Department of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran*
3. *Professor, Department of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, city Ardabil, Iran*
4. *Associate Professor, Department of soil group, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, city Ardabil, Iran*

Received 17 July 2023; Accepted 29 November 2023

Extended abstract

Introduction

In many arid and semi-arid regions of the world, including Iran, soil salinization is considered an important obstacle to optimizing the use of agricultural lands. Salinity stress affects the main plant processes, including photosynthesis and the production of photosynthetic process, and with negative effects on these processes, it causes a decrease in plant production. Salicylic acid plays an important role in regulating plant growth, development, ripening and plant defense responses. Application of appropriate concentration of salicylic acid increases tolerance to abiotic stresses, thus not only reducing the destructive effects of stress but also increasing tolerance to biotic stress. However, the concentration of salicylic acid used and its method of application, including foliar spraying, depend on the plant species, and therefore contradictory results can be reported. One of the management strategies for improving the conditions of saline soils is the use of organic amendments, including biochar. In most of the studies, it has been stated that biochar increases the availability of micro and macronutrient elements (directly) and improves physical, chemical and biological characteristics such as increasing cation exchange capacity, dispersion, improving soil structure (indirectly), so increasing microbial biomass and improving soil fertility cased to increasing growth.

Materials and methods

The experiment was carried out factorial experiment in the form of a randomized complete block design with four replications. Factors include biochar in four levels (control without biochar, simple biochar 2.5% by weight in soil and biochar 25% modified with phosphoric acid and sulfuric acid by weight in soil) and salicylic acid foliar spraying in three levels (control, 0.5 and 1 mM) and soil at three levels (normal soil as a control, saline soil at two levels of 4 and 8 dS m^{-1}). Salinity treatment was applied in two stages of planting, at the same time as the first irrigation and when the seedlings were fully established in the soil. To prepare modified biochar, 10 grams of biochar were added with 200 ml of phosphoric acid and one molar sulfuric acid. Foliar spraying with salicylic acid was done based on the determined levels, in two phases, early and late flowering. The desired traits were selected by choosing the number of plants randomly after applying the treatments, and the samples were weighed to evaluate the dry weight after drying in the oven.

* Corresponding author: Masumeh Nasiri; E-Mail: masomehnasiri1390@yahoo.com

© 2025, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

The results of variance analysis showed that the highest plant height in the first and second year of the experiment was obtained from the treatment of 0.5 and 1 millimolar salicylic acid, respectively, combined with the application of simple biochar of 2.5% by weight in the condition of no soil salinity stress. The application of 0.5 mM salicylic acid with biochar modified with phosphoric acid caused the highest number of leaves per plant in the absence of salinity. With increasing soil salinity concentration, the dry weight of bean plants decreased significantly. The application of biochar, especially simple biochar of 2.5% by weight, reduced the negative effects of salinity on these traits. In high soil salinity, the application of salicylic acid, especially combined with the application of simple biochar, improved the grain in the pod. The application of biochar modified with sulfuric acid in all treatments resulted in a significant decrease in grain yield; however, salicylic acid at different levels of salinity combined with the application of simple biochar showed a significant positive effect on grain yield. The highest level of salicylic acid with biochar modified with sulfuric acid showed negative results at different salinity levels on the number of root nodules and root dry weight.

Conclusion

By increase of soil salinity, the dry weight of bean plant decreased significantly, although at high concentrations with the application of biochar, especially simple biochar of 2.5% by weight, the negative effect of salinity on the plant weight decreased to some extent. The application of different levels of biochar in extreme salinity conditions not only did not improve the condition of this trait, but also caused a decrease in this trait compared to the absence of biochar application. Biochar, especially simple biochar, had a positive effect on increasing the number of pods in the plant in conditions of no salinity or moderate salinity. It was concluded that the positive and significant effects of different levels of salicylic acid on the morphological characteristics of the root, including its length, volume and weight, were particularly evident in high soil salinity stress.

Keywords: Modified biochar, Phosphoric acid, Salicylic acid, Sulfuric acid

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6591.2230

مقاله پژوهشی

تغییرات اندام هوایی و ریشه و عملکرد دانه لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) با کاربرد بیوچار و سالیسیلیک اسید در خاک شور

معصومه نصیری[1*]، بابک عندلیبی[2]، سعید خماری[3]، اسماعیل گلی‌کلانپا[4]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان
۲. استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان
۳. استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۴. دانشیار، گروه علوم خاک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
سالیسیلیک اسید
بیوچار اصلاح‌شده
اسیدسولفوریک
اسید فسفریک

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۹/۰۸

چکیده

دانه لوبیا منبع عالی مواد مغذی در رژیم غذایی بشر در بسیاری از کشورها به شمار می‌رود. پژوهشی گلخانه‌ای به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال متوالی در چهار تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا گردید. فاکتورها شامل بیوچار آلی (تهیه‌شده از بید جنگلی) در چهار سطح (شاهد بدون بیوچار، بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی در خاک و بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید و سولفوریک اسید ۱/۲۵ درصد وزنی در خاک) و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در سه سطح (شاهد بدون محلول‌پاشی، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) و شوری در سه سطح (۰،۴ و ۸ دسی زیمنس بر متر) بودند. بالاترین ارتفاع بوته در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب از تیمار ۰/۵ و یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با کاربرد بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی در شرایط عدم تنش شوری خاک به میزان ۴۵/۴۵ درصد نسبت به تیمار شاهد به دست آمد. کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید با بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید در شرایط عدم شوری بالاترین تعداد برگ در بوته (۲۰/۱ عدد) را موجب شد. با افزایش غلظت شوری خاک، وزن خشک بوته لوبیا به‌طور معنی‌دار (۷۲ درصد نسبت به تیمار شاهد) کاهش نشان داد. در شوری ۸ دسی زیمنس بر متر، کاربرد سالیسیلیک اسید بالأخص توأم با کاربرد بیوچار اولیه موجب بهبود دانه در غلاف (۹۰/۳۰ درصد) گردید. بالاترین تعداد گره در ریشه (۱۱/۳ گره) متعلق به ترکیب تیماری کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با مصرف بیوچار ساده در شرایط عدم اعمال تنش شوری در خاک بود. مقدار افزایش ۱۵/۲۸ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. کاربرد سالیسیلیک اسید در مقدار یک میلی‌مولار بدون کاربرد بیوچار و تحت شرایط شوری شدید، بالاترین وزن خشک ریشه به میزان ۵۲/۹۸ درصد نسبت به شاهد را موجب شد.

مقدمه

لوبیا در میان حبوبات بیشترین سطح زیر کشت را دارد و دارای ارزش اقتصادی بالایی است (Petry et al., 2015). دانه لوبیا منبع عالی مواد مغذی در رژیم غذایی بشر در بسیاری از کشورها به شمار می‌رود (Gulati et al., 2018). فرآیند رشد و توسعه گیاه تحت تأثیر عوامل محیطی مختلف قرار می‌گیرند. ازجمله این عوامل می‌توان به شوری خاک اشاره کرد که بالا بودن آن به‌عنوان تنش، در محدود کردن رشد و نمو گیاه اثرات مستقیم و غیرمستقیم دارد (Zhang et al., 2011). مهم‌ترین واکنش گیاه به شوری خاک، کاهش رشد است که می‌تواند به دلیل اختلال در جذب آب و املاح، بسته شدن جزئی یا کلی روزنه‌ها و کاهش کارایی فتوسنتز باشد (Razzaghi et al., 2011). تنش شوری سبب تخریب

* نگارنده پاسخگو: معصومه نصیری. پست الکترونیک: masomehnasiri1390@yahoo.com

سیستم متابولیسمی و بی‌نظمی غشایی شده و با افزایش لیگنین و ضخامت دیواره سلولی، قابلیت ارتجاعی آن را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش تقسیم و گسترش سلولی و درنهایت افت رشد، توسعه و درصد بقای گیاهان می‌گردد (Reginato et al., 2016). اثر مصرف خارجی سالیسیلیک اسید روی رشد به غلظت و گونه‌های گیاهی بستگی دارد (Jayakanan et al., 2015). به‌طورمعمول غلظت بالا از سالیسیلیک اسید، رشد و نمو گیاهچه و تحمل به تنش را کاهش، درحالی‌که رشد گیاه با کاربرد غلظت پایین افزایش نشان داده است (Kang et al., 2012). در گیاهان زراعی به اثر سالیسیلیک اسید در بهبود خصوصیات مورفولوژیک ریشه و اندام هوایی و صفات مرتبط با عملکرد دانه اشاره شده است (Yazdanpanah et al., 2015; Kheirkhah et al., 2016; Ijaz et al., 2019).

کاربرد برگی سالیسیلیک اسید باعث بهبود رشد، اجزای عملکرد و عملکرد دانه در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata*) نسبت به تیمار شاهد گردید (Azder Afshari et al., 2016). همچنین کاربرد سطوح مشخصی از سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک محافظ توانست باعث کاهش خسارت ناشی از شرایط تنش‌زا در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی شود (Azder Afshari et al., 2016). مصرف سالیسیلیک اسید تحت شرایط تنش محیطی با تعدیل اثرهای منفی آن به‌خصوص در مراحل رویشی رشد گیاه، موجب بهبود رشد و عملکرد لوبیا گردید (Sepehri et al., 2015).

بیوچار به دلیل قدرت بالا در جذب می‌تواند با کاهش غلظت سدیم از طریق نگهداری سدیم بر روی سطح خود (Lashari et al., 2015) و کاهش نسبت سدیم به پتاسیم، اثرات منفی و مخرب شوری بر رشد و نمو گیاهان را تقلیل دهد (Akhtar et al., 2015; Patel et al., 2015; Kanwal et al., 2017). در اکثر مطالعات بیان شده است که بیوچار با افزایشی فراهمی عناصر ریز و درشت مغذی (مستقیم) و بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مانند افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، pH، بهبود ساختمان خاک، افزایش زیست‌توده میکروبی و بهبود حاصلخیزی خاک در افزایش رشد گیاه نقش دارد (Peng et al., 2012). ازجمله محدودیت‌های مهم در زراعت گیاهان زراعی شوری خاک است. در بین گیاهان زراعی، حبوبات به‌ویژه لوبیا نقش مهمی در تغذیه دارد، از طرفی با توجه به حساسیت بالای این گیاه به شوری خاک، لازم است در راستای تداوم زراعت لوبیا در اراضی دارای شوری خاک با حفظ و بهبود عملکرد آن از مواد با منشأ طبیعی و آلی دوستدار طبیعی سالیسیلیک اسید و بیوچار به‌عنوان مواد مهارکننده تنش استفاده گردد. با بررسی منابع مختلف مشخص شد اطلاعاتی در مورد تأثیر تعدیل‌کنندگی کاربرد توأم بیوچار و سالیسیلیک اسید و پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی لوبیا به تنش شوری وجود ندارد. طبق بررسی‌های انجام‌شده این طرح تاکنون انجام نگرفته و با توجه به کشت لوبیا در منطقه و حساسیت به شوری طرح موردنظر انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل سه عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال متوالی در چهار تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در سال‌های ۱۴۰۲-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ اجرا گردید. فاکتورها شامل بیوچار در چهار سطح (شاهد بدون بیوچار، بیوچار ساده ۲/۵ درصد وزنی در خاک و بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید و سولفوریک اسید ۱/۲۵ درصد وزنی در خاک) و محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید در سه سطح (شاهد بدون محلول‌پاشی، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) و شوری در ۳ سطح (۴،۰ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. عملیات کاشت بذرها در سال اول در تاریخ ۱۴ فروردین و سال دوم در ۳۰ فروردین‌ماه با تراکم ۱۲ بوته در گلدان‌های ۷ کیلویی انجام گرفت. بیوچار آلی تهیه‌شده از بید جنگلی از شرکت شاران صنعت تهیه گردید (جدول ۱). رقم یاقوت لوبیا از شرکت پاکان بذر اصفهان خریداری و خاک مورد آزمایش از ایستگاه تحقیقات کشاورزی سامیان اردبیل تهیه و در آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه محقق اردبیلی آنالیز گردید (جدول ۲).

جدول ۱. خصوصیات بیوچار استفاده‌شده در آزمایش

Table 1. Properties of the biochar used in the experiment.

مشخصه characteristic	نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	ماده آلی OC	EC(شوری)	مس Cu	روی Zn	منگنز Mn	آهن Fe
	----------%----------				mS cm^{-1}	----------mg Kg^{-1}----------			
مقدار Quantity	0.5	0.11	0.10	67.6	1.02	0.62	1.20	2.35	3.65

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده در آزمایش

Table2. Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

pH	هدایت الکتریکی EC	بافت خاک Texture	Sand(شن)	Clay(رس)	Silt(سیلت)	P(ava.) فسفر	K(ex) پتاسیم	N نیتروژن	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی	OM ماده آلی	OC کربن آلی
	ds m^{-1}		0.05-2	<0.002	0.05-0.002	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	%	meq100g soil^{-1}		%
			----------%----------								
8.2	0.8	Clay Loam	30	42	28	10.8	181	0.07	10.5	0.6	1.7

دمای روزانه و شبانه گلخانه به ترتیب روی ۲۴ و ۱۹ درجه سلسیوس و میزان رطوبت بر روی ۵۰ درصد تنظیم گردید. برای تهیه بیوچار اصلاح‌شده ۳۲۵ گرم بیوچار را در ۳/۲۵ لیتر فسفریک اسید / سولفوریک اسید یک مولار به‌طور کامل مخلوط نموده (نسبت ۱۰ گرم بیوچار در ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول اسیدی) و سوسپانسیون حاصل را به مدت ۲۴ ساعت در ۱۵۰ دور در دقیقه روی شیکر گذاشته و هم زده می‌شود. سپس بیوچار به‌وسیله سانتریفوژ از محلول جداشده و پس از سه بار شستشو با آب دیونیزه در آون ۶۵ درجه خشک‌شده و در ظروف دربسته نگهداری گردید. پس از یک ماه، خاک آماده‌شده به گلدان‌ها انتقال داده شد (Islam et al., 2022). برای جلوگیری از هدر رفت شوری اعمال‌شده، از زیرگلدانی پلاستیکی استفاده گردید تا آب مازاد حاوی نمک به داخل گلدان‌ها منتقل شود. برای اعمال شوری با EC=4 مقدار نمک استفاده‌شده، ۱/۰۹ گرم و برای EC=8 مقدار نمک موردنیاز ۲/۲ گرم محاسبه گردید و از نمک طعام برای آزمایش استفاده گردید. تیمار شوری در دو مرحله، مرحله اول در زمان کاشت، هم‌زمان با اولین آبیاری و مرحله دوم زمانی که گیاهچه‌ها به‌طور کامل در خاک مستقر شدند، اعمال شد. محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید بر اساس سطوح تعیین‌شده، در دو مرحله، ۵۰ درصد گلدهی و اواخر گلدهی انجام گرفت. نمونه‌برداری ۲ هفته بعد از محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید انجام گرفت. صفات موردنظر با انتخاب بوته‌های مرکزی، بعد از اعمال تیمارها انتخاب و برای ارزیابی وزن خشک، بعد از خشک شدن در آون، نمونه‌ها توزین شدند. حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج باریک تعیین گردید. جهت شمارش تعداد گره در بوته پس از رسیدگی کامل، از هر گلدان به‌طور تصادفی نمونه‌برداری انجام شد. برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد شامل تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن صد دانه، تمامی بوته‌های هر گلدان برداشت شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ به‌صورت تجزیه مرکب، تجزیه واریانس شدند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. نمودارها و شکل‌ها با نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ رسم شدند.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

بر اساس تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات اصلی شوری و بیوچار به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد روی این صفت معنی‌دار شد. اثرات متقابل دوجانبه شوری × بیوچار و سال × سالیسیلیک اسید و برهمکنش چهارجانبه عوامل آزمایش سال × شوری × بیوچار × سالیسیلیک اسید نیز در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار بر صفت ارتفاع بوته در لوبیا نشان دادند (جدول ۳).

با توجه به معنی‌دار بودن برهمکنش چهارجانبه برای ارتفاع بوته، مقایسه میانگین به‌طور جداگانه برای هرسال انجام یافت. در سال اول آزمایش بالاترین ارتفاع بوته از ترکیبات تیماری ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید با کاربرد بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی در خاک در شرایط عدم شوری خاک و سطح شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر (بدون اختلاف آماری معنی‌دار) و عدم کاربرد بیوچار با ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید به دست آمد (به ترتیب ۶۵/۳ و ۵۹/۷ سانتی‌متر). کمترین میزان این صفت نیز با مصرف ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید ۱/۲۵ درصد وزنی در خاک در شرایط شوری ۸ دسی زیمنس بر متر مشاهده شد (شکل ۱).

در سال دوم آزمایش مصرف بالاترین سطح سالیسیلیک اسید (۱ میلی‌مولار) یا کاربرد بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی در خاک در شرایط عدم شوری خاک بالاترین ارتفاع بوته را موجب شد، اگرچه این ترکیب تیماری با ترکیبات تیماری کاربرد ۰/۵ و یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید در شرایط عدم

کاربرد بیوچار و شوری خاک ۸ دسی زیمنس بر متر به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (شکل ۱).

ازنظر ارتفاع بوته، تفاوت‌های معنی‌داری بین ترکیبات تیماری وجود داشته، اما به نظر می‌رسد کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید در سال اول و یک میلی‌مولار از آن در سال دوم با کاربرد بیوچار ساده ۲/۵ درصد وزنی در خاک و بیوچار تغییریافته با فسفریک اسید نتیجه بهتری را در سطوح مختلف شوری نشان داده است.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر شوری خاک، بیوچار و اسید سالیسیلیک بر صفات رویشی لوبیا

Table3. Variance analysis of the effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on growth characteristics of beans

		درجه	Mean Square		میانگین مربعات
	منابع تغییر	آزادی	ارتفاع بوته	تعداد برگ	وزن خشک اندام هوایی
S.O.V		df	Plant height	Leaf Number	Aerial dry weight
Year (Y)	سال	1	255.19 ^{ns}	37.99 ^{ns}	0.253 ^{ns}
Block (Y)	بلوک (سال)	6	321.7 ^{ns}	38.13 ^{ns}	0.491 ^{ns}
Salinity (S)	شوری	2	459.15 *	65.45 *	1.621 ^{ns}
Biochar (B)	بیوچار	3	2450.13 **	597.08 **	3.299 **
Salicylic acid (SA)	اسید سالیسیلیک	2	2101.74 ^{ns}	145.7 ^{ns}	0.645 ^{ns}
S × B	شوری × بیوچار	6	2454.49 **	210.83 **	1.614 **
S × SA	شوری × سالیسیلیک اسید	4	85.79 ^{ns}	6.87 ^{ns}	0.083 ^{ns}
B × SA	بیوچار × سالیسیلیک اسید	6	136.37 ^{ns}	24.25 ^{ns}	0.096 ^{ns}
S × B × SA	شوری × بیوچار × سالیسیلیک اسید	12	128.56 ^{ns}	10.22 ^{ns}	0.064 ^{ns}
Y × S	سال × شوری	2	12.99 ^{ns}	1.52 ^{ns}	0.124 ^{ns}
Y × B	سال × بیوچار	3	54.03 ^{ns}	10.72 ^{ns}	0.095 ^{ns}
Y × SA	سال × سالیسیلیک اسید	2	2122.12 **	154.88 *	0.56 ^{ns}
Y × S × B	سال × شوری × بیوچار	6	107.14 ^{ns}	12.48 ^{ns}	0.081 ^{ns}
Y × S × SA	سال × شوری × سالیسیلیک اسید	4	95.22 ^{ns}	3 ^{ns}	0.062 ^{ns}
Y × B ×SA	سال × بیوچار × سالیسیلیک اسید	6	35.26 ^{ns}	8.53 ^{ns}	0.041 ^{ns}
Y×S×B×SA	سال×شوری×بیوچار×سالیسیلیک اسید	12	194.28 **	5.97 ^{ns}	0.059 ^{ns}
Error	خطای کل	210	66.21 ^{ns}	4.22 ^{ns}	0.096 ^{ns}
C. V (%)	ضریب تغییرات (درصد)		*21.1*	*13.45*	*24.14*

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively

تعداد برگ

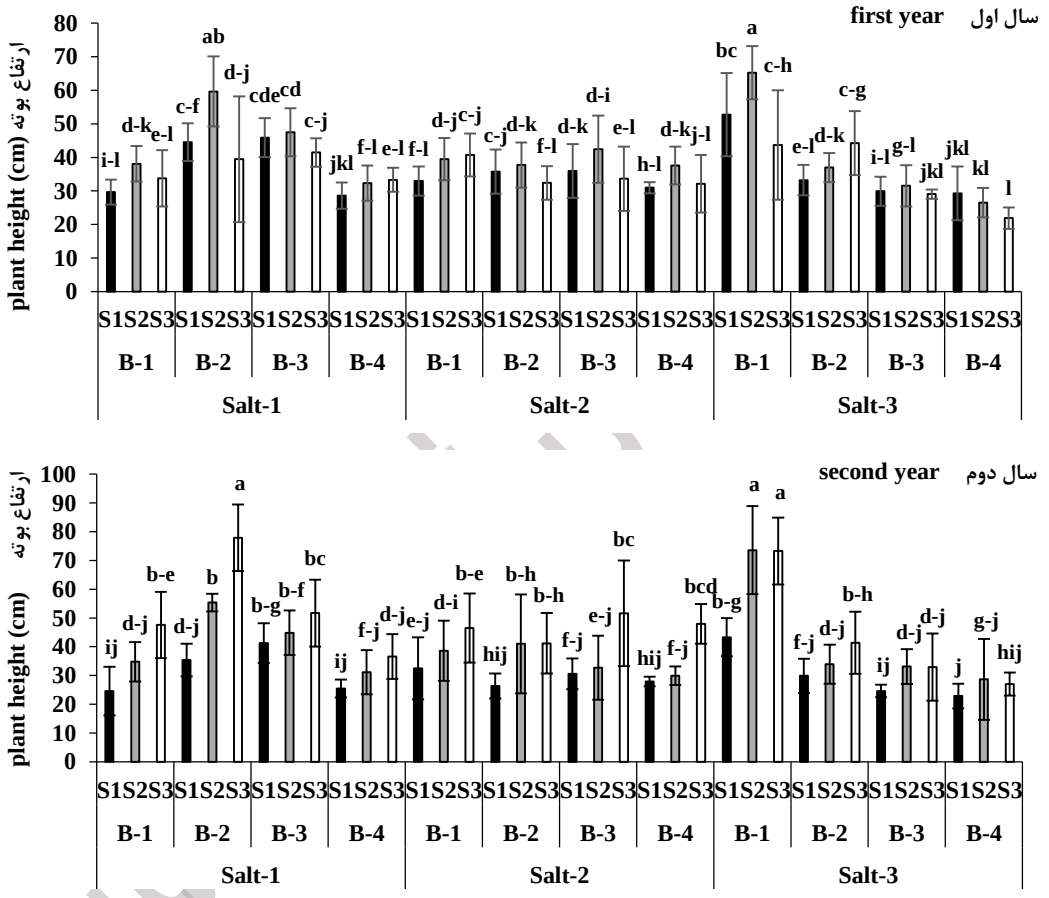
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی شوری در سطح احتمال پنج درصد و بیوچار در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار روی تعداد برگ در لوبیا داشت. در بین اثرات متقابل عوامل آزمایشی، برهمکنش دوجانبه شوری در بیوچار و سال در سالیسیلیک اسید هر دو در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار روی این صفت نشان دادند (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد بیوچار به شکل اصلاح‌شده با فسفریک اسید در شرایط عدم شوری خاک بالاترین تعداد برگ در بوته (۲۰/۱ عدد) را به خود اختصاص داد، درحالی‌که کمترین میزان این صفت با کاربرد بیوچار به شکل اصلاح‌شده با سولفوریک اسید و در شرایط شوری شدید خاک (۸ دسی زیمنس بر متر) به دست آمد (شکل ۲).

برهمکنش سال در سالیسیلیک اسید نشان داد که بالاترین تعداد برگ در سال اول (۱۷/۷ عدد) متعلق به کاربرد یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید و در سال دوم آزمایش از مصرف ۰/۵ میلی مولار سالیسیلیک اسید (۱۵/۸ برگ در بوته) به دست آمد (جدول ۴).

وزن خشک اندام هوایی

در خصوص وزن خشک اندام هوایی، بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر اصلی بیوچار در سطح احتمال پنج درصد و اثر متقابل دوجانبه شوری و بیوچار در سطح احتمال یک

درصد تأثیر معنی‌دار بر روی این صفت نشان دادند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کاربرد بیوچار به شکل بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی در خاک در شرایط عدم شوری خاک و یا شوری خاک با غلظت ۴ دسی زیمنس بر متر بالاترین وزن خشک بوته را در لوبیا نشان داد (۱/۸ گرم)، درحالی‌که کمترین مقدار این صفت متعلق به ترکیب تیماری بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید و سولفوریک اسید ۱/۲۵ درصد وزنی در خاک بدون تفاوت آماری معنی‌دار در شرایط شوری خاک بالا (۸ دسی‌زیمنس بر متر) بود (شکل ۳).

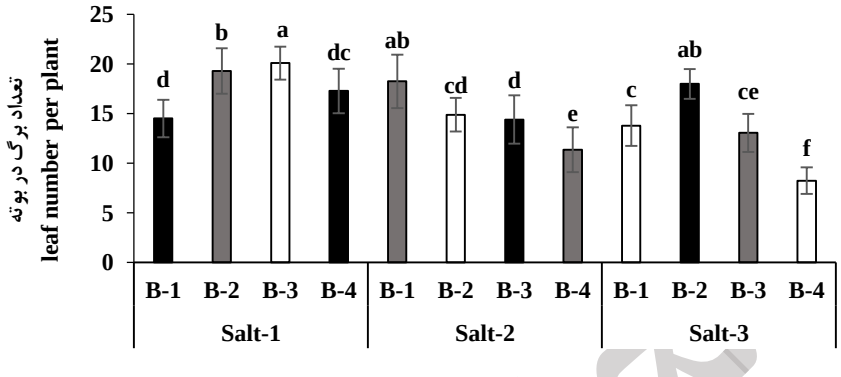


شکل ۱. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر ارتفاع بوته در سال اول و دوم آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید.

Fig. 1. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on plant height in the first and second year of the experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت شوری خاک، وزن خشک بوته لوبیا به‌طور معنی‌دار کاهش نشان داد، اگرچه در غلظت‌های بالا با کاربرد بیوچار بالأخص بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی تا حدودی اثر منفی شوری بر وزن بوته کاهش نشان داد. شوری خاک هم به‌طور مستقیم از طریق اختلال در جذب عناصر و آب (Zhang et al., 2011) و هم به‌طور غیرمستقیم از طریق تخریب سیستم متابولیسمی و کاهش کارایی فتوسنتز (Razzaghi et al., 2011) منجر به کاهش تقسیمات سلولی و درنهایت کاهش رشد در گیاه می‌گردد (Reginato et al., 2016). بااین‌حال گزارش شده است که

رشد گیاه با کاربرد غلظت پایین از سالیسیلیک اسید افزایش نشان داده است (Kang et al., 2012)، هرچند در گونه‌های مختلف گیاهی این امر می‌تواند به شکل‌های مختلف بروز نماید. از طرفی کاهش اثرات منفی شوری با کاربرد بیوچار به‌واسطه جذب عناصر ازجمله کلسیم (Lashari et al., 2015) و جایگزینی آن با سدیم خاک و اثر مثبت بر رشد گیاهان توسط محققین گزارش شده است (Kanwal et al., 2017).



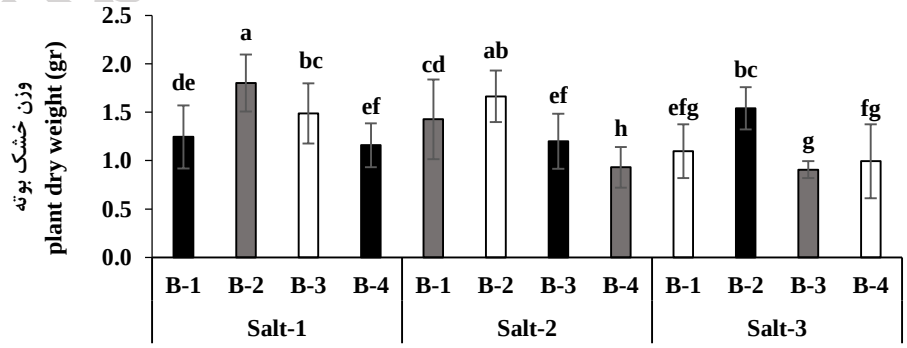
شکل ۲. اثر متقابل شوری خاک و بیوچار بر میانگین تعداد برگ در بوته در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر ؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 2. Interaction effect of soil salinity and biochar on number of leaves per plant in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر سالیسیلیک اسید (میلی مولار) بر تعداد برگ در دو سال آزمایش

Table 4. Mean comparison of Salicylic acid (millimolar)on leaf number at two years studied

Year سال	2022 ۱۴۰۱			2023 ۱۴۰۲		
سالیسیلیک اسید Salysilic acid	شاهد control	0.5	1	شاهد control	0.5	1
تعداد برگ Leaf number	13.0± 1.57^{c}	16.2 ± 2.03^{b}	17.7 ± 1.98^{a}	14.7 ± 1.72^{b}	15.8± 2.14^{a}	14.2 ± 1.67^{b}



شکل ۳. اثر متقابل شوری خاک و بیوچار بر میانگین وزن خشک بوته در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛B-1 : بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 3. Interaction effect of soil salinity and biochar on plant dry weight in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

تعداد غلاف در بوته

نتایج تجزیه واریانس حاکی از تأثیر معنی‌دار سال و بیوچار در سطح احتمال یک درصد و شوری و سالیسیلیک اسید در سطح احتمال پنج درصد روی صفت تعداد غلاف در بوته بود. همچنین برهمکنش دوجانبه شوری در بیوچار، شوری در سالیسیلیک اسید و بیوچار در سالیسیلیک اسید هر سه در سطح احتمال یک درصد، تأثیر معنی‌دار بر این صفت داشتند. اثر متقابل سه‌جانبه شوری در بیوچار در سالیسیلیک اسید و نیز سال در شوری در بیوچار نیز در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار بر تعداد غلاف در بوته لوبیا نشان دادند (جدول ۵).

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر شوری خاک، بیوچار و اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه و اجزای آن در لوبیا

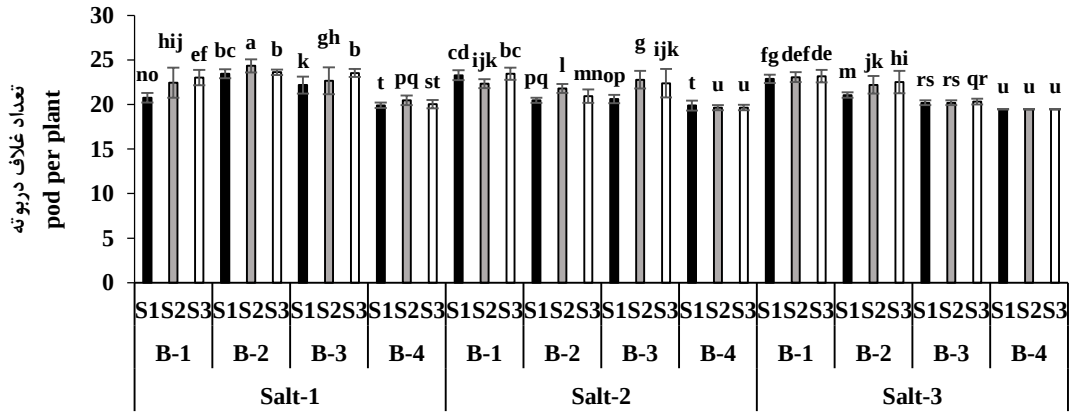
Table 5. Variance analysis of the effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on yield and yield components in beans

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	Mean Square میانگین مربعات			
			تعداد غلاف در بوته Pod per plant	تعداد دانه در غلاف Seed per pod	وزن صد دانه 100-seed weight	عملکرد دانه Seed yield
Year (Y.)	سال	1	597.1 **	13.56 **	568.6 **	701.3 *
Block (BY)	بلوک (سال)	6	8.494 ns	0.109 ns	22.15 ns	82.79 ns
Salt	شوری	2	27.86 *	0.274 ns	20.53 *	155.3 *
Biochar (B.)	بیوچار	3	120.3 **	1.355 *	187.9 *	711.9 **
Salicylic acid (S.)	سالیسیلیک اسید	2	13.01 *	0.299 *	69.73 *	222.9 **
Salt × B	شوری × بیوچار	6	23.32 **	0.325 **	44.44 **	195.6 *
Salt × S	شوری × سالیسیلیک اسید	4	0.889 **	0.004 ns	0.282 *	4.896 *
B × S	بیوچار × سالیسیلیک اسید	6	2.659 **	0.046 **	17.82 **	43.93 *
Salt × B × S	شوری × بیوچار × سالیسیلیک اسید	12	2.815 **	0.039 **	8.585 **	25.86 **
Y × S	سال × شوری	2	0.44 ns	0.022 ns	1.088 ns	6.39 ns
Y × B	سال × بیوچار	3	1.861 ns	0.051 *	11.138 ns	23.21 *
Y × S	سال × سالیسیلیک اسید	2	0.314 ns	0.004 ns	4.129 ns	0.02 ns
Y × Salt × B	سال × شوری × بیوچار	6	0.381 **	0.008 ns	2.298 ns	4.249 *
Y × Salt × S	سال × شوری × سالیسیلیک اسید	4	0.013 ns	0.003 ns	0.039 ns	0.326 ns
Y × B ×S	سال × بیوچار × سالیسیلیک اسید	6	0.045 ns	0.004 ns	1.946 ns	1.107 ns
Y × Salt × B × S	سال × شوری × بیوچار × سالیسیلیک اسید	12	0.043 ns	0.003 ns	1.071 ns	0.967 ns
Error	خطای کل	210	0.301 ns	0.004 ns	0.887 ns	2.777 ns
C. V (%)	ضریب تغییرات (درصد)		*2.54*	*1.59*	*3.63*	*7.291*

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

مقایسه میانگین داده‌های دو سال نشان داد که بالاترین تعداد غلاف در بوته (۲۴/۳ عدد) از ترکیب تیماری کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با مصرف بیوچار اولیه ۲/۵٪ وزنی در خاک در شرایط عدم شوری خاک به دست آمد. ترکیبات تیماری کاربرد یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید با همین سطح از بیوچار و یا بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید با اختلاف معنی‌داری در گروه آماری بعدی قرار داشتند. علی‌رغم کاربرد بیوچار و سطوح مختلف از سالیسیلیک اسید، کمترین میزان این صفت در شرایط شوری خاک بالا (سطح ۸ دسی زیمنس بر متر) مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۴. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میانگین تعداد غلاف در بوته در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 4. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on number of pods per plant means in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

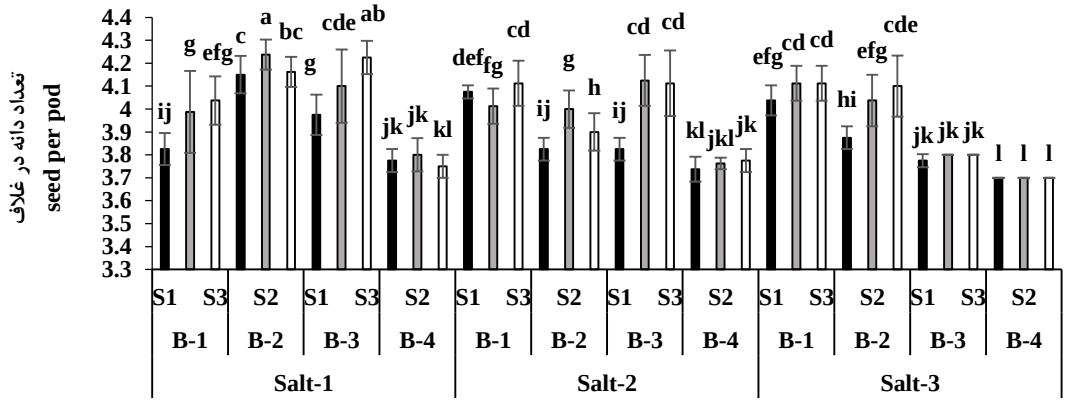
مقایسه میانگین اثر شوری در بیوچار به‌صورت جداگانه در دو سال آزمایش نشان داد که بیشترین تعداد غلاف در بوته در سال اول و دوم در تیمار ترکیبی مصرف بیوچار اولیه ۲/۵ درصد وزنی در خاک در شرایط عدم شوری خاک به دست آمد (به ترتیب با ۲۲ و ۲۵/۵ غلاف در بوته). کمترین میزان این صفت نیز در هر دو سال آزمایش در شرایط شوری بالای خاک (۸ دسی زیمنس بر متر) مشاهده شد (جدول ۶).

نتایج نشان داد که کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید و بیوچار در شرایط عدم شوری یا شوری متوسط تأثیر مثبت و معنی‌دار در افزایش تعداد غلاف در بوته داشت، اما اثر سالیسیلیک اسید به هنگام کاربرد بیوچار تغییریافته با فسفریک اسید و سولفوریک اسید در شوری بالای خاک غیر معنی‌دار شد. نتایج نشان داد که کاربرد سطوح مختلف بیوچار در شرایط شوری شدید نه‌تنها به بهبود وضعیت این صفت منجر نشد، بلکه موجب کاهش این صفت نسبت به عدم کاربرد بیوچار شد. بااین‌حال کاربرد بیوچار بالأخص بیوچار اولیه در شرایط عدم شوری و یا شوری متوسط تأثیر مثبت در افزایش تعداد غلاف در بوته داشت.

تعداد دانه در غلاف

نتایج تجزیه واریانس بیانگر تأثیر مثبت اثرات ساده سال، بیوچار و سالیسیلیک اسید هر سه در سطح احتمال پنج درصد روی تعداد دانه در غلاف بود. همچنین اثرات دوجانبه شوری در بیوچار و بیوچار در سالیسیلیک اسید هر دو در سطح احتمال یک درصد و سال در بیوچار در سطح پنج درصد و نیز برهمکنش سه‌جانبه شوری، بیوچار و سالیسیلیک اسید در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار روی این صفت نشان داد (جدول ۵).

بر اساس مقایسه میانگین‌ها، کاربرد سالیسیلیک اسید در میزان ۰/۵ میلی‌مولار توأم با بیوچار اولیه در شرایط عدم شوری بالاترین تعداد دانه در غلاف را موجب شد (۴/۲۴ عدد) و به دنبال آن ترکیب تیماری یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید با بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید در شرایط عدم شوری قرار گرفت (۴/۲۳ دانه در غلاف). کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید در سطوح مختلف از سالیسیلیک اسید در شرایط شوری بالای خاک (۸ دسی زیمنس بر متر) نیز کمترین مقدار این صفت را موجب شدند (شکل ۵).



شکل ۵. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میانگین تعداد دانه در غلاف در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 5. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on number of seeds per pod in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

مطابق نتایج در کلیه ترکیبات تیماری، کاربرد بیوچار تغییریافته با سولفوریک اسید کمترین تعداد دانه در غلاف لوبیا را موجب شد. بااین‌حال در شرایط شوری بالای خاک، کاربرد سالیسیلیک اسید بالأخص توأم با کاربرد بیوچار اولیه و حتی عدم مصرف بیوچار موجب بهبود دانه در غلاف گردید.

وزن صد دانه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر سال بر وزن صد دانه به لحاظ آماری در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار داشت، همچنین سایر اثرات اصلی فاکتورهای آزمایشی یعنی شوری، بیوچار و سالیسیلیک اسید نیز بر روی این صفت در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل دوجانبه شوری در بیوچار در سطح احتمال پنج درصد، شوری در سالیسیلیک اسید در سطح پنج درصد و بیوچار در سالیسیلیک اسید در سطح احتمال یک درصد و سه‌جانبه شوری، بیوچار و سالیسیلیک اسید در سطح احتمال یک درصد بر وزن صد دانه به لحاظ آماری معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین داده‌های دوساله نشان داد که در بین ترکیبات تیماری، کاربرد یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید همراه با مصرف بیوچار تغییریافته با فسفریک اسید در شرایط عدم شوری و شوری متوسط به ترتیب با ۳۱/۱ و ۳۰/۲

جدول ۶. مقایسه میانگین برهمکنش شوری خاک در بیوچار بر تعداد غلاف در بوته در دو سال آزمایش.

Table6. Mean comparison of soil salt and Biochar interaction on pod number per plant at two years studied

شوری خاک	بیوچار	سال اول	سال دوم
Soil salt	**Biochar**	**First year**	**Second year**
Salt-1	**B-1**	20.4 ± 0.91 ^{c}	23.5 ± 1.15 ^{c}
	B-2	22.0 ± 0.88 ^{a}	25.5 ± 0.58 ^{a}
	B-3	21.1 ± 0.60 ^{b}	24.4 ± 1.08 ^{b}
	B-4	18.8 ± 0.44 ^{ef}	21.3 ± 0.50 ^{ef}
Salt-2	**B-1**	21.4 ± 0.58 ^{b}	24.6 ± 0.66 ^{b}
	B-2	19.6 ± 0.81 ^{d}	22.4 ± 0.58 ^{d}
	B-3	20.4 ± 0.86 ^{c}	23.4 ± 1.14 ^{c}
	B-4	18.5 ± 0.66 ^{fg}	20.9 ± 0.43 ^{fg}
Salt-3	**B-1**	20.4 ± 0.38 ^{b}	23.4 ± 0.95 ^{b}
	B-2	21.4 ± 0.41 ^{c}	24.6 ± 0.64 ^{c}
	B-3	18.9 ± 0.46 ^{e}	21.5 ± 0.32 ^{e}
	B-4	18.3 ± 0.43 ^{g}	20.6 ± 0.47 ^{g}

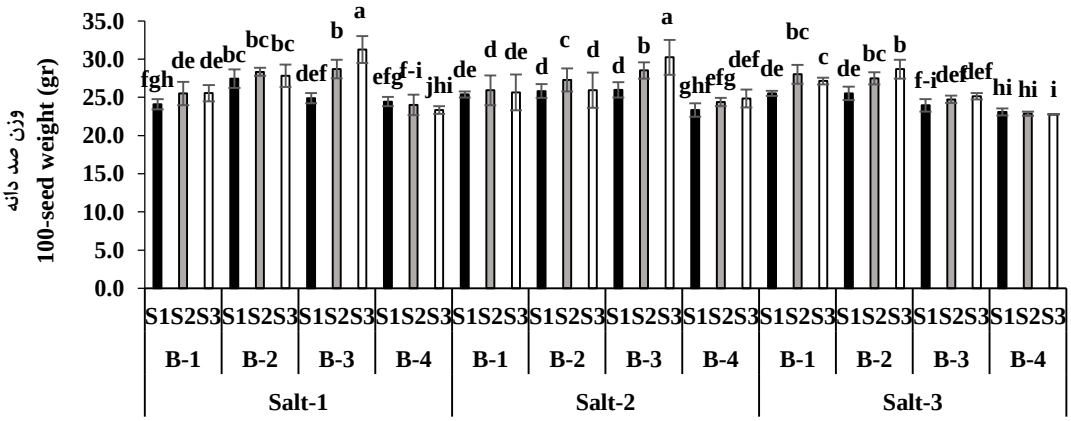
میانگین های دارای حرف مشترک عدم اختلاف معنی دار با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می باشند.

Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر ؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

The means have a common letter of no significant difference with Dankan test at 5% level.

SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

گرم، بالاترین وزن صد دانه در لوبیا را موجب شدند. کمترین وزن صد دانه نیز متعلق به ترکیب تیماری یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با مصرف بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید در شرایط شوری بالای خاک (۸ دسی زیمنس بر متر) بود (شکل ۶). نتایج نشان داد که کاربرد سالیسیلیک اسید تأثیر مثبت بر وزن صد دانه در لوبیا داشت، بااین‌حال در شرایط شوری بالای خاک و مصرف بیوچار بالأخص بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک و سولفوریک اسید اثر سالیسیلیک نیز خنثی گردید.



شکل ۶. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میانگین وزن صد دانه در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 6. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on 100-seed weight in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

عملکرد دانه

در خصوص عملکرد دانه، اثر سال و شوری در سطح احتمال پنج درصد و اثر ساده بیوچار و سالیسیلیک اسید در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین اثر متقابل دوجانبه شوری در بیوچار و بیوچار در سالیسیلیک اسید در سطح احتمال یک درصد و شوری در سالیسیلیک اسید و سال در بیوچار در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌دار بر روی این صفت نشان دادند. برهمکنش سه‌جانبه شوری در بیوچار در سالیسیلیک اسید و سال در شوری در بیوچار نیز هر دو در سطح احتمال یک درصد تأثیر معنی‌دار بر عملکرد دانه در لوبیا نشان دادند (جدول ۵).

بر اساس مقایسه میانگین داده‌های دوساله، مصرف یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با کاربرد بیوچار به شکل اصلاح‌شده فسفریک اسید در شرایط عدم شوری بالاترین عملکرد دانه در بوته لوبیا را موجب شد (۳۲/۱ گرم در بوته). همچنین سالیسیلیک اسید ۰/۵ میلی‌مولار به همراه بیوچار اولیه در شرایط عدم شوری، با اختلاف معنی‌دار آماری به دنبال ترکیب تیماری برتر قرار گرفت (۳۰/۲ گرم در بوته). کمترین عملکرد دانه نیز متعلق به ترکیبات تیماری سطوح مختلف سالیسیلیک اسید با بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک بالأخص سولفوریک اسید، تحت شوری بالای خاک (۸ دسی زیمنس بر متر) بود (شکل ۷).

طبق پژوهش‌های انجام‌شده، برخی مواد ازجمله سالیسیلیک اسید تأثیر مثبت در نمو گیاهان داشته (Yazdanpanah et al., 2015; Kheirkhah et al., 2016; Ijaz et al., 2019)، هرچند اثر مصرف خارجی آن به غلظت و گونه‌های گیاهی بستگی تام دارد (Jayakanan et al., 2015). گیاه لوبیا نیز از این قاعده مستثنا نبود،

به‌طوری‌که در آزمایش اژدر افشاری و همکاران نتیجه‌گیری شد که کاربرد سطوح مشخصی از سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک محافظ می‌تواند باعث کاهش خسارت ناشی از شرایط تنش‌زا در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی گردد (Azder Afshari et al., 2016) و اثر آن در بهبود اجزای عملکرد و عملکرد دانه لوبیا نسبت به تیمار شاهد کاملاً مشهود بوده است. نتایج مشابه دیگری نیز در این زمینه گزارش شده است (Sepehri et al., 2016). بیوچار با کاهش آسیب‌های ناشی از تنش شوری، موجب افزایش عملکرد دانه در ذرت شد (Kazemi et al., 2019). رضایی و همکاران گزارش دادند علی‌رغم اینکه خود بیوچار به‌واسطه شور بودن سبب افزایش شوری خاک و سایر ویژگی‌های شیمیایی خاک می‌گردد، بااین‌حال افزایش بیوچار به بیش از ۲۵ مگاگرم در هکتار تا حدودی شدت اثرات منفی ناشی از افزایش شوری را کاهش می‌دهد. گزارش شده است اگرچه شوری با اختلال در میزان جذب پتاسیم و کاهش نسبت پتاسیم به سدیم گیاه سبب کاهش صفات رشدی در گیاه می‌گردد، اما بیوچار با جذب یون‌های نمک سبب بهبود صفات رشدی و درنهایت بهبود عملکرد در گیاه می‌شود (Hejazi Zadeh et al., 2016; Mehdizadeh et al., 2019).

جدول ۷. مقایسه میانگین برهمکنش شوری خاک در بیوچار بر عملکرد دانه در دو سال آزمایش

Table7. Mean comparison of soil salt and Biochar interaction on seed yield at two years studied

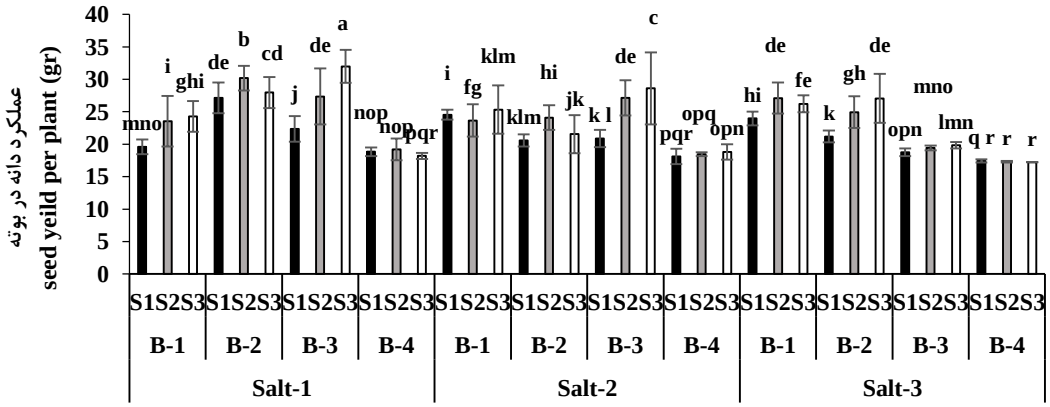
شوری خاک Soil salt	بیوچار Biochar	۱۴۰۱ 2022	۱۴۰۲ 2023
Salt-1	B-1	20.3 ± 1.97 f	24.5 ± 2.95 ef
	B-2	25.8± 2.42 a	31.0± 2.33 a
	B-3	25.6± 1.89 a	28.8± 3.28 b
	B-4	19.8 ± 1.03 gh	17.6± 2.12 g
Salt-2	B-1	22.0± 1.81 de	27.0± 2.42 cd
	B-2	20.9± 2.54 ef	23.1± 1.88 f
	B-3	24.3± 2.59 b	26.7± 3.51 cd
	B-4	19.3± 0.92 gh	17.6± 2.35 gh
Salt-3	B-1	18.3± 1.69 bc	20.3± 1.87 bc
	B-2	23.5± 0.41 cd	24.6 ± 0.64 de
	B-3	18.9 ± 0.46 g	21.5 ± 0.32 g
	B-4	18.3 ± 0.43 h	20.6 ± 0.47 h

میانگین های دارای حرف مشترک عدم اختلاف معنی دار با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می باشند.

B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید؛ Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر

The means have a common letter of no significant difference with Dankan test at 5% level.

B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.



شکل ۷. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میانگین عملکرد دانه در دو سال آزمایش. S1 Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 7. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on seed yield in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

تعداد گره در ریشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در بین فاکتورهای آزمایش، اثر اصلی بیوچار در سطح احتمال پنج درصد روی تعداد گره در ریشه معنی‌دار بود. در بین اثرات متقابل دوجانبه، برهمکنش شوری در بیوچار، شوری در سالیسیلیک اسید، بیوچار در سالیسیلیک اسید هر سه در سطح احتمال یک درصد و همچنین سال در بیوچار در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌دار روی این صفت نشان دادند. اثر سه‌جانبه شوری در بیوچار در سالیسیلیک اسید نیز در سطح احتمال یک درصد به لحاظ آماری تأثیر معنی‌دار روی تعداد گره در ریشه داشت (جدول ۸).

جدول ۸. تجزیه واریانس اثر شوری خاک، بیوچار و اسید سالیسیلیک بر صفات ریشه در لوبیا

Table 8. Variance analysis of the effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on root characteristics in beans

			Mean Square			میانگین مربعات	
S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	تعداد گره در ریشه Node per root	وزن گره Node weight	طول ریشه Root length	حجم ریشه root Volume	وزن خشک ریشه Root dry weight
Year (Y.)	سال	1	4.807 ^{ns}	0.0032 ^{ns}	6.591 ^{ns}	0.126 ^{ns}	0.0107 ^{ns}
Block (BY)	بلوک (سال)	6	11.933 ^{ns}	0.0153 ^{ns}	8.089 ^{ns}	0.139 ^{ns}	0.0053 ^{ns}
Salt	شوری	2	0.151 ^{ns}	0.0045 ^{ns}	1.804 *	0.205 ^{ns}	0.0069 ^{ns}
Biochar (B.)	بیوچار	3	280.5 *	0.2604 *	16.79 *	0.654 *	0.0112 *
Salicylic acid (S.)	سالیسیلیک اسید	2	10.686 ^{ns}	0.0109 ^{ns}	37.53 ^{ns}	0.1889 ^{ns}	0.0438 ^{ns}
Salt × B	شوری × بیوچار	6	301.9 **	0.2601 **	18.29 *	1.442 *	0.0247 **
Salt × S	شوری × سالیسیلیک اسید	4	10.30 **	0.0182 *	0.318 *	0.274 *	0.0003 ^{ns}
B × S	بیوچار × سالیسیلیک اسید	6	31.96 **	0.0349 **	2.536 **	0.377 *	0.0013 ^{ns}
Salt × B × S	شوری × بیوچار × سالیسیلیک اسید	12	4.519 **	0.0089 **	1.006 **	0.108 **	0.0014 *
Y × S	سال × شوری	2	0.626 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.021 ^{ns}	0.013 ^{ns}	0.0007 ^{ns}
Y × B	سال × بیوچار	3	17.87 *	0.0169 ^{ns}	1.195 ^{ns}	0.059 ^{ns}	0.0009 ^{ns}
Y × S	سال × سالیسیلیک اسید	2	1.414 ^{ns}	0.0016 ^{ns}	4.529 **	0.022 ^{ns}	0.0067 *
Y × Salt × B	سال × شوری × بیوچار	6	3.402 ^{ns}	0.0033 ^{ns}	0.258 **	0.009 ^{ns}	0.0012 ^{ns}
Y × Salt × S	سال × شوری × سالیسیلیک اسید	4	0.57 ^{ns}	0.0016 ^{ns}	0.029 ^{ns}	0.027 ^{ns}	0.0004 ^{ns}
Y × B ×S	سال × بیوچار × سالیسیلیک اسید	6	1.033 ^{ns}	0.0009 ^{ns}	0.168 ^{ns}	0.045 *	0.0005 ^{ns}
Y × Salt × B × S	سال × شوری × بیوچار × سالیسیلیک اسید	12	0.98 ^{ns}	0.0013 ^{ns}	0.066 ^{ns}	0.012 ^{ns}	0.0004 ^{ns}
Error	خطای کل	210	1.029 ^{ns}	0.00143 ^{ns}	0.536 ^{ns}	0.02824 ^{ns}	0.0009 ^{ns}
C. V (%)	ضریب تغییرات (درصد)		*17.955*	*25.49*	*11.92*	*18.925*	*19.331*

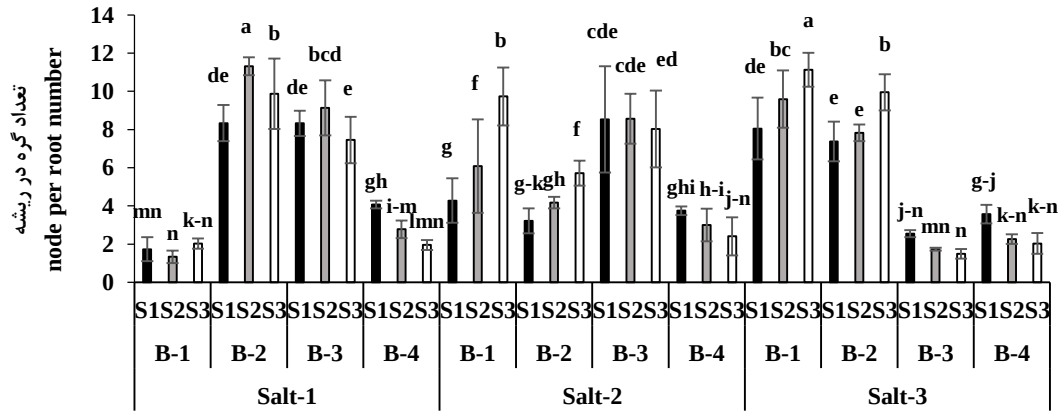
ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and **: non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectivel

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بالاترین تعداد گره در ریشه متعلق به ترکیب تیماری کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید توأم با مصرف بیوچار اولیه در شرایط عدم اعمال تنش شوری در خاک بود (شکل ۸)، همچنین سطح یک میلی‌مولار از سالیسیلیک اسید در برخی ترکیبات تیماری ازجمله بیوچار اولیه در شرایط عدم تنش شوری، بدون بیوچار در شرایط شوری ۴ دسی زیمنس بر مترو حتی عدم بیوچار و یا مصرف بیوچار اولیه در شرایط تنش شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر موجب افزایش معنی‌دار تعداد گره در ریشه نسبت به تیمار شاهد شد. مقایسه میانگین برهمکنش سال در بیوچار نشان داد که بیوچار اولیه در سال اول آزمایش بالاترین تعداد گره در ریشه (۷ عدد) را موجب شد و به دنبال آن کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید قرار داشت و بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید موجب کاهش این صفت نسبت به تیمار شاهد شد. در سال دوم آزمایش بیوچار اولیه بالاترین گره در ریشه (۸/۱) را داشت. به دنبال تیمار برتر، تیمار شاهد

با ۶/۶ گره در ریشه قرار داشت و کاربرد سایر سطوح از بیوچار بالأخص بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید کمترین میزان این صفت (۲/۴ گره در ریشه) را موجب شد (جدول ۹).

اگرچه کاربرد سالیسیلیک اسید به‌تنهایی و یا با مصرف بیوچار اولیه در شرایط شوری بالا، موجب افزایش تعداد گره در ریشه شد، اما مصرف آن توأم با بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید نتایج منفی در سطوح مختلف شوری بر روی این صفت نشان داد.



شکل ۸. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میانگین تعداد گره در ریشه در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 8. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on the number of nodules per root in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر بیوچار بر تعداد گره در ریشه لوبیا در دو سال آزمایش

Table 9. Mean comparison of biocharon node number per root at two years studied

Year سال	first اول				second دوم			
بیوچار Biochar	شاهد control	۲/۵٪ وزنی 2.5% simple	۱/۲۵٪ فسفریک اسید 1.25% H_3Po_4	۱/۲۵٪ سولفوریک اسید 1.25% H_2So_4	شاهد control	۲/۵٪ وزنی 2.5% simple	۱/۲۵٪ فسفریک اسید 1.25% H_3Po_4	۱/۲۵٪ سولفوریک اسید 1.25% H_2So_4
گره در ریشه node per root	5.4±0.46^{c}	7.0±1.52^{a}	6.3±1.16^{b}	3.3±0.65^{d}	6.6±1.23^{b}	8.1±2.16^{a}	6.1±1.17^{b}	2.4±2.5^{c}

میانگین های دارای حرف مشترک عدم اختلاف معنی دار با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می باشند.

The means have a common letter of no significant difference with Dankan test at 5% level.

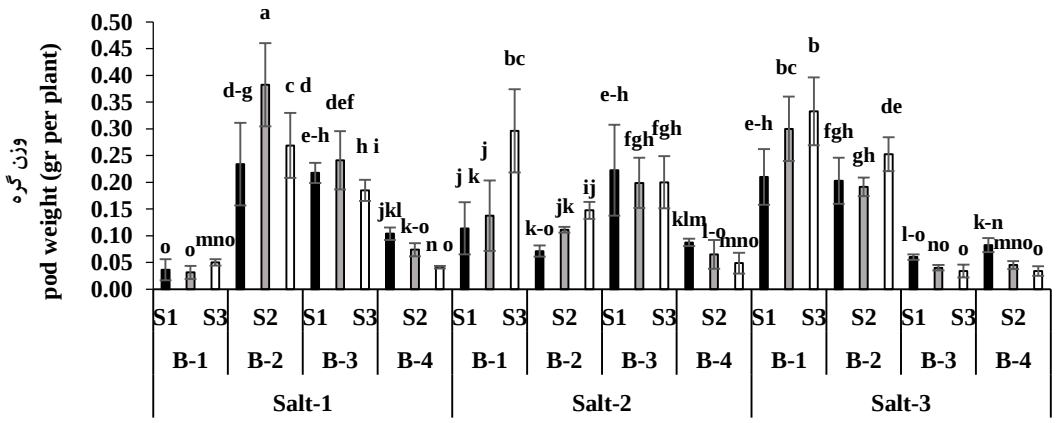
در تحقیقی مشخص گردید که محلول‌پاشی گیاهان با سالیسیلیک اسید موجب افزایش ارتفاع، سطح برگ، حجم، سطح، قطر و وزن و طول ریشه و وزن اندام هوایی در گیاه دارویی سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) در شرایط عادی و تنش گردید. نتیجه‌گیری شد که گیاهان در شرایط تنش برای جذب بیشتر آب، مواد فتوسنتزی را به نسبت بیشتری به ریشه انتقال داده و موجب بهبود خصوصیات ریشه (طول، سطح، حجم و وزن) می‌گردد، علاوه بر این محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی تا حدود زیادی اثرات مضر تنش بر گیاه را کاهش و موجب بهبود اندام‌های هوایی و ریشه می‌گردد (Darvizheh et al., 2018). گزارش شده است که اثر تیمار بیوچار بر صفات

مختلف رویشی ازجمله وزن تر و خشک گیاه، وزن خشک ریشه، ارتفاع بوته معنی‌دار بود، اما روی تعداد برگ اثر معنی‌دار نداشت؛ و بالاترین مقادیر از این صفات در مطالعه‌ای اثر سطوح مختلف بیوچار تأثیر معنی‌دار بر اندام‌های زیرزمینی دو گونه علف پشمکی و یونجه نشان داد، به‌طوری‌که زیست‌توده زیرزمینی، حجم و طول ریشه در هر دو گونه موردبررسی تحت تأثیر بیوچار افزایش معنی‌دار پیدا کرد و افزایش غلظت بیوچار باعث کاهش معنی‌دار دو پارامتر مذکور شد (Abbasnasab et al., 2021). یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد وجود مکان‌های قابل‌تبادل روی سطح بیوچار و آزاد شدن عناصر از بیوچار می‌تواند یکی از مکانیسم‌های ممکن به‌منظور بهبود جذب عناصر غذایی توسط ریشه گیاه باشد که این امر ضمن بهبود رشد طولی و حجمی ریشه، با تحریک رشد میکروارگانیسم‌های مفید می‌تواند موجب افزایش دسترسی عناصر غذایی گردد (Vaccari et al., 2015). در مطالعه‌ای کاربرد بیوچار با کاهش اثرات نامطلوب تنش عناصر سنگین در خاک موجب افزایش وزن خشک ریشه در گیاه ذرت گردید (Biria et al., 2017).

وزن گره ریشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده بیوچار در سطح احتمال پنج درصد روی صفت وزن گره ریشه معنی‌دار شد، همچنین اثرات متقابل دوجانبه شوری در بیوچار در سطح احتمال یک درصد، شوری در سالیسیلیک اسید در سطح احتمال پنج درصد و بیوچار در سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و نیز اثرات سه‌جانبه این فاکتورها در سطح احتمال یک درصد روی وزن گره ریشه به لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۸).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید به همراه بیوچار اولیه با ۲/۵ درصد وزنی خاک بالاترین وزن گره ریشه (۰/۳۸ گرم) را در شرایط عدم تنش شوری خاک موجب شد، درحالی‌که کمترین وزن گره ریشه علی‌رغم کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک و سولفوریک اسید و سطوح مختلف سالیسیلیک اسید در شرایط شوری بالای خاک (۸ دسی زیمنس بر متر) به دست آمد (شکل ۹).



شکل ۹. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر میانگین وزن گره در دو سال آزمایش. Salt-1 S1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید.

Fig. 9 nteraction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on the nodule weight in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

جدول ۱۰. مقایسه میانگین برهمکنش شوری خاک در بیوچار بر طول ریشه در دو سال آزمایش

Table10. Mean comparison of soil salt and Biochar interaction on root length at two years studied

شوری خاک Soil salt	بیوچار Biochar	سال اول First year	سال دوم Second year
Salt-1	B-1	5.2 ± 0.41 de	5.6 ± 0.73 def
	B-2	7.1 ± 0.48 a	7.7 ± 1.17 a
	B-3	6.4 ± 0.58 bc	6.6 ± 1.35 bc
	B-4	5.3 ± 0.69 de	5.3 ± 0.60 ef
Salt-2	B-1	6.4 ± 0.70 bc	7.1 ± 1.36 ab
	B-2	5.6 ± 0.92 d	6.0 ± 1.03 cde
	B-3	6.1 ± 0.73 c	6.1 ± 0.89 cde
	B-4	6.0 ± 0.66 c	6.3 ± 0.53 bcd
Salt-3	B-1	6.7 ± 0.47 bc	7.6 ± 1.29 bc
	B-2	6.4 ± 0.45 ab	6.0 ± 0.93 a
	B-3	5.0 ± 0.55 e	6.5 ± 1.03 f
	B-4	5.1 ± 0.58 e	5.2 ± 0.79 f

میانگین های دارای حرف مشترک عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می باشند.

Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید؛ Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر

The means have a common letter of no significant difference with Dankan test at 5% level.

SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1} and B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

کمترین وزن گره در ریشه در شرایط مختلف شوری خاک با مصرف یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید به همراه کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید مشاهده گردید. کاهش وزن گره در این ترکیبات تیماری، ناشی از کاهش تعداد گره در این ترکیبات بود.

طول ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از تأثیر معنی‌دار اثر ساده شوری و بیوچار هر دو، در سطح احتمال پنج درصد روی طول ریشه در لوبیا بود. اثرات متقابل دوجانبه شوری در بیوچار و شوری در سالیسیلیک اسید در سطح پنج درصد و سال در سالیسیلیک اسید در سطح یک درصد و همچنین برهمکنش سه‌جانبه شوری در بیوچار در سالیسیلیک در سطح احتمال یک درصد و سال در شوری در بیوچار در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌دار روی این صفت نشان دادند (جدول ۸).

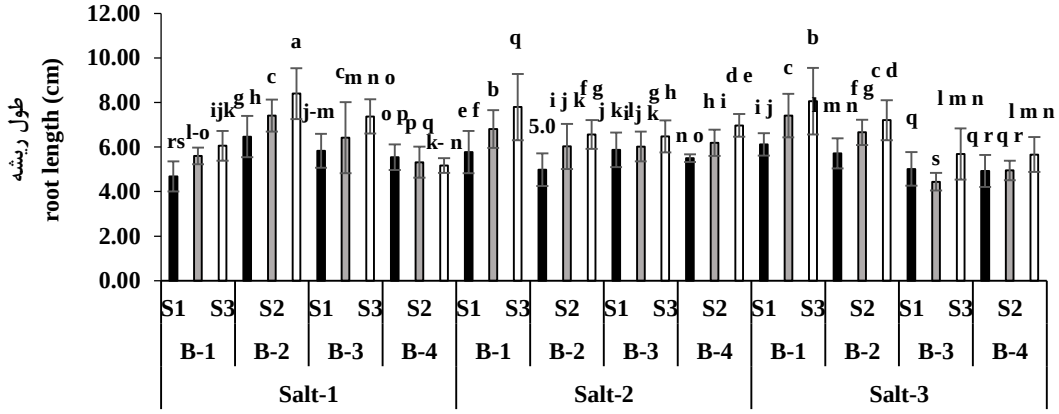
مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید به همراه بیوچار اولیه در شرایط عدم تنش شوری خاک بالاترین طول ریشه در لوبیا را موجب شد (۸/۴ سانتی‌متر). همچنین کاربرد سالیسیلیک اسید در بالاترین سطح (یک میلی‌مولار) در سطوح شوری متوسط و بالا نیز بدون اعمال بیوچار دارای طول ریشه بالاتری نسبت به سایر ترکیبات تیماری بود. کمترین طول ریشه (۴/۴ سانتی‌متر) نیز در شرایط تنش شوری بالا با کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید در شرایط عدم کاربرد سالیسیلیک اسید مشاهده شد. در این آزمایش طول ریشه در تیمار شاهد برابر ۴/۷ سانتی‌متر بود (شکل ۱۰).

مقایسه میانگین اثر متقابل شوری در بیوچار در سال اول آزمایش نشان داد که مصرف بیوچار اولیه در شرایط عدم شوری خاک، بالاترین طول ریشه را موجب شد (۷/۱ سانتی‌متر) و کمترین میزان این صفت (۵/۰ سانتی‌متر) نیز متعلق به تیمار کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید در شرایط تنش شوری ۸ دسی زیمنس بود. با مصرف سالیسیلیک اسید به میزان یک میلی‌مولار در سال اول و دوم آزمایش، بالاترین طول ریشه در لوبیا را شاهد بودیم، هرچند این افزایش در سال دوم نسبت به سال اول کاملاً مشهود بود (جدول ۱۰).

حجم ریشه

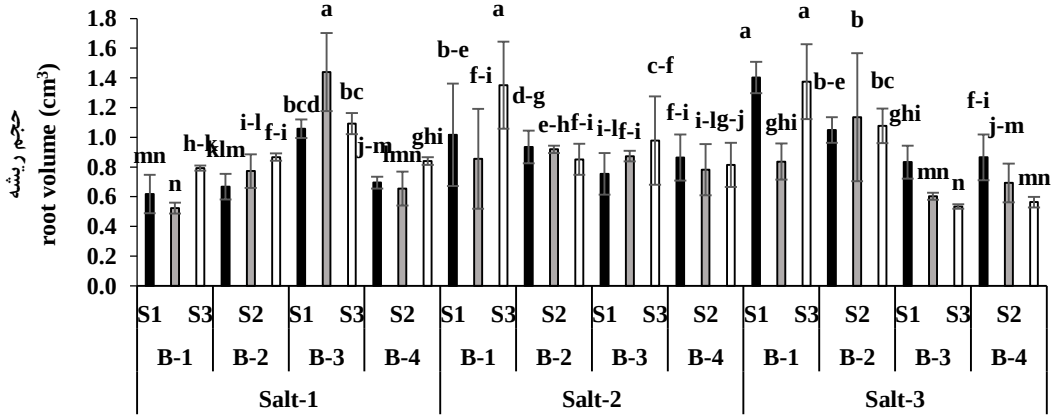
بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر بیوچار بر حجم ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد، همچنین برهمکنش شوری در بیوچار، شوری در سالیسیلیک اسید و بیوچار در سالیسیلیک اسید نیز، در سطح احتمال یک درصد روی این صفت معنی‌دار بود. در بین اثرات سه‌جانبه فاکتورهای آزمایش، برهمکنش شوری در بیوچار در سالیسیلیک اسید و سال در بیوچار در سالیسیلیک اسید نیز تأثیر معنی‌دار، به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد روی حجم ریشه نشان داد (جدول ۸).

مطابق با مقایسه میانگین داده‌ها، ترکیبات تیماری ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید با بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید در عدم شوری خاک، یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید بدون بیوچار در شوری متوسط و صفر و یک میلی‌مولار سالیسیلیک در شوری بالا، ترکیبات تیماری برتر ازنظر حجم ریشه بودند (به ترتیب با ۱/۴۴، ۱/۳۵ و ۱/۴۰ سانتی‌متر مکعب). (شکل ۱۱).



شکل ۱۰. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر طول ریشه در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 10. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on root length in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively



شکل ۱۱. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر حجم ریشه در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 11. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on root volume in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

مقایسه میانگین شوری در بیوچار به‌طور جداگانه در دو سال آزمایش نشان داد که در سال اول آزمایش، بالاترین حجم ریشه (۱/۰۶ سانتی‌متر مکعب) با کاربرد بیوچار تغییریافته با فسفریک اسید توأم با مصرف یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید به دست آمد. کمترین میزان نیز متعلق به کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک و سولفوریک اسید (بدون اختلاف معنی‌دار آماری) توأم با کاربرد سالیسیلیک اسید در سطوح ۰/۵ و یک میلی‌مولار بود. در سال دوم

آزمایش کاربرد بیوچار اصلاح‌شده فسفریک اسید با ۱/۲۸ سانتی‌متر مکعب حجم ریشه، همراه با کاربرد یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، برترین ترکیب تیماری بود، درحالی‌که کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید همراه با مصرف ۰/۵ و یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید کمترین میزان این صفت (به ترتیب با ۰/۶۹ و ۰/۷۵ سانتی‌متر مکعب) را موجب شدند (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. مقایسه میانگین برهمکنش شوری خاک در بیوچار بر حجم ریشه در دو سال آزمایش

Table 11. Mean comparison of soil salt and Biochar interaction on root volume at two years studied

بیوچار Biochar	سالیسیلیک اسید Salicylic acid	سال اول First year	سال دوم Second year
Bio-1	S-1	0.91 ± 0.12^{b}	1.10 ± 0.27^{b}
	S-2	0.76 ± 0.11^{cd}	0.71 ± 0.22^{ef}
	S-3	1.06 ± 0.14 ^{a}	1.28 ± 0.23^{a}
Bio-2	S-1	0.87 ± 0.07 ^{b}	0.89 ± 0.12^{cde}
	S-2	0.91 ± 0.13 ^{b}	0.97 ± 0.25 ^{bc}
	S-3	0.90 ± 0.07 ^{c}	0.95 ± 0.10 ^{bcd}
Bio-3	S-1	0.88 ± 0.08 ^{c}	0.87 ± 0.13 $^{c-f}$
	S-2	0.93 ± 0.09 ^{c}	1.0 ± 0.13 ^{bc}
	S-3	0.86 ± 0.10 ^{c}	0.86 ± 0.16 $^{c-f}$
Bio-4	S-1	0.84 ± 0.09 ^{bc}	0.77 ± 0.13 ^{def}
	S-2	0.72 ± 0.10 ^{d}	0.69 ± 0.17 ^{f}
	S-3	0.72 ± 0.07 ^{d}	0.75 ± 0.07 ^{ef}

میانگین های دارای حرف مشترک عدم اختلاف معنی دار با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد می باشند.

SA1: بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید

The means have a common letter of no significant difference with Dankan test at 5% level.

SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively.

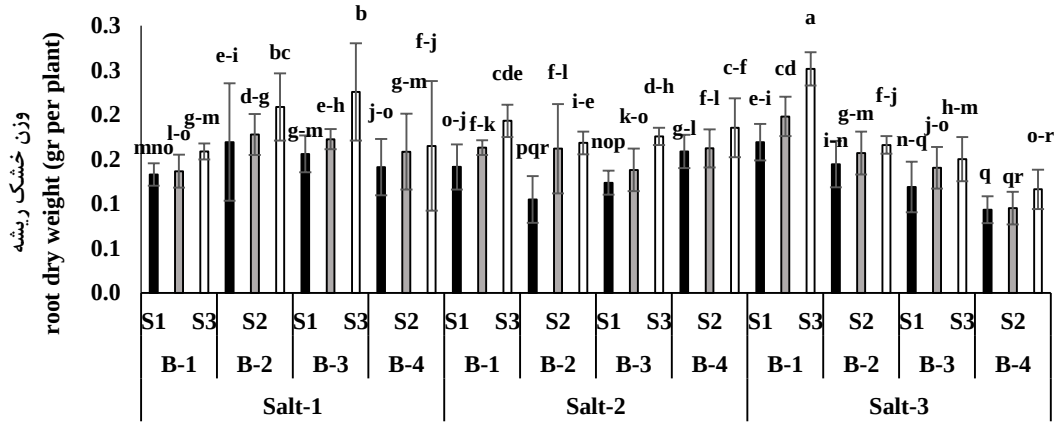
وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از تأثیر معنی‌دار اثر ساده بیوچار در سطح احتمال پنج درصد، روی وزن خشک ریشه لوبیا بود. اثرات متقابل دوجانبه شوری در بیوچار در سطح یک درصد و سال در سالیسیلیک در سطح پنج درصد و همچنین برهمکنش سه‌جانبه شوری در بیوچار در سالیسیلیک اسید در سطح احتمال پنج درصد تأثیر معنی‌دار روی این صفت نشان داد (جدول ۷).

مقایسه میانگین صورت گرفته نشان داد که کاربرد سالیسیلیک اسید در مقدار یک میلی‌مولار بدون کاربرد بیوچار و تحت شرایط شوری شدید، بالاترین وزن خشک ریشه را موجب شد. کمترین میزان این صفت نیز بدون کاربرد سالیسیلیک اسید به همراه بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید در شوری خاک بالا (۸ دسی زیمنس بر متر) به دست آمد. مقایسه میانگین اثر ساده سالیسیلیک اسید به‌طور جداگانه در سال‌های آزمایش نشان داد که در سال اول، مصرف ۱ میلی مولار سالیسیلیک اسید بیشترین وزن خشک و عدم مصرف آن، کمترین میزان وزن خشک ریشه را موجب شد (به ترتیب با ۰/۱۷ و ۰/۱۴ گرم در بوته). در سال دوم آزمایش عدم کاربرد سالیسیلیک اسید کمترین (۰/۱۴ گرم در بوته) و مصرف سطح یک میلی‌مولار از آن بالاترین وزن خشک ریشه (۰/۱۹ گرم در بوته) را موجب شد (شکل ۱۲).

نتایج نشان داد که با افزایش تنش شوری خاک طول ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، هرچند کاربرد بیوچار بالأخص بیوچار اولیه باعث بهبود آن در شرایط مطلوب و تنش شوری خاک شد. نتایج آزمایش نشان داد که وزن خشک ریشه با کاربرد سالیسیلیک اسید و بیوچار اولیه افزایش نشان داد. افزایش وزن خشک ریشه در شوری سطح متوسط و حتی شوری بالا با کاربرد سالیسیلیک اسید و بیوچار اولیه نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود که حاکی از اثر مثبت این تیمارها در بهبود وضعیت ریشه در شرایط شوری خاک داشت، بااین‌حال در شرایط شوری بالا کاربرد بیوچار به شکل اصلاح‌شده با فسفریک و سولفوریک اسید نسبت به حالت بیوچار اولیه اثر کمتر و حتی منفی در سطوح مختلف سالیسیلیک اسید بر وزن خشک ریشه در لوبیا نشان داد. در تحقیقی، رشد ریشه، اندام هوایی و ارتفاع گیاه چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) تحت تأثیر سالیسیلیک اسید افزایش معنی‌دار نشان داد (Kheirkhah et al., 2016). یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد وجود مکان‌های قابل‌تبادل روی سطح بیوچار و آزاد شدن عناصر از بیوچار می‌تواند یکی از مکانیسم‌های ممکن به‌منظور بهبود جذب عناصر غذایی توسط ریشه گیاه باشد و با تحریک رشد میکروارگانیسم‌های مفید روی سطح بیوچار می‌تواند موجب افزایش دسترسی عنصر گردد (Vaccari et al., 2015). اگرچه بیوچار در دامنه وسیعی از واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیک احیاء کننده در خاک شرکت می‌کند و درعین‌حال بر فرآیندهای پیوسته مهم بین رابطه آب، خاک و گیاه تأثیر می‌گذارد. محققین گزارش

کردند که آزاد شدن عناصر و بهبود رشد میکروارگانیسم‌های مفید روی سطح بیوچار می‌تواند یکی از مکانیسم‌های بهبود جذب این عناصر توسط ریشه گیاه باشد (Awad et al., 2017). در گیاهان زراعی به اثر اسید سالیسیلیک در بهبود خصوصیات مورفولوژیک ریشه اشاره شده است (Yazdanpanah et al., 2015; Kheirkhah et al., 2016; Ijaz et al., 2019).



شکل ۱۲. اثر متقابل شوری خاک، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر وزن خشک ریشه در دو سال آزمایش. Salt-1: بدون شوری خاک، Salt-2: شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و Salt-3: شوری ۸ دسی زیمنس بر متر؛ SA1 : بدون سالیسیلیک اسید، SA2: ۰/۵ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید، SA3: ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید؛ B-1: بدون بیوچار، B-2: بیوچار اولیه، B-3: بیوچار اصلاح‌شده با فسفریک اسید، B-4: بیوچار اصلاح‌شده با سولفوریک اسید

Fig. 12. Interaction effect of soil salinity, biochar and salicylic acid on root dry weight in two years of experiment. SS0, SS4, and SS8 refer to control, salt stress at 4 dS m^{-1}, and salt stress at 8 dS m^{-1}. SA0, SA0.5, and SA1 represent control treatment without salicylic acid, 0.5 mM of salicylic acid, and 1 mM of salicylic acid, respectively. B0, Rb, Pb, and Sb refer to control treatment without biochar application, regular biochar, modified biochar using phosphoric acid, and modified with sulfuric acid respectively.

نتیجه‌گیری نهایی

در شرایط عدم شوری، کاربرد سالیسیلیک اسید در سطح نیم میلی مولار توأم با مصرف بیوچار تأثیر مثبت بر ارتفاع بوته داشت، اما در شرایط شوری بالا اثرات مثبت سالیسیلیک و بالأخص بیوچار بر این صفت کاهش نشان داد. همچنین کاربرد بیوچار بر تعداد برگ در بوته در شرایط عدم شوری نسبت به شوری بالا نتایج بهتری نشان داد. در خصوص وزن خشک بوته، کاربرد بیوچار بالأخص در فرم ساده (معمولی) در مقایسه با بیوچار اصلاح یافته در کلیه سطوح تنش اثر مثبت و معنی‌دار نشان داد. در خصوص عملکرد و اجزای عملکرد آن نتایج نشان داد که تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در بوته تحت تأثیر ترکیبات مختلف تیماری، تغییرات معنی‌دار یافتند، به‌طوری‌که کاربرد بیوچار و سالیسیلیک اسید در شرایط عدم شوری و شوری متوسط تأثیر مثبت بر در افزایش تعداد غلاف در بوته داشت، اما در سطح بالاتر شوری، این صفت بالأخص در بیوچار اصلاح یافته به‌شدت کاهش معنی‌دار یافت. نتایج مشابهی در خصوص تعداد دانه در غلاف نیز مشاهده شد.

منابع

Abbasnasab, Z., Abedi, M., Sadati, S.E., 2021. Effect of biochar on some morphological and physiological traits in *Medicago sativa* L. and *Bromus tomentellus* L. Journal of Plant Process and Function. 10, 145-156. [In Persian with English Summary]. http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1400.10.41.4.4

Akhtar, S.S., Andersen, M.N., Liu, F., 2015. Biochar mitigates salinity stress in potato. Journal of Agronomy and Crop Science. 201, 368-378. https://doi.org/10.1111/jac.12132

Awad, Y.M., Lee, S.E., Ahmed, M.B.M., Vu, N.T., Farooq, M., Kim, S., Kim, H.S., Vithanage, M., Usman, A.R.A., Al-Wabel, M., Kwon, E.E., Ok, Y.S., 2017. Biochar, a potential hydroponic growth substrate, enhances the nutritional status and growth of leafy vegetables. Journal of Cleaner Production. 156, 581-588. https://doi.org/10.1016/j.jclepro

Azder Afshari, M., Shekari, F., Afsahi, K. and Azim Khani, R., 2016. The effect of foliar application of salicylic acid on dry weight, harvest index, yield and yield components of cowpea (*Vigna unguicaultata* L.) under water stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 9, 51-58. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2016.299

Biria, M., Moezzi, A.A., AmeriKhah, H., 2017. Effect of sugarcane bagasse made biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil. Journal of Water and Soil. 31, 609-626 [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22067/jsw.v31i2.55832

Darvizheh, H., Zahedi, M., Abbaszadeh, B., 2019. Effects of Foliar Application of Salicylic Acid and Spermine on the Growth & Root Morphological Characteristics of Purple Coneflower (*Echinacea purpurea* L.) Under Drought.Stress. Journal of Plant Process and Function. 8, 225-242. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2019.124085.2433

Gulati, P., Rose, D. J.1., 2018. Effect of extrusion on folic acid concentration and mineral element dialyzability in Great Northern beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Food Chemistry. 269, 118-124. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.124

Hejazi Zadeh, A., Gholamalizadeh Ahangar, A., Ghorbani, M., 2016. Effect of biochar on lead and cadmium absorption of sewage black mud of paper factories by sunflower. Water and Soil Science. 26(2), 259-271 [In Persian with English Summary].

Ijaz, M., Sher, A., Sattar, A., Shahid, M., Nawaz, A., Ul-Allah, S., Tahir, M., Ahmad,S., Saqib, M., 2019. Response of canola (*Brassica napus* L.) to exogenous application of nitrogen, salicylic acid and gibberellic acid under an arid climate. Soil and Environment. 38, 90-96. https://doi.org/10.25252/SE/19/71619

Islam, M.S., Roy, H., Afrose, S., 2022. Phosphoric acid surface modified Moringa oleifra L. leaves biochar for the sequestration of methyl orange from aqueous solution: characterizations, isotherm, and kinetics analysis. Remediation Journal., 32, 281-298. https://doi.org/10.1002/rem.21733

Jayakanan, M., Bose, J., Babourina, O., Rengel, Z., Shabala, S., 2015. Salicylic acid in plant salinity stress signaling and tolerance. Plant Growth Regulation, 76, 25-40. https://doi.org/10.1007/s10725-015-0028-z

Kang, G., Li, G., Xu, W., Peng, X., Han, Q., Zhu, Y., 2012. Proteomics reveals the effects of salicylic acid on growth and tolerance to subsequent drought stress in wheat. Journal of Proteome Research. 11, 6066-6079. https://doi.org/10.1021/pr300728y

Kanwal, S., Ilyas, N., Shabir, S., Saeed, M., Gul, R., Zahoor, M., and Mazhar, R., 2017.Application of biochar in mitigation of negative effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Plant Nutrition. 41, 1-13, https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1392568

Kazemi, R., Ronaghi, A., Yasrebi, J., Ghasemi-Fasaei, R., Zarei, M., 2019. Influence of poultry manure and its biochar, Funneli formismosseae and salinity stress on corn yield and micronutrients concentration. Iranian Agricultural Research. 38, 37-46. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22099/IAR. 2019.5458

Kheirkhah, M., Farazi, M., Dadkhah, A., Khoshnood, A., 2016. Application of glycine, tufool and salicylic acid in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drought conditions. Journal of Crop Ecophysiology. 10, 167-182. [In Persian with English Summary]. https://sanad.iau.ir/en/Article/956549

Lashari, M.S., Ye, Y., Ji, H., Li, L., Kibue, G.W., Lu, H., & Pan, G., 2015. Biochar–manure compost in conjunction with pyroligneous solution alleviated salt stress and improved leaf bioactivity of maize in a saline soil from central China: a 2year field experiment. Journal of the Science of Food and Agriculture 95, 1321-1327. https://doi.org/10.1002/jsfa.6825

Mehdizadeh, L., Moghaddam, M., lakzian, A., 2019. Effect of biochar on growth

characteristics and sodium to potassium ratio of summer savory (*Satureja hortensis* L.) under NaCl stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12, 595-606. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1419.1308

Patel, A., Khare, P., Patra, D.D., 2017. Biochar Mitigates Salinity Stress in Plants. P. 153-182. In: Plant Adaptation Strategies in Changing Environment. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6744-0_6

Peng, X., Yang, B., Deng, D., Dong, J., Chen, Z., 2012. Lead tolerance and accumulation in three cultivars of Eucalyptus urophylla XE. grandis: implication for phytoremediation. Environmental Earth Sciences, 67, 1515-1520.

Petry, N., Boy, E., Wirth, J.P., Hurrell, R.F., 2015. The potential of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) as a vehicle for iron biofortification. Nutrients, 7, 1144-1173. http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1595-1

Razzaghi, F., Ahmadi, S.H., Adolf, V.I., Jensen, C.R., Jacobsen, S.E., Andersen, M.N., 2011. Water relations and transpiration of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salinity and soil drying. Journal of Agronomy and Crop Science, 197, 348 - 360. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00473.x

Reginato, M., Travaglia, C., Reinoso, H., Garello, F., Luna, V., 2016. Salt mixtures induce anatomical modifications in the halophyte Prosopis strombulifera (Fabaceae: Mimosoideae). Flora. 218, 75–85, https://doi.org/10.1016/j.flora.2015.11.008

Sepehri, A., Abasi, R., Karami, R., 2016. Effect of drought stress and salicylic acid on yield and yield component of bean genotypes. 17, 503-516. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22059/jci.2015.55196

Vaccari, F.P., Maienza, A., Miglietta, F., Baronti, S., Lonardo, S.Di., Giagnoni, L., Lagomarsino, A., Pozzi, A., Pusceddu, E., Ranieri, R., Valboa, G., Genesio, L., 2015. Biochar stimulates plant growth but not fruit yield of processing tomato in a fertile soil. Agriculture, Ecosystems and Environment, 207, 163-170. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.015

Yazdanpanah, M., Babaei Cheshme Maki, H., Bakhtiari, I., Goorkhorram, H., Samadi, A., 2015. Effect of salicylic acid, nano-iron chelate and pseudomonas on quality and quantity of rapeseed yield. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES). 6, 310-317.

Zhang, H.J., Dong, H.Z., Li, W.J., Zhang, D. M., 2011. Effects of soil salinity and plant density on yield and leaf senescence of field grown cotton. Journal Agronomy Crop Science. 198, 27–37, https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00481.x