



اثر بیوجارهای تغییر یافته و باکتری محرک رشد بر شاخص‌های رشدی و اکسیداتیو گیاه جو (Hordeum vulgare L.) در خاک شور

پریسا جباری^{۱*}، سعید خماری^۲ و علی اشرف سلطانی طولارود^۳

* دانش آموخته کارشناسی ارشد آگروتکنولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

دانشگاه محقق اردبیلی

^۲ استاد فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

شوری یکی از تنش‌های اصلی محدودکننده تولید در مناطق خشک است و استفاده از راهکارهای زیستی کارآمد برای کاهش آثار منفی آن اهمیت دارد. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، به‌منظور ارزیابی اثر بیوجارهای تغییر یافته با اسید فسفریک و اسید نیتریک و نیز تلقیح بذور و ریزوسفر جو با باکتری *Pseudomonas putida* بر رشد و شاخص‌های تنش اکسیداتیو برگ در خاک شور انجام شد. بیوجار پس از یک ماه انکوباسیون در خاک برای فعال سازی و تثبیت اثرات آن، به‌دنبال دو ماه کشت گیاه ارزیابی شد. صفات رشد، مالون‌دی‌آلدهید، پراکسید هیدروژن و نسبت‌های یونی پتاسیم و سدیم خاک اندازه‌گیری شد و اثر متقابل بیوجار و باکتری بر همه صفات معنی‌دار بود. تیمار بیوجار فسفریک همراه با باکتری بیشترین وزن خشک و کمترین MDA و H₂O₂ را نشان داد و نسبت K⁺/Na⁺ را بهبود بخشید. یافته‌ها تأیید می‌کند که ترکیب بیوجار فعال شده و باکتری می‌تواند از طریق کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود تغذیه معدنی، تحمل جو به شوری را تقویت کند.

واژه‌های کلیدی: سودوموناس، پیرولیز، اکسیداسیون، شوری، پتاسیم.

مقدمه

شوری از مهم‌ترین محدودیت‌های کشاورزی پایدار است و بیش از ۶ درصد اراضی جهان را درگیر کرده است. این تنش با کاهش رشد، مختل کردن تغذیه، آسیب به غشا و کند کردن فرآیندهای تولیدمثلی، یکی از تنش‌های اصلی مؤثر بر بهره‌وری در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود (محمدی و همکاران، ۱۴۰۳). جو (*Hordeum vulgare* L.) از خانواده *Poaceae*، غله‌ای مهم با چرخه رشد کوتاه و سازگار با خشکی و شوری است. برای کاهش اثرات شوری، رویکردهای گوناگونی پیشنهاد شده است. ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) از مؤثرترین گزینه‌ها هستند؛ تلقیح بذر با چند سویه این باکتری‌ها با ترشح ترکیبات محرک رشد، کاهش مواد بازدارنده، بهبود تنظیم اسمزی و تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی، توان گیاه را برای تحمل شوری افزایش می‌دهد (Alharbi *et al.*, 2022). در کنار آن، اصلاح خاک با مواد آلی نیز مؤثر است. بیوجار، محصول پیرولیز مواد آلی، ماده‌ای غنی از کربن است که با از طریق تأمین عناصری مانند Mg (منزیم) و K (پتاسیم) و با از راه بهبود ویژگی‌های فیزیوشیمیایی و زیستی خاک، رشد گیاه در شرایط شوری را تقویت می‌کند. شواهد نشان می‌دهد که استفاده از بیوجار و اصلاح آن می‌تواند فرآیندهای زیستی خاک و درصد جوانه‌زنی را به شکل معنی‌داری بهبود دهد (شهزادی و همکاران، ۲۰۲۴). در این چارچوب، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر شوری خاک بر رشد و عملکرد جو و نیز ارزیابی نقش ریزوباکتری‌های محرک رشد و بیوجار تغییر یافته در بهبود تحمل گیاه انجام شد. این مطالعه تلاشی برای شناسایی راهکارهای کارآمد و پایدار به‌منظور افزایش سازگاری جو با شرایط شور و ارتقای بهره‌وری آن در سامانه‌های تولید است.

مواد و روش‌ها

خاک شور مورد آزمایش از منطقه‌ی ایستگاه تقویت فشار گاز سراب واقع در نزدیکی روستای چرلو از توابع شهرستان سراب استان آذربایجان شرقی جمع‌آوری و در آزمایشگاه علوم خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- میزان عناصر موجود در خاک مورد مطالعه

بافت خاک	PH	EC _e (ds m ⁻¹)	OC (%)	OM (%)	CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹)
	۷/۸۹ ± ۰/۰۶۴	۷/۱۶ ± ۰/۰۴۶	۰/۵۴۹۹ ± ۰/۰۲۲	۰/۹۴۷۹ ± ۰/۰۳۸	۱۷/۵۲ ± ۴/۴۱
لومی	N _{total}	Olsen-P	K	Na	Ca
	۰/۰۶۸ ± ۰/۰۰۵۳	۱۷/۷۸ ± ۱/۸۰	۳۳۳/۴ ± ۳۳/۲۷	۴۷۵۹/۶ ± ۲۳۰/۱۰	۸۱۷/۶ ± ۴۶/۰۵

این آزمایش برای بررسی اثر بیوجار و باکتری محرک رشد مقاوم به شوری به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. عوامل آزمایشی شامل چهار سطح بیوجار (عدم کاربرد، بیوجار ساده ۵ درصد، بیوجارهای تغییر یافته با اسید فسفریک و اسید نیتریک ۵/۲ درصد) و دو سطح باکتری (تلقیح و عدم تلقیح) بودند. برای تهیه بیوجارهای تغییر یافته، مقدار ۴۰۰ گرم بیوجار را در ۴ لیتر اسید ۱ مولار در ظرف گالن آب ۵ لیتری ریخته و سوسپانسیون حاصل به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. در ادامه پس از دو سه بار شستشو در آون ۷۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. برای آماده‌سازی مایه‌ی تلقیح، یک کلنی خالص از سویه‌ی مورد نظر (سویه‌ی ۱۶۹) انتخاب و تحت شرایط استریل به دو ارلن ۵۰۰ میلی‌لیتری حاوی ۲۵۰ میلی‌لیتر محیط ناترینت برات اضافه گردید. ارلن‌های حاوی باکتری در دمای ۲۸ درجه سلسیوس و روی شیکر با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند. به منظور تحقق دوره انکوباسیون بیوجار در خاک، هر گلدان با ظرفیت سه کیلوگرم (خاک همراه با مقدار تعیین شده کاربرد بیوجار)، به مدت یک ماه تا سطح ۶۰ درصد ظرفیت مزرع‌های مرطوب نگه‌داشته شدند. در ادامه هشت بذر استریل‌شده در هر گلدان کشت شدند. گلدان‌های تیمار شده با باکتری با محلول سوسپانسیون به روش آب‌دهی تقویت شدند. پس از دو ماه رشد رویشی، چهار بوته از هر گلدان برای اندازه‌گیری صفات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی شامل وزن خشک ریشه و برگ، محتوای مالون دی‌آلدهید و مقدار پراکسید هیدروژن برگ برداشت شدند. مقادیر پتاسیم و سدیم خاک گلدان‌ها در نمونه برداری نهایی جمع‌آوری و به روش فلیم فتومتری مورد اندازه‌گیری واقع شدند. داده‌های آزمایشی پس از آزمون مفروضات تجزیه واریانس در نرم افزار STATISTICA مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و میانگین‌ها با روش LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

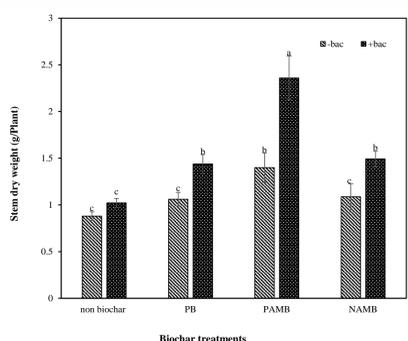
نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل بیوجار و باکتری بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه، میزان مالون‌دی‌آلدهید، مقدار پراکسید هیدروژن و سدیم خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. پتاسیم خاک نیز تحت تأثیر اصلی بیوجار و اثر متقابل آن با باکتری در سطوح یک و پنج درصد معنی‌دار شد. همچنین گلدان‌های تلقیح‌شده با *Pseudomonas putida* جوانه‌زنی سریع‌تری داشتند که بیانگر نقش اولیه باکتری در کاهش تنش اسمزی است.

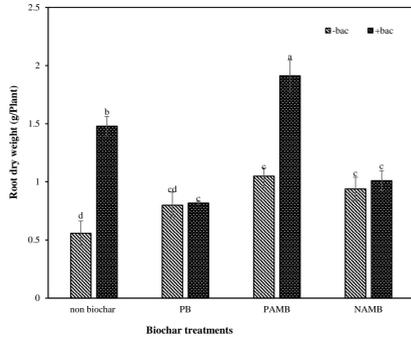
جدول ۲- تجزیه واریانس پارامترهای گیاهی و خاکی مطالعه شده

نوع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	هیدروژن پراکسید	مالون دی‌آلدهید	خاک Na
بلوک	۲	۰/۱۵۷۷*	۰/۰۶۳۷ ^{ns}	۰/۰۸۷*	۰/۰۱۴۵ ^{ns}	۴۶۹۸۴ ^{ns}
بیوجار	۳	۰/۰۹۰۹**	۰/۰۴۹۷۴**	۱/۰۱۳**	۲/۳۰۴**	۱۱۵۳۵**
باکتری	۱	۱/۳۲۷۷**	۱/۳۱۸۳**	۱/۵۴۷**	۱/۹۷۱**	۲۵۶۰ ^{ns}
بیوجار × باکتری	۳	۰/۱۸۰۲**	۰/۳۵۹۸**	۰/۲۱۳**	۱/۰۸۰۵**	۲۶۹۸*
خطا	۱۴	۰/۰۳۱۳	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۳۰	۰/۰۵۲۸	۶۴۹
ضریب تغییرات (درصد)	—	۱۳/۱۳	۱۳/۷۰	۳۶/۹	۲۱/۸۸	۱۱/۸۶

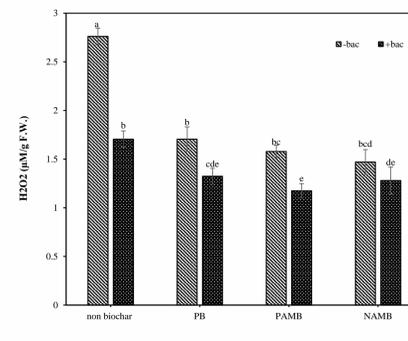
^{ns} غیر معنی‌دار و * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد



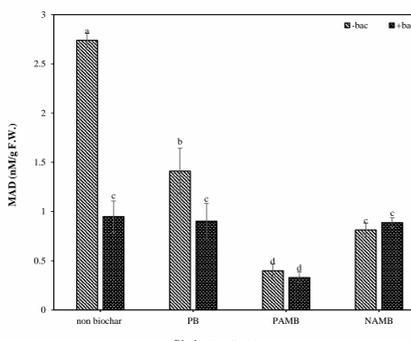
شکل ۱



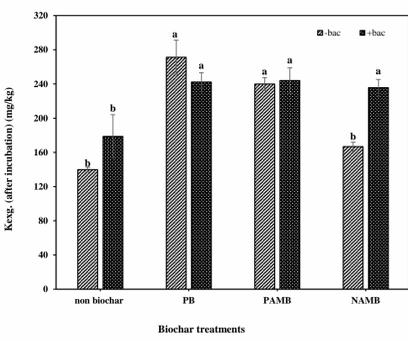
شکل ۲



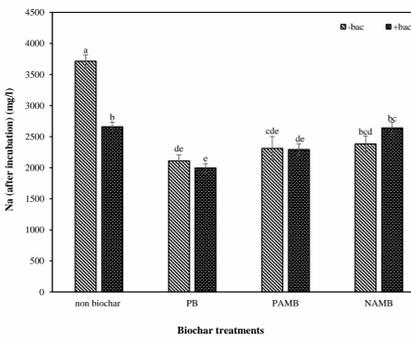
شکل ۳



شکل ۴



شکل ۵



شکل ۶

اثر انواع بیوجار و باکتری بر صفات مورد مطالعه در جو. PB: بیوجار ساده، PAMB: بیوجار تغییر یافته با اسید فسفریک و NAMB: بیوجار تغییر یافته با اسید نیتریک. میانگین‌ها به صورت (mean ± S.E.) نشان داده شده‌اند. حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون LSD می‌باشد.

بیشترین وزن خشک اندام هوایی (شکل ۱) و ریشه (شکل ۲) در تیمار بیوجار اسید فسفریک همراه با باکتری مشاهده شد. این بهبود رشد، حاصل افزایش دسترسی عناصر غذایی، کاهش تجمع نمک و کاهش تنش اکسیداتیو است؛ موضوعی که پیش‌تر نیز در غلات گزارش شده است (Wu *et al.*, 2024). در مقابل، شاهد بدون باکتری کمترین رشد را نشان داد. میزان پراکسید هیدروژن در تیمار شاهد بیشترین مقدار را داشت (شکل ۳) و در تیمار بیوجار اسید فسفریک باکتری‌دار به شکل قابل توجهی کاهش یافت. این کاهش نشان‌دهنده نقش ترکیبی بیوجار و باکتری در تقویت سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی و محدود کردن تولید ROS (گونه‌های فعال اکسیژن) است؛ الگویی که با یافته‌های صالحی و همکاران (Salehi *et al.*, 2025) هم‌خوان است. روند مشابهی در مالون‌دی‌آلدهید نیز دیده شد (شکل ۴): به‌گونه‌ای که کمترین مقدار در تیمار بیوجار اسید فسفریک باکتری‌دار ثبت شد، که بیانگر پایداری بیشتر غشاهای تحت این تیمار است. بررسی پتاسیم خاک (شکل ۵) نشان داد که بیوجار به‌ویژه همراه با باکتری، به حفظ مقادیر بالاتر K کمک می‌کند و اثر رقابتی Na را کاهش می‌دهد. در مقابل، شاهد و بیوجار اسید نیتریک بدون باکتری کمترین مقادیر را داشتند. سدیم خاک نیز بیشترین مقدار را در تیمار شاهد و کمترین مقدار را در بیوجار ساده همراه با باکتری نشان داد (شکل ۶)، که بیانگر نقش بیوجار در تثبیت Na و همراهی باکتری در بازیابی نسبت K⁺/Na⁺ است (Shahzadi *et al.*, 2024).

نتیجه‌گیری

کاربرد هم‌زمان بیوجار و *P. Putida* با تعدیل شوری در سطح خاک و گیاه، از طریق کاهش اکسیداسیون غشایی، بهبود جذب عناصر و تقویت رشد، می‌تواند راهکاری مؤثر و پایدار برای بهبود رشد جو در خاک شور باشد. با توجه به اینکه اصلاح بیوجار موجب افزایش کارایی آن شده می‌توان حتی با دوزهای پایین‌تری نیز به‌کار برد تا سودمند تر و به صرفه تر گردد.

منابع

محمدی خاتقاه، پ.، خماری، س. و گلی کلانپا، ا. ۱۴۰۳. مطالعه اثرات کاربرد بیوجار و فسفر بر خصوصیات بیوشیمیایی بافت ریشه و برگ گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.). رشد یافته در خاک متأثر از نمک. فرآیند و کارکرد گیاهی. ۱۴(۶۶): ۳۱۳-۳۲۶.

Alharbi, K., Rashwan, E., Mohamed, H.H., Awadalla, A., Omara, A.E.D., Hafez, E.M., and Alshaal, T. (2022). Application of silica nanoparticles in combination with two bacterial strains improves the growth, antioxidant capacity and production of barley irrigated with saline water in salt-affected soil. *Plants*, 11(15): 2026.

Gul, F., Khan, I.U., Rutherford, S., Dai, Z.C., Li, G., and Du, D.L. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria and biochar production from *Parthenium hysterophorus* enhance seed germination and productivity in barley under drought stress. *Frontiers in plant science*, 14: 1175097.

Salehi, A., Yaghoobian, I., and Modarres-Sanavy, S.A.M. (2025). Biochar and plant growth-promoting rhizobacteria enhance physio-biochemical traits, secondary metabolites, oil, and grain yield of rapeseed under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 1-19.

Shahzadi, A., Noreen, Z., Alamery, S., Zafar, F., Haroon, A., Rashid, M., Aslam, M., Afifa, Y., Kotb, A.A., Arif, A.M., Sezai, E., and Fiaz, S. (2024). Effects of biochar on growth and yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Scientific Reports*, 14(1): 20024.

Wu, B., Yang, H., Li, S., and Tao, J. (2024). The effect of biochar on crop productivity and soil salinity and its dependence on experimental conditions in salt-affected soils: a meta-analysis. *Carbon Research*, 3(1): 56.