DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2026.4304

اثر باکتری‌های *Pseudomonas fluorescens* و *Bacillus halotolerans* در بهبود برخی از صفات مرفولوژیکی گیاه دارویی *Capparis spinosa* L. تحت تأثیر تنش خشکی (مقاله پژوهشی)

۱ - وحیده نگهبان، دانشجو دکترا، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۲ - علی اکبر کریمیان*، دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
akarimian@yazd.ac.ir
۳ - حمید سودائی زاده، استاد، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۴ - مریم السادات میرباقری فیروزآباد، استادیار، گروه زیست شناسی، دانشکده زیست شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۹

چکیده

از عوامل محیطی اصلی مؤثر بر کاهش رشد و تولید گیاهان، تنش خشکی است. باکتری‌های محرک رشد از طریق مکانیسم‌های مختلف باعث افزایش تحمل گیاه در تنش‌های محیطی، از جمله خشکی می‌شوند. هدف از این پژوهش بررسی میزان تأثیر باکتری‌های محرک رشد، به‌عنوان کود زیستی در افزایش تحمل گیاه کور (*Capparis spinosa*) به تنش خشکی است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانهٔ پژوهشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه یزد انجام شد. فاکتورهای بررسی شامل رژیم آبیاری در چهار سطح (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و باکتری در چهار سطح (بدون باکتری به‌عنوان شاهد، *Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus halotolerans* و ترکیب هر دو باکتری) بود. نتایج نشان داد در تنش شدید (۲۵ درصد ظرفیت زراعی) بیشترین تعداد برگ (۱۰۴/۷۱ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۲۵درصد ظرفیت زراعی)، نیتروژن (۱۴۹/۶۵درصد افزایش) و آهن (۲۶۶/۴۷ درصد افزایش) در تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری بود. بیشترین تعداد شاخهٔ فرعی (۱۶۶/۶۷درصد افزایش)، وزن‌تر و خشک اندام هوایی (به‌ترتیب ۲۵ و ۲۸/۴۵ درصد افزایش)، محتوای نسبی آب برگ (۵۲/۹۶ درصد افزایش) در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens*، همچنین بیشترین طول ساقه (۲۰/۵۷ درصد افزایش)، تعداد باکتری (۲۳۱۶/۶۷ درصد افزایش نسبت‌به تیمار تلقیح‌شده با همان باکتری در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و عناصر فسفر (۱۳۳/۳۳ درصد افزایش) و پتاسیم (۳۳۵/۳ درصد افزایش) گیاه در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* حاصل شد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت استفادهٔ از باکتری‌های محرک رشد به‌عنوان یک کود زیستی در شرایط تنش خشکی می‌تواند در افزایش جذب عناصر غذایی چون نیتروژن، آهن و فسفر و به‌دنبال آن بهبود برخی صفات مرفولوژیکی گیاه کور، مؤثر باشد.

واژگان کلیدی: گیاه کور، باکتری محرک رشد، نیتروژن، فسفر.

مقدمه

از عوامل محیطی اصلی مؤثر بر کاهش رشد و تولید گیاهان، تنش خشکی است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد دوره‌های خشکسالی شدید که در آینده، در نتیجه عوامل مختلفی به‌ویژه امواج گرمای شدید رخ می‌دهد، به‌طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت [۴ و ۳۹]. باکتری‌های محرک رشد (PGPB[1]) از طریق

[1] Plant growth promoting bacteria

مکانیسم‌های مختلف، از جمله تولید هورمون‌های گیاهی (اکسین، جیبرلین، سیتوکینین)، تثبیت نیتروژن، تولید سیدروفور و در نتیجه ترسیب آهن، انحلال ترکیبات فسفر، اکسایش گوگرد، تولید آنزیم ACC-Deaminase باعث افزایش تحمل گیاه در تنش‌های محیطی می‌شوند [۵]. بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که باکتری‌های محرک رشد موجب افزایش تحمل گیاهان دارویی، به خشکی [۱۲]، شوری، گرد و غبار [۲۶]، عناصر سنگین [۱۸] و آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده شهری [۷] می‌شود. استفاده از این باکتری‌ها به‌عنوان کودزیستی، از جمله راهکارهای مقابله با تنش‌های محیطی در مناطق خشک به‌شمار می‌آید که خطرات زیست‌محیطی ندارد. در پژوهشی روی گیاه پروانش (*Catharanthus roseus*) مشاهده کردند که باکتری *Pseudomonas fluorescens* باعث بهبود تعداد برگ، ارتفاع بوته، وزن‌تر و خشک گیاه در شرایط کم آبی شد [۱۵]. با بررسی اثر هم‌زمان سه باکتری *Bacillus halotolerans*، *Pseudomonas sihuiensis* و *Bacillus atrophaeus* با اسید فولیک در مقاومت به خشکی در گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) مشاهده شد که ترکیب سه باکتری موجب افزایش طول ساقه، طول ریشه، وزن‌تر و خشک گیاه نسبت‌به شاهد بدون باکتری شد؛ همچنین ترکیب سه باکتری همراه با تنش خشکی موجب بهبود ۱۲۹/۲۸ درصد طول ساقه، ۸۶/۲۷ درصد طول ریشه، ۴۰ درصد وزن‌تر گیاه و ۵۵/۵۶ درصد وزن خشک گیاه نسبت‌به شرایط تنش خشکی بدون باکتری شد. همچنین ترکیب سه باکتری موجب افزایش فسفر، پتاسیم، آهن نسبت به شاهد شد؛ همچنین ترکیب سه باکتری همراه با تنش خشکی موجب بهبود ۲۰ درصد فسفر، ۳۳/۹۴ درصد پتاسیم، ۱۱/۳۶ درصد آهن نسبت‌به شرایط تنش خشکی بدون باکتری شد [۳۷]. در پژوهشی با بررسی همزمان باکتری *Pseudomonas fluorescens* و *Pseudomonas putida* روی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه (*Stevia rebaudiana*) تحت تنش خشکی مشاهده شد که باکتری *P.fluorescens* موجب افزایش وزن‌تر و خشک اندام هوایی، وزن‌تر ریشه، تعداد برگ در سطوح مختلف آبیاری شد و بهترین تیمار بهبود صفات فوق و کاهش اثر تنش خشکی تلقیح هم‌زمان دو باکتری گزارش شد[۲]. کور با نام علمی *Capparis spinosa* L. متعلق به خانوادهٔ Capparidaceae است. این گیاه با دامنهٔ تحمل اکولوژیک وسیع، مناسب رشد در خاک‌های فقیر و شور بوده؛ در نتیجه گیاهی مناسب برای بیابان‌زدایی است [۳]. کور گیاهی تجاری و دارای ارزش اقتصادی بوده و از اکثر قسمت‌های گیاه استفادهٔ دارویی می‌شود [۹]. هدف از این پژوهش بررسی میزان تأثیر باکتری‌های محرک رشد، به‌عنوان کود زیستی در افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی است. نوآوری این پژوهش مقایسهٔ دو باکتری به‌طور جداگانه و ترکیب آن دو باهم، همچنین بررسی عناصر غذایی هم‌زمان با صفات ظاهری گیاه و انتخاب گیاه کور، گیاه مناسب مناطق بیابانی است.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانهٔ پژوهشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه یزد انجام شد. فاکتورهای بررسی شامل رژیم آبیاری در چهار سطح (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و باکتری در چهار سطح (بدون باکتری به‌عنوان شاهد، *Pseudomonas fluorescens*، *Bacillus halotolerans* و ترکیب هر دو باکتری) بود. هر دو باکتری مورد استفاده، بومی خاک‌های یزد بودند که *B.halotolerans* از کلکسیون میکروبی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد و *P.fluorescens* از مرکز مطالعات شوری یزد تهیه شد. نشاها از شرکت دانش‌بنیان هورشید خریداری شد (شکل ۱). جهت انجام آزمایش از خاک شنی‌لومی استفاده شد (جدول ۱). بعد از اتوکلاو کردن خاک به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد، گلدان‌ها (با ارتفاع ۲۰ و قطر دهانه گلدان ۲۰ سانتی‌متر)، از ۳ کیلوگرم خاک پر شد. نشاهای یکسان انتخاب و در هر گلدان یک نشا کشت شد. طبق استاندارد نیم‌مک‌فارلند، مایع تلقیح باکتری با جمعیت

تقریبی $CFC\ ml^{-1}$ ۱/۵×۱۰^۸ در محیط کشت Nutrient Broth تهیه شد. یک هفته بعد از کشت نشاها (گیاهان ۲-۳ برگی) در دمای ۳۰ درجه (محیط) و شرایط نوری یکنواخت، در دو نوبت (نوبت دوم قبل از اعمال تنش خشکی)، به‌میزان ۵ میلی‌لیتر از محلول براث حاوی باکتری، برای شاهد محلول براث بدون باکتری، با سرنگ استریل به پای ریشهٔ گیاهان تزریق شد [۲۶] (شکل ۲). گلدان‌ها به‌مدت یک ماه، به مقدار مساوی آبیاری شد و پس از آن تیمارهای تنش خشکی اعمال شد. به‌منظور اعمال تنش خشکی از روش وزنی استفاده شد. بعد از ۱۰ ماه و قبل از ورود گیاه به مرحله خواب، صفات مرفولوژیکی اندازه‌گیری شد (شکل۳).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

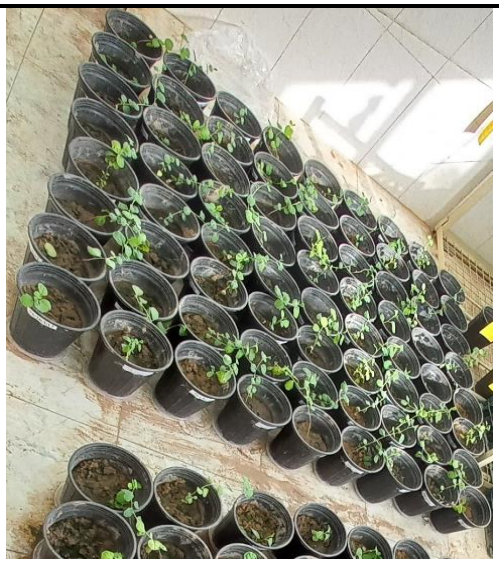
خصوصیات خاک	بافت	pH	هدایت الکتریکی ($ms\ cm^{-1}$)	ماده آلی (٪)	روی ($meq\ L^{-1}$)	سدیم ($meq\ L^{-1}$)	آهن ($meq\ L^{-1}$)	فسفر ($meq\ L^{-1}$)	پتاسیم ($meq\ L^{-1}$)	نیتروژن (٪)
مقدار	شنی‌لومی	۶/۵	۶/۹	۰/۱۵	۱/۳۳	۲۸/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۰۷	۰/۰۱



شکل ۱- نشاهای خریداری شده از شرکت هورشید



شکل ۲- کشت نشاء و تزریق باکتری



شکل ۳- کشت گیاه کور

اندازه‌گیری صفات مرفولوژیکی گیاه

شمارش تعداد برگ و شاخهٔ فرعی به‌صورت دستی، طول ساقه و طول بلندترین ریشه به‌وسیلهٔ خط‌کش برحسب سانتی‌متر، حجم ریشه از طریق محاسبهٔ اختلاف حجم آب به‌وسیلهٔ استوانهٔ مدرج برحسب سانتی‌متر مکعب، وزن‌تر اندام هوایی و ریشه برحسب گرم و به کمک ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم و وزن خشک اندام هوایی و ریشه، بعد از هواخشک کردن نمونه‌ها توسط ترازو با همان دقت ارزیابی شد. رطوبت نسبی برگ برحسبِ درصد بعد از ۲۴ ساعت قرارگرفتن در آب مقطر و در وضعیت تاریک و دمای یخچال بررسی شد. Fw: وزن‌تر برگ بلافاصله بعد از نمونه‌گیری. Dw: وزن خشک‌برگ پس از قرارگرفتن در آون به مدت ۲۴ ساعت و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد. Sw: وزن اشباع برگ پس از قرارگرفتن در آب مقطر [۳۳].

رابطه (۱): $RWC=((FwDw)\div(SwDw))\times 100$

اندازه‌گیری عناصر گیاه

هضم گیاه به‌منظور اندازه‌گیری عناصر با HCl ۲ نرمال صورت گرفت. از این عصاره جهت اندازه‌گیری پتاسیم، آهن و فسفر گیاه استفاده شد. برای اندازه‌گیری پتاسیم از دستگاه فلم‌فتومتر استفاده و مقدار پتاسیم برحسب میلی‌گرم بر لیتر تعیین شد [۳۴]. از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مدل AAS 8020 مقدار آهن برحسب میلی‌گرم بر لیتر خوانده شد [۱۷]. برای اندازه‌گیری فسفر از روش السن استفاده شد [۲۷]. نیتروژن کل گیاه با استفاده از روش کجلدال تعیین شد [۲۱].

تعیین جمعیت باکتری‌های خاک

به‌منظور شمارش باکتری اطراف ریشه، ابتدا یک گرم خاک اطراف ریشه را وزن کرده و داخل ارلن حاوی ۹۹ میلی‌لیتر آب مقطر استریل ریخته و ارلن را بهم زده تا ذرات خاک باز شوند و کلیهٔ باکتری‌ها در آب پخش شوند. در پایان بعد از رقت‌سازی نمونه‌ها در پلیت نوترینت آگار کشت و تعداد کلنی‌ها مورد شمارش و با استفاده از رابطهٔ زیر تعداد باکتری مشخص شد [۱۶].

رابطه (۲):

تعداد باکتری در یک گرم= تعداد کلنی شمرده‌شده × ضریب حجم × ضریب رقت

آنالیز داده‌ها

پس از اطمینان از نرمال‌بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف، از روش تجزیهٔ واریانس دو طرفه همچنین برای مقایسهٔ میانگین‌ها از آزمون چند دامنهٔ دانکن استفاده گردید. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخهٔ ۲۷ صورت گرفت و جهت رسم نمودارها از نرم افزار Excel 2024 استفاده شد.

نتایج

براساس نتایج جدول تجزیهٔ واریانس، اثر تنش خشکی روی تعداد برگ، طول ساقه، تعداد شاخهٔ فرعی، وزن‌تر و خشک اندام هوایی، وزن‌تر و خشک ریشه، حجم و طول بلندترین ریشه و محتوای نسبی آب برگ در سطح یک‌درصد معنی‌داری بود. اثر باکتری روی تعداد برگ، طول ساقه، تعداد شاخهٔ فرعی، وزن‌تر و خشک اندام هوایی، طول ریشه، حجم ریشه، و محتوای نسبی آب برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بوده و بر روی وزن‌تر و خشک ریشه اثر معنی‌داری نداشته است (جدول ۲). اثر متقابل تنش و باکتری روی تعداد برگ و طول ساقه، تعداد شاخهٔ فرعی، وزن‌تر و خشک اندام هوایی، طول ریشه و رطوبت نسبی برگ در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده و بر روی وزن‌تر و خشک و حجم ریشه اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیهٔ واریانس اثر باکتری و خشکی بر برخی از صفات مورفولوژیکی گیاه کور

		میانگین مربعات								
منابع تغییر	درجه آزادی	تعداد برگ	طول ساقه	تعداد شاخهٔ فرعی	وزن‌تر اندام هوایی	وزن‌خشک اندام هوایی	وزن‌تر ریشه	وزن‌خشک ریشه	طول بلندترین ریشه	حجم ریشه	محتوای نسبی آب برگ
تنش خشکی	۳	۷۷/۳۷**	۱۲۷۵/۲۴**	۰/۲۴**	۴۰۸/۴۰**	۱۱۱/۸۲**	۷/۵۲**	۱/۱۳**	۵۱/۹۵**	۸/۴۷۴**	۱۴۵/۳۳**
باکتری	۳	۴۲/۷۵**	۱۷۵۰/۷۳**	۰/۷۳**	۱۸۳/۴۰**	۸۹/۵۹**	۱/ ۲۴ns	۰/۲۸ns	۲۸۹/۵۱**	۲۸۹/۵۱**	۴۲۱/۳۵**
تنش × باکتری	۹	۱۱/۶۸**	۲۲۷/۲۲**	۰/۳۸**	۲۸/۱۸**	۱۲/۷۸**	۰/۸۷ns	۰/۲۴ns	۱۳۶/۳۹**	۰/۹۶ns	۱۱۳/۸۶**
خطا	۳۲	۰/۹۵	۸/۷۸	۰/۰۴	۲/۸۳	۱/۱۹	۰/۶۴	۰/۱۹	۳/۷۴	۰/۵۵	۳/۴۰

ns، ** به‌ترتیب اختلاف معنی‌داری ندارد، معنی‌داری در سطح ۱٪

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی روی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن گیاه کور و تعداد باکتری موجود در خاک در سطح ۱ درصد معنی‌دار بوده است. اثر باکتری نیز بر این عناصر و نیز تعداد باکتری موجود در خاک در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر باکتری و تنش خشکی بر برخی عناصرگیاه گور و تعداد باکتری موجود در خاک

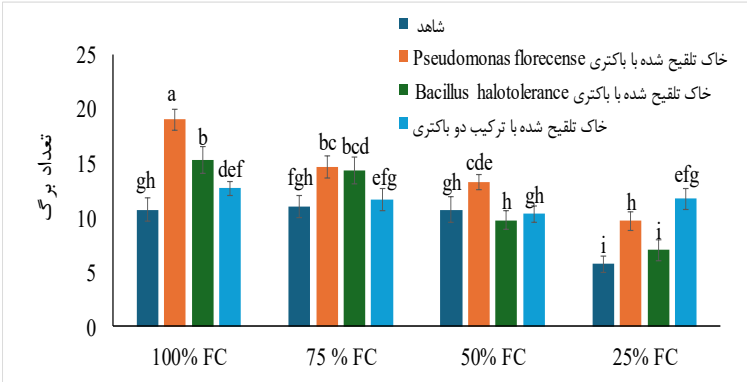
		میانگین مربعات				
منابع تغییر	درجه آزادی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	تعداد باکتری در یک گرم خاک
تنش خشکی	۳	۳۵/۲۶۱۱**	۰/۰۲**	۲۲/۰۸**	۷/۵۸۱**	۱/۱۵۱×۱۰^۱۳**
باکتری	۳	۳۶/۰۱۸**	۰/۰۸**	۳۸/۵۳**	۱۹/۲۲۷**	۴/۷۶۳×۱۰^۱۲**
تنش × باکتری	۹	۸/۶۹۵**	۰/۰۳**	۵/۲۹**	۲/۴۲۰**	۲/۵۷۲×۱۰^۱۲**
خطا	۳۲	۰/۰۶۰	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۰۲۷	۱۰۰۰۰

ns، ** به ترتیب اختلاف معنی‌داری ندارد، معنی‌داری در سطح ۱٪

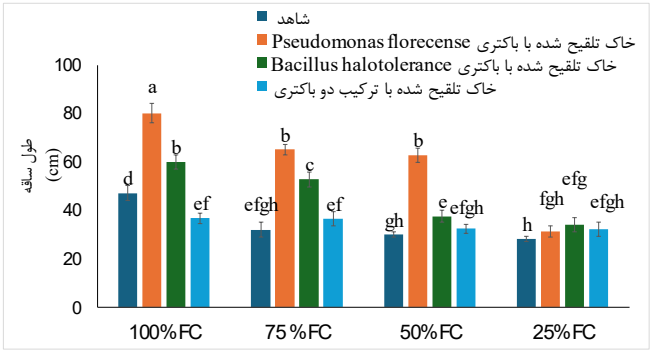
بیشترین تعداد برگ در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه باکتری *P.fluorescens* بود (به‌طور میانگین ۱۹ عدد). در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز بیشترین تعداد برگ با ۳۶/۷۲ و ۲۳/۹۵ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تحت تیمار تلقیح‌شده با باکتری

P.fluorescens به‌دست آمد. در تنش شدید (۲۵ درصد ظرفیت زراعی)، بیشترین تعداد برگ با ۱۰۴/۷۱ درصد افزایش نسبت‌به شاهد همان سطح آبیاری، در تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری مشاهده شد که با شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد داشت (شکل ۴).

در بین تیمارهای حاوی باکتری، بیشترین طول ساقه در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* به‌دست آمد. در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد نیز باکتری *P.fluorescens* در افزایش طول ساقه به مقدار ۳۸/۰۷ و ۳۳/۱۲ درصد افزایش نسبت به شاهد در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، مؤثرتر بود که بین دو سطح آبیاری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در تنش شدید بیشترین طول ساقه با ۲۰/۵۷ درصد افزایش نسبت به شاهد همان سطح آبیاری در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* بود که بین تیمارهای باکتری و شاهد همان سطح از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۵).



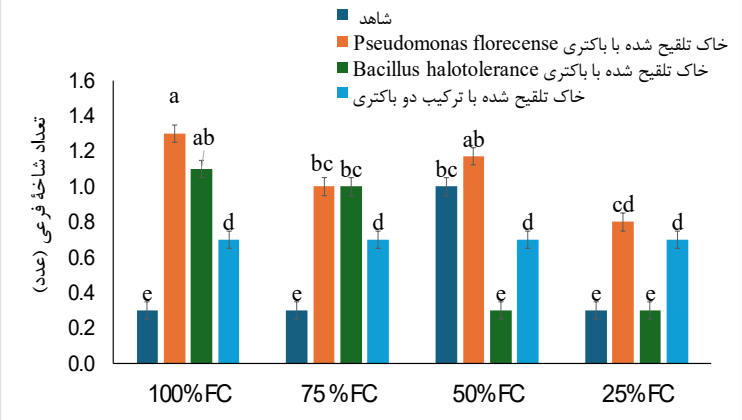
شکل ۴- بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی تعداد برگ گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) *FC[2]: ظرفیت زراعی مزرعه



شکل ۵ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی طول ساقه گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند FC: ظرفیت زراعی مزرعه

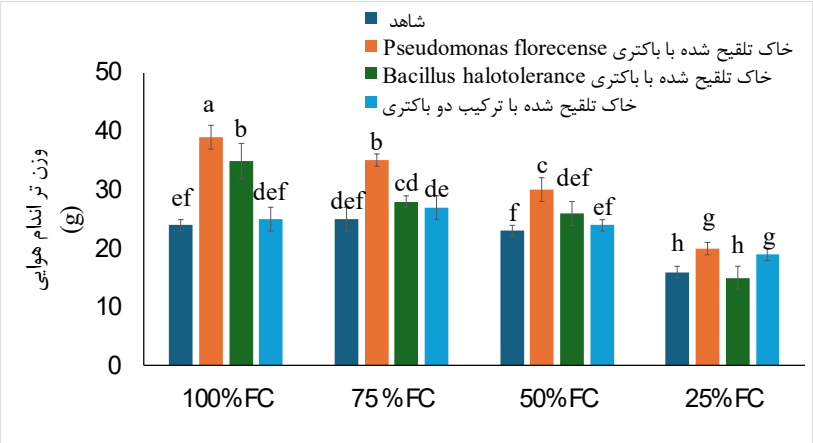
در بین تیمارهای تلقیح‌شده با باکتری، بیشترین تعداد شاخهٔ فرعی در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* به‌دست آمد که با باکتری *B.halotolerans* همان سطح و با سطح ۵۰ درصد و باکتری *P.fluorescens* اختلاف معنی‌داری نداشت. در تنش شدید بیشترین تعداد شاخهٔ فرعی با ۱۶۶/۶۷ درصد افزایش نسبت به شاهد همان سطح آبیاری در تیمار تلقیح‌شده با *P.fluorescens* بود که با ترکیب دو باکتری از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۶).

[2] Field Capacity

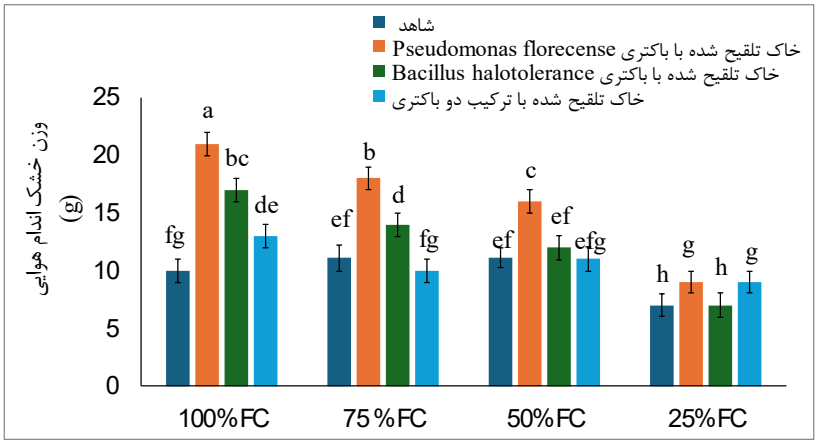


شکل ۶ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی تعداد شاخهٔ فرعی گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

بیشترین مقدار وزن‌تر و خشک اندام هوایی در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه باکتری *P.fluorescens* بود (به‌ترتیب ۶۲/۵ و ۱۱۰ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی). در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد نیز بیشترین مقدار وزن‌تر و خشک اندام هوایی توسط باکتری *P.fluorescens* به‌دست آمد در تنش شدید بیشترین وزن‌تر و خشک اندام هوایی در *P.fluorescens* (به‌ترتیب ۲۵ و ۲۸/۴۵ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) دیده شد که با ترکیب دو باکتری اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل۷ و ۸).

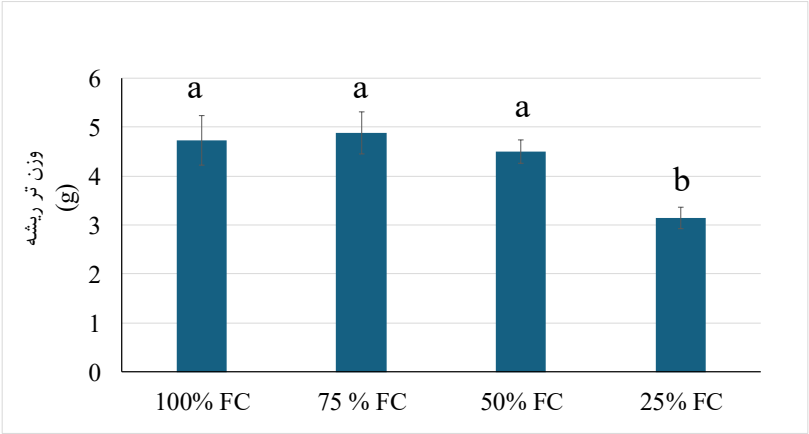


شکل ۷ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی وزن‌تر اندام هوایی گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه



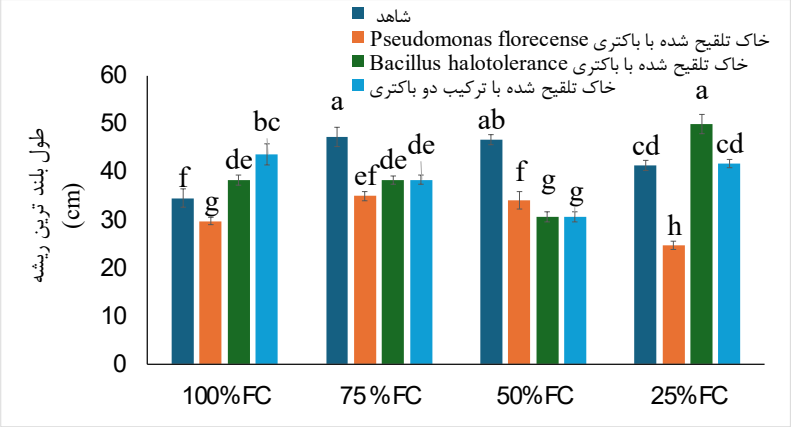
شکل ۸ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی وزن خشک اندام هوایی گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

بیشترین وزن‌تر ریشه در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد (۳/۱۷ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد) که از نظر آماری با سطوح ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌دار نداشت (شکل ۹). تلقیح باکتری و اثر متقابل آن همراه با سطوح آبیاری بر این صفت معنی‌دار نبود. اثر تنش خشکی، تلقیح باکتری و اثر متقابل آن همراه با سطوح آبیاری بر وزن خشک ریشه نیز معنی‌دار نبود.



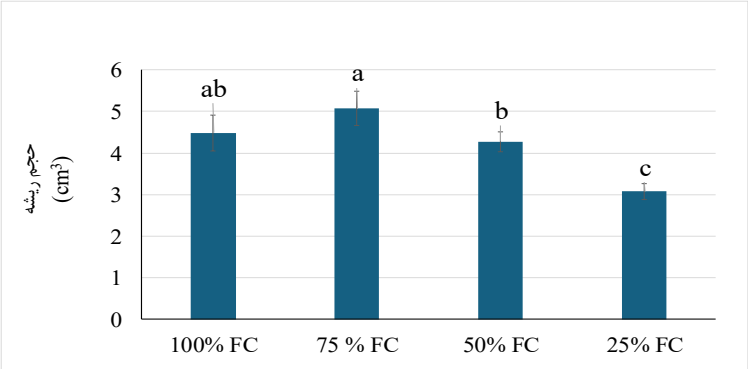
شکل ۹ - بررسی تنش خشکی بر روی وزن‌تر ریشه (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

به‌طور کلی بلندترین طول ریشه در سطح ۲۵ درصد به‌همراه باکتری *B.halotolerans* با ۴۴/۸۰ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد. در سطوح ۱۰۰ و ۷۵ درصد بلندترین طول ریشه در تیمار تلقیح‌شده با دو باکتری حاصل شد (به‌ترتیب ۲۶/۴۷ و ۱۱/۰۱ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) که در سطح آبیاری ۷۵ درصد ظرفیت زراعی از نظر آمار بین تیمارهای باکتری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در تنش شدید بیشترین طول ریشه با ۲۱/۱۵ درصد افزایش نسبت‌به شاهد همان سطح آبیاری، در *B.halotolerans* بود (شکل ۱۰).

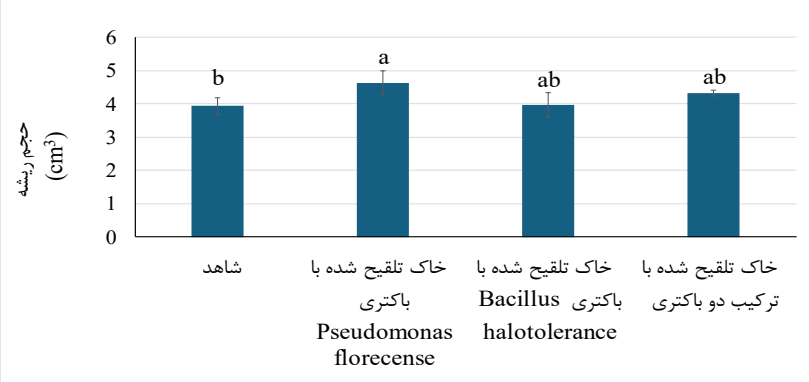


شکل ۱۰ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی طول ریشه گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

با مقایسهٔ سطوح آبیاری، بیشترین حجم ریشه در سطح ۷۵ درصد (۴/۶۳ سانتی‌مترمکعب) بود که با ۱۰۰ درصد اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱۱). در بین تیمارهای تلقیح‌شده با باکتری، بیشترین حجم ریشه در باکتری *P.fluorescens* (۴/۶۳ سانتی‌مترمکعب) بود که با شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد داشت و با سایر تیمار تلقیح‌شده با باکتری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. (شکل ۱۲). همچنین اثر متقابل باکتری و سطوح آبیاری از نظر آماری معنی‌دار نبود.

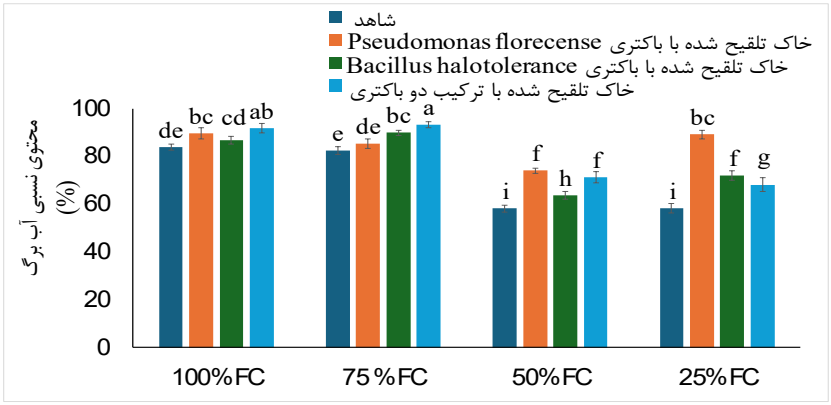


شکل ۱۱ - بررسی تنش خشکی روی حجم ریشه (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه



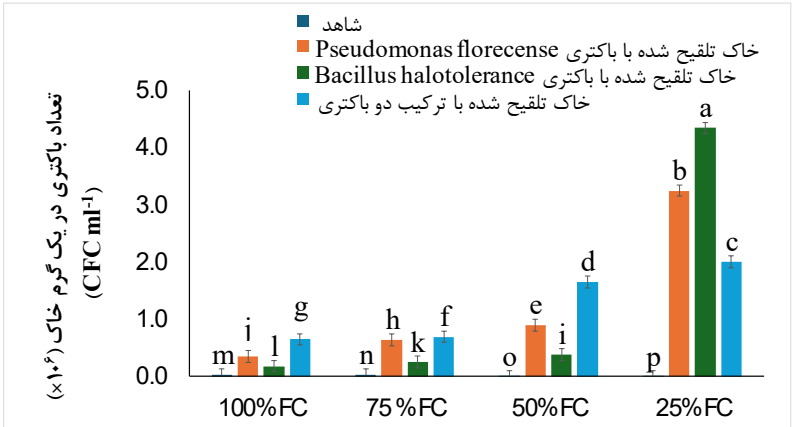
شکل ۱۲ - بررسی اثر باکتری روی حجم ریشه (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

بیشترین محتوای نسبی آب برگ در تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری در سطح ۷۵ درصد با ۱۱/۳۹ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد که در سطح ۱۰۰ درصد با همان تیمار باکتری اختلاف معنی‌داری نداشت. در سطوح ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین محتوای نسبی آب برگ در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* بود که در سطح ۵۰ درصد با باکتری تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری اختلاف معنی‌داری نداشت. در تنش شدید، بیشترین محتوای نسبی آب برگ در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* بود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی محتوای نسبی آب برگ گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

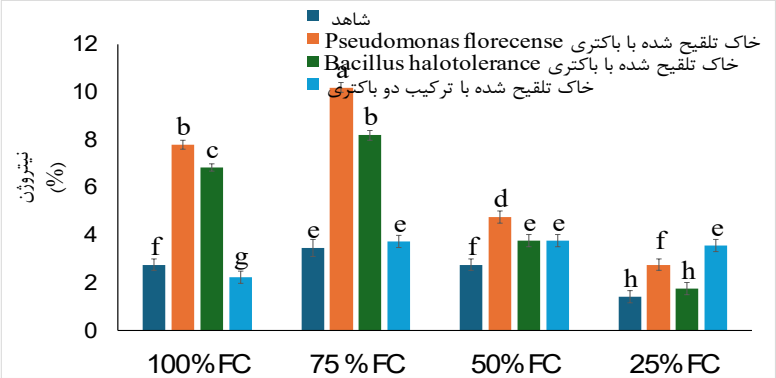
بیشترین تعداد باکتری در سطح ۲۵ درصد همراه با تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* به مقدار ۲۳۱۶/۶۷ درصد افزایش نسبت‌به تیمار تلقیح‌شده با همان باکتری در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود. در سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد بیشترین تعداد باکتری در تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری و کمترین آن مربوط به تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* به‌دست آمد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- بررسی اثر سطوح آبیاری بر تعداد باکتری در یک گرم خاک اطراف ریشه (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

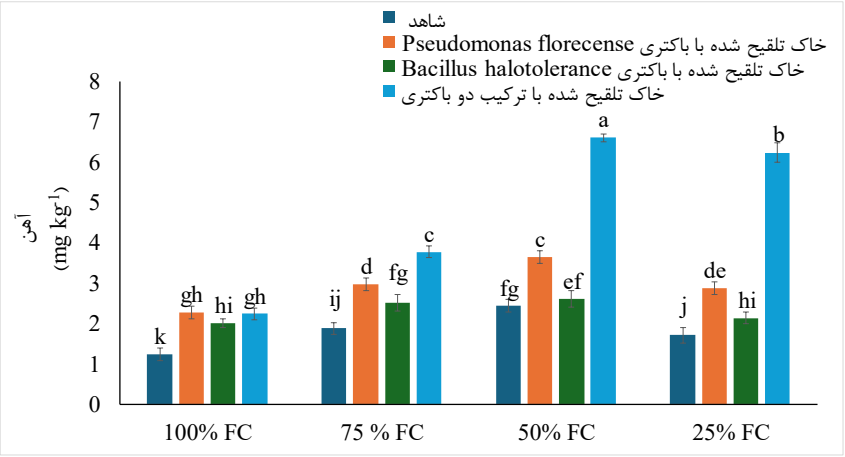
بیشترین مقدار نیتروژن کل گیاه در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی همراه تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* به‌دست آمد (۲۶۸/۲۳ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی). در سطوح ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیز بیشترین مقدار نیتروژن توسط باکتری *P.fluorescens* بود. در تنش شدید بیشترین

مقدار نیتروژن در تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری با ۱۴۹/۶۵ درصد افزایش نسبت‌به شاهد همان سطح آبیاری مشاهده شد (شکل ۱۵).



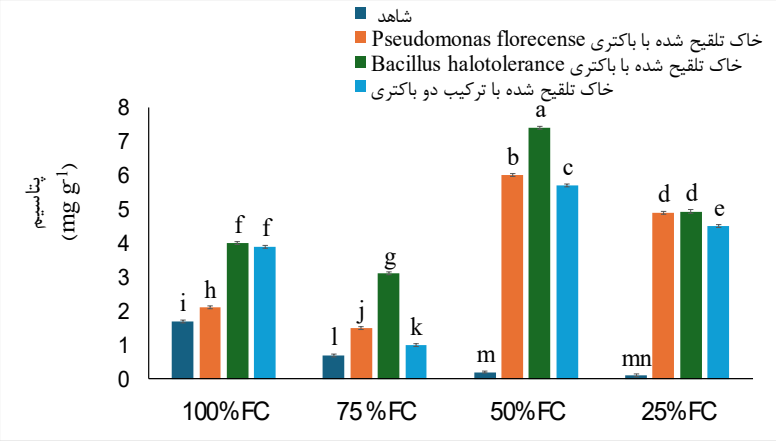
شکل ۱۵ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی درصد نیتروژن کل گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

بیشترین مقدار آهن در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با تیمار باکتری تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری با ۱۷۱/۶۱ درصد افزایش نسبت‌به شاهد همان سطح آبیاری مشاهده شد. در سایر سطوح نیز بیشترین مقدار آهن در تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری بود که در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، بین تیمارهای تلقیح‌شده با باکتری، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در تنش شدید نیز بیشترین مقدار آهن با ۲۶۶/۴۷ درصد افزایش نسبت‌به شاهد همان سطح آبیاری در ترکیب دو باکتری به‌دست آمد (شکل ۱۶).



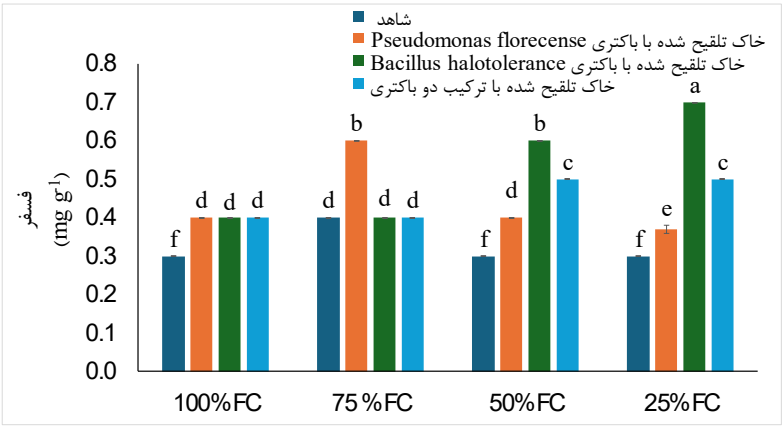
شکل ۱۶ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی مقدار آهن گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

بیشترین مقدار پتاسیم در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* با ۳۳۵/۳ درصد افزایش نسبت به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود. در سایر سطوح آبیاری نیز بیشترین مقدار پتاسیم توسط باکتری *B.halotolerans* به‌دست آمد که در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی با تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* و در سطح ۱۰۰ درصد با تیمار تلقیح‌شده با ترکیب دو باکتری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱۷).



شکل ۱۷ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی مقدار پتاسیم گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

بیشترین مقدار فسفر گیاه در سطح ۲۵ درصد ظرفیت زراعی همراه با تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* با ۱۳۳/۳۳ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌دست آمد. بین تیمارهای تلقیح‌شده با باکتری در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی اختلاف معنی‌دار نبود. در سطح ۷۵ درصد بیشترین مقدار فسفر در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *P.fluorescens* با ۱۰۰ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و در سطح ۵۰ درصد بیشترین مقدار در تیمار تلقیح‌شده با باکتری *B.halotolerans* با ۴۹/۴۶ درصد افزایش نسبت‌به شاهد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود (شکل۱۸).



شکل ۱۸ - بررسی اثر متقابل سطوح آبیاری و باکتری روی مقدار فسفر گیاه کور (میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند در سطح ۵ درصد آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.) FC: ظرفیت زراعی مزرعه

به‌طورکلی با افزایش تنش عملکرد باکتری *B.halotolerans* در جذب عناصر پتاسیم و فسفر بالاتر بوده و باکتری *P.fluorescens* در جذب ازت و آهن عملکرد بالاتری، نسبت‌به *P.fluorescens* داشت.

بحث و نتیجه‌گیری

بیشترین تعداد برگ، طول ساقه، تعداد شاخهٔ فرعی، وزن‌تر و خشک اندام هوایی در سطح ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه باکتری *P.fluorescens* مشاهده شد. در پژوهشی مشابه بیان شد که *P.fluorescens* باعث بهبود صفات بالا در گیاه *Catharanthus roseus* در شرایط تنش خشکی می‌شود [۱۵].

در تنش شدید (۲۵ درصد ظرفیت زراعی)، بیشترین تعداد برگ در ترکیب دو باکتری و بیشترین تعداد شاخهٔ فرعی در *P.fluorescens* دیده شد. در پژوهشی دیگر نیز بیان شد که استفاده از باکتری سودوموناس موجب افزایش تعداد شاخهٔ فرعی در گیاه بادرشبو شده است [۴۱]. همچنین بیشترین وزن‌تر و خشک اندام هوایی و محتوی نسبی آب برگ در *P.fluorescens* حاصل شد. علت این افزایش در گیاهان مایه‌کوبی‌شده با ریزجانداران محرک رشد را می‌توان به سازکار قدرتمند آن‌ها در تنظیم اسمزی [۱ و ۳۳]، بهبود سیستم ریشه‌ای و افزایش سطح جذبی ریشه‌ها، افزایش کارایی مصرف آب و بهبود روابط آبی گیاه دانست [۸ و ۱۹].

بیشترین محتوی نسبی آب برگ در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی همراه با ترکیب دو باکتری (۹۳/۲۷ درصد افزایش) به‌دست آمد. در پژوهشی دیگر مشاهده کردند که باکتری‌های محرک رشد باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ نسبت‌به تیمار شاهد شدند [۳۵]. گیاهان، به‌خصوص گیاهان مرتعی و بیابانی، برای ادامهٔ بقای خود و مقابله با تنش‌های محیطی، از جمله کمبود آب، مکانیسم‌های متفاوتی داشته و موجب تغییرات مرفولوژیکی در گیاه می‌شوند. افزایش طول ریشه از جمله این تغییرات است. گیاه در شرایط تنش خشکی به‌منظور دسترسی به آب، انرژی بیشتری را صرف رشد ریشه و افزایش طول آن می‌کند. در پژوهش حاضر نیز بیشترین طول ریشه در تنش شدید همراه با باکتری *B.halotolerans* مشاهده شد. بر طبق نتایج و نقش عنصر فسفر در گیاهان که موجب افزایش رشد اندام زیرزمینی و طول ریشه می‌شود [۱۰]. به‌نظر می‌رسد باکتری باسیلوس با تولید اسید فسفاتاز و اسیدهای آلی برای حل‌کردن و آزادکردن فسفات‌های غیرمحلول، موجب افزایش سطح دسترسی گیاه به فسفر جذب می‌شود و در افزایش طول ریشه و افزایش امکان دسترسی گیاه به آب مؤثر است و موجب مقاومت بیشتر گیاه کور در شرایط تنش شدید می‌شود.

بیشترین تعداد باکتری در ۲۵ درصد ظرفیت زراعی همراه با *B.halotolerans* حاصل شد. باسیلوس‌ها توانایی بیشتری در حفظ زیست‌تودهٔ خود در برابر تنش‌های اسمزی که ناشی از خشکی و تجمع نمک است، دارند. آن‌ها می‌توانند ترکیبات اسمولیت‌های سازگار (مانند پرولین یا بتائین) را در داخل سلول‌های خود تولید کنند تا تعادل اسمزی را حفظ کرده و از هدردادن آب جلوگیری کنند [۲۴]. باکتری‌هایی مانند *Bacillus halotolerans* در تنش خشکی پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی تولید می‌کنند که خاک اطراف ریشه را مرطوب‌تر نگه می‌دارد. این لایهٔ رطوبتی سبب حفظ محیط میکرو و تسهیل رشد موضعی باکتری می‌شود [۲۹].

پتاسیم یک درشت‌مغذی ضروری است که نقش مهمی در تنظیم اسمزی و حفظ تورژسانس سلولی گیاه دارد [۷]. بیشترین پتاسیم در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با *B.halotolerans* مشاهده شد. به‌نظر می‌رسد این باکتری با تولید فیتوهورمون‌ها و کاهش تنش‌های ثانویه، موجب بهبود رشد گیاه شده و توانایی گیاه برای جذب فعال پتاسیم از طریق فعالیت آنزیم‌های غشایی را بهبود بخشیده است [۲۹]. در تنش شدید بیشترین مقدار پتاسیم در تیمار *P.fluorescens* حاصل شد که با *B.halotolerans* اختلاف معنی‌دار نداشت و در سطح ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در تیمار باکتری *B.halotolerans* بیشترین مقدار پتاسیم به‌دست آمد. تنش خشکی عمدتاً از طریق کاهش حرکت جرمی و کاهش نفوذ بر دسترسی گیاه به عناصر اثر می‌گذارد [۱۴].

آب به‌عنوان حامل مواد غذایی محلول مانند نیترات به سمت ریشه عمل می‌کند. با کاهش رطوبت، این حرکت بسیار کند می‌شود. حرکت عناصر کم‌تحرک (مانند فسفر و بسیاری از ریزمغذی‌ها) در خاک از مناطقی با غلظت بالا به سمت سطح ریشه عمدتاً وابسته به لایه نازکی از رطوبت اطراف ذرات خاک است [۲۴]. خشکی این لایه رطوبتی را از بین می‌برد و نفوذ را مختل می‌کند. تنش خشکی باعث کاهش پتانسیل اسمزی خاک شده و جابه‌جایی عناصر غذایی از جمله پتاسیم را در ریزوسفر و داخل گیاه مختل می‌سازد [۴۱]. در مراحل اولیه خشکی، ممکن است غلظت K^+

در محلول خاک به‌دلیل کاهش حجم آب افزایش یابد و موجب تحریک مکانیسم‌های دفاعی در گیاه شوند. بسیاری از گیاهان با افزایش جذب پتاسیم سعی در حفظ پتاسیل اسمزی و تورژسانس سلولی دارند [۳۲].

با این حال، در خشکی شدید، اگرچه پتاسیم ممکن است همچنان در خاک وجود داشته باشد، اما نفوذ و حرکت آن به سمت ریشه مختل می‌شود و گیاه نمی‌تواند به اندازه کافی آن را جذب کند. پتاسیم با تنظیم فشار تورژسانس سلولی مؤثر در باز و بسته شدن روزنه‌ها، نقش اساسی در تعادل آب گیاه دارد [۶]. تأمین کافی پتاسیم می‌تواند موجب افزایش ظرفیت نگهداری آب در برگ‌ها و ریشه‌ها گردد. به‌علاوه، پتاسیم در تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و پراکسیداز مؤثر است که نقش محافظتی در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از خشکی دارند [۴۲].

آهن اغلب به‌صورت یون‌های محلول Fe^{2+} یا کمپلکس‌های آهن سه‌ظرفیتی نامحلول وجود دارد. دسترسی گیاه به آن از طریق اسیدی کردن محیط اطراف ریشه است [۲۱]. در تنش خشکی با خشک شدن خاک، نفوذ کم شده و جذب آهن دشوارتر می‌شود. در پژوهش حاضر بیشترین آهن در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با ترکیب دو باکتری دیده شد. در تنش شدید بیشترین مقدار آهن در ترکیب دو باکتری مشاهده شد. باکتری‌های ریزوسفری غیرهمزیست، از راه‌های گوناگون مانند تولید هورمون‌های اکسین و سیتوکنین، افزایش رهاسازی عناصر غذایی، جذب عناصر غذایی و همچنین جلوگیری از اثرات زیان‌آور تنش‌های محیطی سبب افزایش رشد گیاه می‌شود [۲۵].

فسفر (به شکل فسفات) یکی از کم‌تحرک‌ترین عناصر در خاک است و تحرک آن تقریباً به‌طور کامل وابسته به‌نفوذ است. تنش خشکی به‌شدت بر جذب فسفر تأثیر منفی می‌گذارد [۲۸ و ۲۶]. بدون آب کافی، یون‌های فسفات نمی‌توانند از فاصله زیاد به ریشه برسند. خشکی می‌تواند باعث افزایش pH موضعی در اطراف ریشه (به‌دلیل تجمع نمک‌ها) شود که این امر می‌تواند تثبیت فسفر را با کلسیم، منیزیم یا آهن افزایش دهد و آن را از دسترس خارج کند [۱۵]. در این پژوهش با افزایش تنش عملکرد باکتری *B.halotolerans* در جذب عناصر پتاسیم و فسفر بالاتر بوده است. باکتری *Bacillus subtilis* گونه دیگری از باکتری باسیلوس است که به‌عنوان باکتری ریزوسفری محرک رشد گیاه به‌خصوص از نظر انحلال فسفات‌های نامحلول و نیز تولید سیدروفور شناخته شده است [۳۰ و ۳۸].

نیتروژن معدنی خاک عمدتاً به دو شکل نیترات NO_3^- و آمونیوم NH_4^+ وجود دارد. آمونیوم دارای بار مثبت بوده و به ذرات رس و مواد آلی می‌چسبد، درحالی‌که نیترات دارای بار منفی است و آزادانه در محلول خاک حرکت می‌کند [۱۱]. بنابراین در تنش خشکی جذب آمونیوم کمتر از نیترات تحت تأثیر قرار می‌گیرد، زیرا جذب آن بیشتر به تماس مستقیم ریشه وابسته است. علاوه‌بر آن آمونیاک‌سازی و نیترات‌سازی، توسط موجودات خاکزی صورت می‌گیرد. هر عاملی که تعداد و فعالیت این موجودات را تحت تأثیر قراردهد، بر سرعت معدنی‌شدن نیز تأثیرگذار خواهد بود [۲۰]. بیشترین مقدار نیتروژن‌کل گیاه در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، به‌همراه باکتری *P.fluorescens* به دست آمد. در تنش شدید باکتری *P.fluorescens* در جذب ازت و آهن عملکرد بالاتری نسبت‌به *B.halotolerans* داشته‌است. به‌نظر می‌رسد سودوموناس با تولید سیدروفورها، موجب گرفتن آهن از خاک و تبدیل آن به فرم قابل جذب در برای گیاه شده است.

به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت استفاده از ترکیب دو باکتری به‌عنوان یک کودزیستی در شرایط تنش خشکی می‌تواند در افزایش جذب عناصر غذایی چون نیتروژن، آهن و فسفر و به‌دنبال آن بهبود برخی صفات مرفولوژیکی گیاه کور، مؤثر باشد البته شایان یادآوری است که استفاده هر کدام از باکتری‌ها به تنهایی نیز در بهبود تعدادی از صفات مرفولوژیکی مؤثر بوده است. به‌طوریکه باکتری *P.fluorescens* در شرایط تنش خشکی شدید، با افزایش جذب عناصر غذایی چون ازت و آهن محیط و باکتری *B.halotolerans* با افزایش

جذب فسفر در شرایط تنش شدید خشکی با اثری که بر روی اندام هوایی و زیرزمینی گیاه می‌گذارد موجب افزایش مقاومت گیاه کور نسبت‌به کم‌آبی می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله بر گرفته از رساله دکتری در رشته مدیریت بیابان دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد است لذا بدین وسیله از همکاری مسئولین گلخانه و آزمایشگاه‌های آن دانشکده تشکر و قدردانی می‌شود.

References

[1]. Akbari, T., Rostami, M., Ghabooli, M. and Movahedi, Z., (2021). Effect of Piriformospora indica on reducing the negative effects of salinity stress in lemon balm (*Melissa officinalis*). *Journal of Crop Science Research in Arid Regions, 2(2)*: 219-228. https://sid.ir/paper/374121/en [in Farsi]

[2]. Allahyari, Z., Fard, F. R., Saharkhiz, M. J., Sepehri, M., Sadeghnezhad, E., Naddaf, F., Bonito, G. & Molkabadi, R. S. (2026). Co-inoculation with *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida* mitigates morphological and physiological effects of drought stress in *Stevia rebaudiana*. *South African Journal of Botany, 193,* 1-14. doi:10.1016/j.sajb.2026.03.046

[3]. Baladi, R., Nabipour, M. & Farzaneh, M. (2022). Investigation of some physiological and antioxidant responses of caper (*Capparis spinosa* L.) plant to salt stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 15(3)*, 741-750. doi: 10.22077/escs.2021.4024.1954 [in Farsi]

[4]. Beringer, T., Lucht, W., & Schaphoff, S. (2011). Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *Global Change Biology Bioenergy 3,* 299–312. https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x

[5]. Besharati, H. (2022). Plant growth-promoting bacteria and their application in agriculture. *Soil Biology, 10(2),* 135-162. doi: 10.22092/sbj.2022.342121.191 [in Farsi]

[6]. Cakmak, I. (2005), The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168*: 521-530. https://doi.org/10.1002/jpln.20042048

[7]. Dehghani Bidgoli R, Ghiaci Yekta M. (2019). Investigating the Effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (*Pseudomonas putida* R112) on Essential Oil of *Rosmarinus officinalis* L. under Irrigation of Urban Purified Wastewater. *Journal of Medicinal Plants, 18 (72)* :212-226 https://jmp.ir/article-1-2555-fa.html [in Farsi]

[8]. Egamberdieva, D., (2009). Alleviation of salt stress by plant growth regulators and IAA producing bacteria in wheat. *Acta Physiologiae Plantarum, 31(4)*: 861 864. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0297-0

[9]. Emami, A. & Ahi, A. (2009). Medicinal Botany. Iran University of Medical Sciences and Health Services, Tehran. 124-125. [in Farsi]

[10]. German, M. A., Burdman, S., Okon, Y., & Kigel, J. (2000). Effects of *Azospirillum brasilense* on root morphology of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under different water regimes. *Biology and Fertillity of Soils 32*: 259-264. https://doi.org/10.1007/s003740000245

[11]. Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management (8th ed.). Pearson Education.

[12]. Heidarpour Monfared, A., Pourmajidian, M. R., Rejali, F., Hojati, M. and Ramak, P. (2021). The impact of biological inputs on drought stress resistance in *Celtis caucasica* L. seedlings. *Advanced Environmental Sciences, 19(2)*, 39-56. doi: 10.52547/envs.31318 [in Farsi]

[13]. Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil, 237(2),* 173–195. https://doi.org/10.1023/A:1013351617532

[14]. Hu, Y., & Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168(4)*, 541–549. https://doi.org/10.1002/jpln.200420516

[15]. Jaleel, C. A., Manivannan, P., Sankar, B., Kishorekumar, A., Gopi, R., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2007). *Pseudomonas fluorescens* enhances biomass yield and ajmalicine production in *Catharanthus roseus* under water deficit stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 60(1)*, 7-11. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.05.012

[16]. Jett, B. D., Hatter, K. L., Huycke, M. M., & Gilmore, M. S. (1997). Simplified agar plate method for quantifying viable bacteria. *Biotechniques, 23(4)*, 648-650. https://doi.org/10.2144/97234bm22

[17]. Kalra, Y. (1997). Handbook of reference methods for plant analysis, New York: CRC Press.

[18]. karami, S. , zarei, M. , yasrebi, J. , karimian, N. and Moosavi, S. A. (2016). Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on the Concentration and Uptake of Macro Nutrients by Corn in a Cd-contaminated Calcareous Soil under Drought Stress. *Water and Soil, 30(4)*, 1170-1179. doi: 10.22067/jsw.v30i4.44237 [in Farsi]

[19]. Khalvandi, M., Amerian, M., Pirdashti, H., Baradaran, M. and Golami, A., (2017). Piriformospora indica symbiotic effect on the quantity and quality of essential oils and some physiological parameters of peppermint (*Mentha piperita*) under salt stress. *Journal of Plant Process and Function, 6(21)*, 169-184. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-616-en.htm

[20]. Khosravi, H. (2022). The role of biomineralization of nitrogen in organic matter in the decomposition of crop residues. *Iranian Journal of Biology, 6(11),* 84-91. https://sid.ir/paper/1043278/en [in Farsi]

[21]. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal, 42(3)*, 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x

[22]. Loffler, G. M., Rauch, T. L., Busch, R. H. (1985). Grain and plant protein relationship in hard red spring weat. *Crop Science, 25,* 521-524

[23]. Maisnam, P. (2023). *Effects of drought on dryland soil microbial community and functional attributes*. Doctoral dissertation, Sydney Universi . doi: https://doi.org/10.26183/mexf-2g26

[24]. Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press, London. ISBN: 978-0123849052

[25]. Mehboob, I., Naveed, M. and Zahir, Z. A. (2009). Rhizobial Association with Non-Legumes: Mechanisms and Applications. *Critical Review of Plant Sciences, 28*, 432-456. https://doi.org/10.1080/07352680903187753

[26]. Najafi Zilaie M, Mosleh Arani A, Etesami H. (2023). The effects of plant growth promoting rhizobacteria on the morphological and physiological characteristics of *Haloxylon aphyllum* under dust stress. *Plant Process and Function. 12(56)*, 109-130. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1826-fa.html [in Farsi]

[27]. Olsen, S. R. & Sommers, L. E. (1982). Phosphorous. – In: Methods of soil analisis. *Soil Science Society of America Journal*, 423-424.

[28]. Plaxton, W. C., & Tran, H. T. (2011). Metabolic adaptations of phosphate-starved plants. *Plant Physiology, 156(3),* 1006–1015. https://doi.org/10.1104/pp.111.175281

[29]. Rafanomezantsoa, P., El-Hasan, A., & Voegele, R. T. (2025). Potential of *Bacillus halotolerans* in mitigating biotic

and abiotic stresses: A comprehensive review. *Stresses, 5(2),* 24. https://doi.org/10.3390/stresses502002

[30]. Rai, M. K. (2006). Hand book of microbial biofertilizers. Food products press, an imprint of the Haworth press, Inc. PP: 137-182 .

[31]. Rajkumar, M., Bruno, L. B. & Banu, J. R., (2017). Alleviation of environmental stress in plants: the role of beneficial Pseudomonas spp. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 47(6)*, 372-407. doi:10.1080/10643389.2017.131861

[32]. Reddy, A. R., Chaitanya, K. V., & Vivekanandan, M. (2004). Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology, 161(11),* 1189–1202. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013

[33].Ritchie, S. W., & Nguyen, H. T. (1990). Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science, 30,* 105-111. http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x

[34]. Rowell, D. L. (1999). Methods and Applications. Longman Group, Harlow. Soil Science, p:345.

[35]. Safari, D. & Azadikhah, M. (2019). Effect of *Pseudomonas fluorescent* bacteria on growth stimulation of some physiological indices, yield components of rapeseed under salt stress. *Crop physiology journal, 11(42)*, 67-83. doi: magiran.com/p2017614. [in Farsi]

[36]. Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiology, 156(3),* 997–1005. doi:10.1104/pp.111.175232

[37]. Sweeney, D. W., Long, J. H., & Kirkham, M. B. (2003). A single irrigation to improve early maturing soybean yield and quality. *Soil Science Society of America Journal*, *67*(1), 235-240. https://doi.org/10.2136/sssaj2003.2350

[38]. Tanveer, Y., Yasmin, H., Nosheen, A., Farah, M. A., & Altaf, M. A. (2024). Synergizing *Bacillus halotolerans*, *Pseudomonas sihuiensis* and *Bacillus atrophaeus* with folic acid for enhanced drought resistance in wheat by metabolites and antioxidants. *BMC plant biology, 24(1),* 1003. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05609-0

[39]. Trnka, M., Olesen, J. E., & Kersebaum, K. C. (2011). Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology, 17,* 2298–2318. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02396

[40]. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences, 14(4),* 7370–7390.

[41]. Yousefzadeh, S., Modarres-Sanavy, S., Sefidkon, F., Asgarzadeh, A. , Ghalavand, A. , Roshdi, M. & Safaralizadeh, A. (2013). Effect of biofertilizer, azocompost and nitrogen on morphologic traits and essential oil content of *Dracocephalum moldavica* L. in two regions of Iran. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 29(2),* 438-459. doi: 10.22092/ijmapr.2013.2867. [in Farsi]

[42]. Zhao, D., Oosterhuis, D. & Bednarz, C. (2001). Influence of Potassium Deficiency on Photosynthesis, Chlorophyll Content, and Chloroplast Ultrastructure of Cotton Plants. *Photosynthetica 39(1),* 103–109. https://doi.org/10.1023/A:1012404204910

The effect of *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus halotolerans* bacteria on improving some morphological traits of the medicinal plant *Capparis spinosa* L. under drought stress
(Research Paper)

1- Vahideh Negahban, PhD Student, Department of Arid and Desert Regions Management, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University, Yazd, Iran.
2- Ali Akbar Karimian*, Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resouhrces and Desertification, Yazd University, Yazd, Iran.
akarimian@yazd.ac.ir
3- Hamid Sodaiezadeh, Professor, Department of Arid and Desert Regions Management, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University, Yazd, Iran.
4- Maryam-Sadat Mirbagheri Firouzabad, Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Biology, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 28 Jun. 2026
Accepted: 19 Oct. 2026

Abstract
Drought stress is one of the main environmental factors affecting the reduction of plant growth and production. Growth-promoting bacteria increase plant tolerance to environmental stresses, including drought, through various mechanisms. The aim of this study was to investigate the effect of growth-promoting bacteria as a biofertilizer in increasing the tolerance of *Capparis spinosa* to drought stress. The experiment was conducted as a factorial in a completely randomized design with three replications in the research greenhouse of the Faculty of Natural Resources, Yazd University. The study factors included irrigation regime at four levels (100, 75, 50, and 25% of field capacity) and bacteria at four levels (no bacteria, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus halotolerans,* and a combination of both bacteria). The results showed that under severe stress (25% of field capacity), the highest number of leaves (104.71% increase compared to the control of 25% of field capacity), nitrogen (149.65% increase), and iron (266.47% increase) were in the treatment inoculated with a combination of two bacteria. The highest number of lateral branches (166.67% increase), fresh and dry weight of aerial organs (25 and 28.45% increase, respectively), relative leaf water content (52.96% increase) in the treatment inoculated with *P. fluorescens* bacteria, the highest stem length (20.57% increase), number of bacteria (2316.67% increase compared to the treatment inoculated with the same bacteria at 100% field capacity), and phosphorus (116.98% increase) and potassium (335.3% increase) elements of the plant were obtained in the treatment inoculated with *B. halotolerans* bacteria. In general, it can be concluded that the use of growth-promoting bacteria as a biofertilizer under drought stress conditions can be effective in increasing the absorption of nutrients such as nitrogen, iron, and phosphorus, and subsequently improving some morphological traits of the blind plant.

Keywords: *Capparis spinosa* L.*,* Growth-promoting bacteria, nitrogen, phosphorus.