



اثرات باکتری‌های محرک رشد و سطوح آبیاری بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.)

ساناز رجبی‌خمسه^۱، عبدالرزاق دانش‌شهرکی^{۲*}، محمد رفیعی‌الحسینی^۲، کرامت‌الله سعیدی^۲، و مهدی قبادی‌نیا^۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۴

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۹/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۶

چکیده

به منظور بررسی تاثیر باکتری‌های محرک رشد و سطوح مختلف آبیاری بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد کتان روغنی، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد در سال زراعی ۱۳۹۴ اجرا شد. فاکتور اصلی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰ درصد آبیاری کامل، به‌عنوان شاهد، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل) و فاکتور فرعی در هفت سطح کاربرد باکتری‌محرک رشد گیاه (عدم تلقیح باکتریایی، به‌عنوان شاهد و تلقیح بذر با باکتری‌های *Azotobacter* SP. strain1، *Bacillus amyloliquefaciens* SP. strain2، *Pseudomonas putida chroococcum* و *Azospirillum lipoferum*) بودند. اثرات متقابل آبیاری و تلقیح باکتریایی، بر محتوای آب نسبی برگ، پایداری غشای سلولی، محتوای کلروفیل‌های a، b، کاروتنوئید و نسبت کلروفیل‌های a/b، کارایی مصرف آب، تعداد کپسول در بوته، وزن هزار دانه و عملکرد دانه معنی‌دار ولی بر تعداد دانه در کپسول غیرمعنی‌دار برآورد شدند. بیشترین مقادیر در صفات مورد بررسی در هر سطح آبیاری متعلق به تیمارهای باکتریایی بود. بیشترین عملکرد دانه در تیمار باسیلوس سویه ۱ در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل با افزایش ۶۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد حاصل شد. در بررسی اثر اصلی آبیاری بر تعداد دانه در کپسول، تیمار آبیاری کامل با تفاوت معنی‌دار نسبت به سایر سطوح از بیشترین تعداد دانه در کپسول برخوردار بود، تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس در میان تیمارهای باکتریایی، بیشترین تعداد دانه در کپسول را نشان داد به گونه‌ای که افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار عدم تلقیح داشت. تیمارهای باسیلوس سویه ۱، باسیلوس آمیلولیکوفسینس و ازتوباکتر نسبت به سایر تیمارهای باکتریایی از تاثیر بیشتری بر افزایش صفات مورد بررسی تحت شرایط نرمال و تنش برخوردار بودند. با توجه به نتایج این پژوهش، استفاده از باکتری‌های محرک رشد می‌توانند موجب افزایش تولید در گیاه کتان روغنی تحت شرایط کمبود آب شوند.

واژگان کلیدی: آزوسپیریلیوم، پرایمینگ، سودوموناس، فتوسنتز، PGPR.

۱- دانشجوی دکتری زراعت گرایش فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

مقدمه

دانه‌های روغنی از نظر تأمین کالری و انرژی مورد نیاز انسان و دام در بین محصولات کشاورزی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشند (Dabighi et al., 2016). کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.) گیاهی است که از روغن و فیبر آن در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، دارویی و پزشکی استفاده می‌گردد (Ludvikova and Griga, 2015). دانه‌های کتان روغنی محتوی ترکیبات و اجزای فعال بیولوژیکی شامل لینولنیک اسید، لینولئیک اسید و لیگنان‌ها می‌باشند (Young Shim et al., 2014) که سبب کاهش سرعت تشکیل کلون‌های سرطانی می‌گردند (Silska, 2017).

خشکی به‌عنوان یکی از تنش‌های محیطی نقش اساسی در کاهش تولیدات گیاهی در جهان دارد (Meher et al., 2018). کشور ایران بر روی یک کمربند بسیار خشک واقع شده که در آن بارندگی بسیار کم و محدود بوده بنابراین بیشتر بخش‌های آن خشک و نیمه‌خشک هستند (Eskandarinejad et al., 2015). امروزه جهت کاهش اثرات مخرب تنش خشکی بر گیاهان از راهکارهای مختلفی استفاده می‌شود. یکی از این راه‌ها استفاده از تکنیک پرایمینگ می‌باشد (Soltani and Soltani, 2015). تکنیک پرایمینگ بذر را می‌توان شامل تیمارهایی با تاثیر بر وضعیت متابولیسی، بیوشیمیایی و آنزیمی بذر در راستای ایفای بهتر وظایف زیستی که در راس آنها جوانه‌زنی و استقرار گیاه است، دانست (Farooq et al., 2006). یکی از روش‌های پرایمینگ، پیش‌تیمار بذر با میکروارگانسیم‌های مفید (Shaukat, 2013) از جمله باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) می‌باشد. این باکتری‌ها از

طریق تولید هورمون‌های آبسزیک اسید، جیبرلیک اسید، سیتوکینین‌ها و ایندول استیک اسید، تولید ACC-دآمیناز جهت کاهش سطوح هورمون اتیلن، القای تحمل سیستماتیک به دلیل تولید ترکیبات باکتریایی و تولید آگزوپلی ساکاریدهای باکتریایی (Timmusk et al., 2014) سبب بهبود رشد گیاهان تحت شرایط نرمال و تنش می‌گردد. باکتری‌های جنس *Azotobacter*, *Agrobacterium*, *Micrococcous*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Burkholderia* و *Enterobacter* از جمله مهم‌ترین باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌باشند که رشد، نمو و عملکرد گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Bhattacharyya and Jha, 2012). افزایش در محتویات کلروفیل در تاج‌ریزی سیاه (*Solanum nigrum*) تحت کاربرد سویه‌هایی از باکتری‌های محرک رشد آزوسپیریلیوم، ازتوباکتر، باسیلوس و سودوموناس گزارش شده است (Megala and Paranthaman, 2017). در گیاه گوجه‌فرنگی، سویه‌های باکتریایی از طریق فعالیت آنزیم ACC-دآمیناز، تولید ایندول استیک اسید، انحلال فسفر، معدنی نمودن فیتات و تولید سیدروفور سبب افزایش تعداد میوه و در نهایت عملکرد محصول گردیدند (Gururani et al., 2013). از آنجا که تنش کم‌آبی یکی از موانع اصلی در تولید محصولات زراعی و باغی در بسیاری از نقاط دنیا به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون ایران محسوب می‌شود، از این رو آرایه راهکارهای موثر در کاهش آثار منفی خشکی از اهداف مهم پژوهش‌های زراعی به‌شمار می‌رود. تاکنون آزمایش‌های اندکی در خصوص واکنش گیاه کتان روغنی با گونه‌های مختلف باکتری‌های محرک رشد گیاه تحت تنش کمبود آب منتشر

جمعیت تقریبی $10^8 \times 5$ سلول باکتری در هر میلی لیتر مایه تلقیح بودند (Naderi, 2012). ساعاتی قبل از کشت، بذور استریل شده به مدت دو ساعت (در دمای اتاق) در آب مقطر برای تیمار شاهد و سوسپانسیون باکتریایی برای تیمارهای تلقیحی فرو برده شدند (Naderi, 2012). پس از دو ساعت تلقیح، بذرها به صورت مسطح در کرت‌هایی به ابعاد $1 \times 1/5$ متر مربع شامل ده خط کشت به طول یک متر و با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر و با رعایت اصول بهداشتی، به صورت دستی کشت و بلافاصله آبیاری شدند (Khajepour, 2004). آبیاری تا زمان اعمال تنش‌ها برای همه تیمارها به صورت غرقاب انجام شد. اعمال تنش‌ها از مرحله رشد طولی ساقه صورت گرفت. جهت تعیین زمان و میزان آبیاری، با در نظر گرفتن حد تخلیه مجار (MAD) گیاه، حد پایین رطوبت قابل دسترس (θ_{MAD}) از رابطه زیر (Farshi et al., 2003; Bellingham, 2009) محاسبه شد:

$$\theta_{MAD} = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times MAD$$

در رابطه فوق θ_{FC} رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی مزرعه، θ_{PWP} رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائمی و MAD ضریب تخلیه مجاز می‌باشد. رطوبت خاک به صورت روزانه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج SM300 ساخت شرکت دلتا-تی اندازه‌گیری شد. زمانی که رطوبت خاک به حد θ_{MAD} می‌رسید آبیاری برای تیمار شاهد طبق روابط زیر محاسبه و اعمال می‌شد:

$$V_w = (\theta_{FC} - \theta_{soil}) \times V$$

$$V = d \times A \times 1000$$

در این روابط V_w حجم آب مورد نیاز خاک، θ_{soil} رطوبت خاک پیش از آبیاری، V حجم آب

شده است. بنابراین، این تحقیق با هدف بررسی تاثیر این باکتری‌ها بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد این گیاه تحت سطوح مختلف آبیاری اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (۱۰۰ درصد آبیاری کامل یا شاهد که معادل نیاز آبی گیاه است، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل) و باکتری‌های محرک رشد در هفت سطح (عدم تلقیح باکتریایی به‌عنوان شاهد، *Bacillus SP.* strain1, strain2, *Bacillus*, *Azotobacter amyloliquefaciens* و *Pseudomonas putida*, *Chroococcum Azospirillum lipoferum*) بودند. در نیمه اول اردیبهشت ماه مطابق با عرف منطقه، عملیات خاک‌ورزی و تهیه زمین در وضعیت گاورو بودن خاک و با استفاده از گاواهن قلمی به‌علاوه یک بار زدن دیسک سنگین و سپس یک دندان سبک انجام شد و کشت در نیمه دوم اردیبهشت ماه صورت گرفت. باکتری‌های باسیلوس از پژوهشکده زیست فناوری دانشگاه شهرکرد، باکتری‌های ازتوباکتر و سودوموناس از بانک میکروب ایران و باکتری آروسپیریلیوم از موسسه تحقیقات آب و خاک کرج تهیه شدند.

کشت باکتری‌ها سه روز پیش از کشت آغاز شد. مایه تلقیح باکتری‌های مورد آزمایش در تیمارهای تلقیحی با استفاده از محیط کشت TSB و روش کدورت‌سنجی به نحوی تهیه شد که دارای

کلروفیل a به کلروفیل b، Car محتوای کل کارتنوئید، abs مقدار جذب نوری در طول موج‌های مورد نظر می‌باشند که بدین منظور ۰/۲۵ گرم از بافت تازه برگ با مقداری ازت مایع در هاون چینی به طور همگن ساییده شد سپس با ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد مخلوط گردید. مخلوط حاصل پس از سانتریفیوژ شدن توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت و محتوای کلروفیل a، b و کارتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم محاسبه گردید. در مرحله رسیدگی محصول، بوته‌های هر سه تکرار برداشت و تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول در ده بوته به تصادف مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

عملکرد دانه با برداشت کل بوته‌های کرت اندازه‌گیری و بر حسب کیلوگرم در هکتار بیان شد. وزن هزار دانه با شمارش هزار بذر و سپس توزین آن‌ها محاسبه گردید. کارایی مصرف آب در کل دوره رشد گیاه، از تقسیم کل ماده خشک تولیدی گیاه بر میزان آب آبیاری و مقدار بارندگی منطقه محاسبه گردید (Alizadeh, 2005).

$$WUE = TDM / TWU$$

در این رابطه WUE کارایی مصرف آب، TDM کل ماده خشک تولیدی گیاه و TWU مقدار کل آب استفاده شده در طول رشد می‌باشد. تجزیه واریانس نتایج با استفاده از نرم‌افزار SAS، مقایسه میانگین‌ها به روش کمترین اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد و مقایسه میانگین‌برهمکنش‌ها از روش برش‌دهی اثرات متقابل انجام شد.

آبیاری، d عمق موثر ریشه و A سطح کرت می‌باشد. تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل نیز همزمان با تیمارهای شاهد به ترتیب به میزان ۷۵ و ۵۰ درصد آب مورد نیاز تیمارهای شاهد، با کنتور آبیاری شدند. نیاز غذایی گیاه با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۱) و نیاز غذایی کتان روغنی (۴۰ تا ۷۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۱۰ تا ۲۰ کیلوگرم در هکتار فسفر) در مرحله رشد طولی ساقه محاسبه و اعمال گردید (Khajepour, 2004).

در مرحله گلدهی صفات آب نسبی برگ (Yamasaki and Dillenburg, 1999)، پایداری غشای سلولی (Sairam et al., 1997)، محتوای کلروفیل a، b، کارتنوئید و نسبت کلروفیل‌های a/b (Arnon, 1967) بر اساس معادلات زیر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

$$RWC = \frac{DW - FW}{DW - SW} \times 100$$

$$CMS = \left[1 - \left(\frac{EC_1}{EC_0} \right) \right] \times 100$$

در این روابط RWC رطوبت نسبی برگ، DW وزن خشک برگ، FW وزن تر برگ و SW وزن اشباع برگ، CMS شاخص پایداری غشای سلولی، EC₁ هدایت الکتریکی در مرحله اول قرائت و EC₂ هدایت الکتریکی در مرحله دوم قرائت می‌باشند.

$$Chb = [(12.7 * abs663) - (2.6 * abs645)] * \frac{m \text{ Acetone}}{mg \text{ Leaf}}$$

$$Chb = [(22.9 * abs645) - (4.68 * abs663)] * \frac{m \text{ Acetone}}{mg \text{ Leaf}}$$

$$\frac{Cha}{b} = \frac{Cha}{Chb}$$

$$Car = \frac{1000abs470 - 1.8Cha - 85.02Chb}{198} * \frac{ml \text{ Acetone}}{mg \text{ Leaf}}$$

در روابط فوق Chla محتوای کلروفیل a، Chlb محتوای کلروفیل b، Chla/b نسبت

نتایج و بحث

اثرات متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر محتوای آب نسبی برگ، پایداری غشای سلولی، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، کارایی مصرف آب، تعداد کپسول و عملکرد دانه در سطح آماری ۱ درصد و بر وزن هزار دانه در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار بود. اثرات اصلی آبیاری و تلقیح باکتریایی بر تعداد دانه در کپسول نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

محتوای آب نسبی برگ (RWC)

طبق نتایج حاصل، تیمارهای باکتریایی در هر سه سطح آبیاری بیشترین و تیمارهای شاهد از کمترین درصد محتوای آب برگ برخوردار بودند. در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل بیشترین محتوای آب برگ در تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۷۳/۱ درصد (افزایش ۲۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) مشاهده شد. اختلاف معنی‌داری بین این تیمار با تیمارهای باسیلوس سویه ۱، ازتوباکتر و سودوموناس وجود نداشت (شکل ۱-۱A). در ۷۵ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۶۶/۴ (افزایش ۲۸ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین درصد محتوای آب برگ را نشان داد. اختلاف معنی‌داری بین تیمار باسیلوس سویه ۱ با تیمارهای باسیلوس آمیلولیکوفسینس و ازتوباکتر مشاهده نشد (شکل ۱-۱A). در ۵۰ درصد آبیاری کامل، تیمار سودوموناس پوتیدا با میانگین ۶۳/۳ (افزایش ۴۹ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) از بیشترین محتوای آب نسبی برگ برخوردار بود (شکل ۱-۱A). در یک بررسی تاثیر باکتری‌های محرک رشد در افزایش محتوای نسبی آب به آبسزیک اسید باکتریایی که سبب بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تنش خشکی می‌شود

نسبت داده شد (Dodd et al., 2010). در گزارش‌های دیگر افزایش محتوای آب نسبی برگ نسبت به تیمارهای تلقیح‌نشده ممکن است با نقش معنی‌دار باکتری‌ها در فرآیند فتوسنتز، ایجاد برگ‌های سبز و افزایش محتوای آب نسبی برگ از طریق افزایش جذب نیتروژن و کارایی آن در ارتباط باشد (Han and Lee, 2005; Kazemi, 2015). بنابراین باکتری‌های محرک رشد در این بررسی احتمالاً یا از طریق کنترل بسته شدن روزنه‌ها به واسطه افزایش سطوح اسید آبسزیک و در نتیجه تاخیر در از دست دادن آب و یا با بهبود سیستم فتوسنتزی سبب افزایش در میزان محتوای آب نسبی برگ‌ها شده‌اند.

پایداری غشای سلولی (CMS)

مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد با افزایش تنش میزان پایداری غشای سلولی کاهش یافت ولی تیمارهای باکتریایی در هر سه سطح تنش از بیشترین میزان پایداری غشای سلولی نسبت به تیمارهای شاهد در هر سطح برخوردار بودند. در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل، تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۶۵ درصد (افزایش ۱۰۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین پایداری غشای سلولی را نشان داد اما اختلاف معنی‌داری با تیمار باسیلوس سویه ۱ نداشت (شکل ۱-۱B). در ۷۵ درصد آبیاری کامل، تیمار ازتوباکتر با میانگین ۴۵/۵ درصد (افزایش ۷۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین پایداری را نشان داد (شکل ۱-۱B). در ۵۰ درصد آبیاری کامل تیمار ازتوباکتر با میانگین ۳۸/۷ درصد (افزایش ۸۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد) از بیشترین پایداری غشای سلولی برخوردار بود (شکل ۱-۱B). تنش آب در قسمت فسفولیپیدی

گرم (افزایش ۳۰۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بود که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای باسیلوس آمیلولیکوفسینس، ازتوباکتر و سودوموناس برخوردار نبود (شکل ۱-C). در بررسی اثرات متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر محتوای کلروفیل b، در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۱/۰۵ میلی‌گرم بر گرم بیشترین محتوای کلروفیل b را نشان داد با این وجود تفاوت معنی‌داری با تیمارهای شاهد و باسیلوس آمیلولیکوفسینس نداشت (شکل ۱-D). در ۷۵ درصد آبیاری کامل، تیمار سودوموناس با میانگین ۱/۳۶ میلی‌گرم بر گرم (افزایش ۳۳ درصدی نسبت به تیمار شاهد) و اختلاف معنی‌دار با سایر تیمارها از بیشترین محتوای کلروفیل b برخوردار بود (شکل ۱-D). در ۵۰ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۰/۸۷ و بدون داشتن تفاوت معنی‌دار با تیمار شاهد بیشترین محتوای کلروفیل b را نشان داد (شکل ۱-D). در بررسی نسبت کلروفیل‌های a/b، در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل تیمار ازتوباکتر با میانگین ۲/۰۸ و اختلاف بسیار چشم‌گیر با تیمار شاهد از بیشترین نسبت کلروفیل a/b برخوردار بود (شکل ۱-E). در ۷۵ درصد آبیاری کامل، تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۲/۸۶ و تفاوت معنی‌دار با سایر تیمارها بیشترین مقدار این نسبت را داشت (شکل ۱-E). در ۵۰ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۱/۴۷ و افزایش معنی‌دار با سایر تیمارها، بیشترین نسبت کلروفیل‌های a/b را نشان داد (شکل ۱-E). در اثر خشکی، ساختار کلروپلاست‌ها به دلیل عدم پایداری کمپلکس رنگیزه-پروتئین آسیب دیده و میزان کلروفیل کاهش می‌یابد (Jalili Marandi, 2010). در مراحل تخریب

دولایه غشا از طریق جابجایی پروتئین‌های غشا و نشت مواد محلول سبب از دست رفتن قابلیت انتخابی غشاء می‌گردد (Jalili Marandi, 2010). در گیاه کتان بیشترین و کمترین نشت یونی به ترتیب در تیمارهای تنش شدید و شرایط نرمال مشاهده شد (Mohammadi Babazeidi et al., 2013). باکتری‌های محرک رشد می‌توانند با مکانیسم‌هایی از جمله تولید اگزوپلی‌ساکاریدها منجر به بهبود جراثت غشا و افزایش رشد گیاه در مقایسه با شاهد گردند (Ashraf et al., 2004). کاهش نشت الکترولیت در گیاهان شبدر تلقیح شده با باکتری‌های محرک رشد تحت شرایط تنش گزارش شده است (Ortiz et al., 2015). طبق نتایج حاصل باکتری‌های محرک رشد می‌توانند سبب پایداری غشاء و کاهش نشت الکترولیت به خصوص تحت شرایط کمبود آب گردند.

محتوای کلروفیل a، b و نسبت

کلروفیل a/b

در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل بیشترین محتوای کلروفیل a در تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۰/۹۱ میلی‌گرم بر گرم (افزایش ۱۹۳ درصدی نسبت به تیمار شاهد) حاصل شد. این تیمار از اختلاف معنی‌داری با تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس برخوردار نبود (شکل ۱-C). در ۷۵ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۰/۷۴ میلی‌گرم بر گرم (افزایش ۳۳۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد) و بدون داشتن تفاوت معنی‌دار با تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس بیشترین محتوای کلروفیل a را داشت (شکل ۱-C). در ۵۰ درصد آبیاری کامل بیشترین محتوای این رنگدانه متعلق به تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۰/۵۷ میلی‌گرم بر

کامل، تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۴/۱۹ (افزایش ۷۵۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین محتوای کارتنوئید را نشان داد (شکل ۱-F). کارتنوئیدها از جمله ترکیبات آنتی‌اکسیدانت غیرآنزیمی می‌باشند که در کاهش غلظت یون سوپراکسید نقش داشته و تشکیل رادیکال هیدروکسیل را نیز کاهش می‌دهند (Candan and Tarhan, 2003). در توت‌فرنگی افزایش در محتویات رنگدانه کارتنوئید تحت کاربرد باکتری‌های محرک رشد *Bacillus* و *Paraburkholderia* در مقایسه با گیاهان تیمار نشده گزارش شده است (Rahman et al., 2018). در ذرت، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و کارتنوئید به‌طور معنی‌داری تحت کاربرد باکتری‌های محرک رشد باسیلوس و سودوموناس در شرایط نرمال و تنش آب افزایش یافت (Yasmin et al., 2017). باکتری‌های محرک رشد در این بررسی احتمالاً با افزایش پایداری کارتنوئیدها به‌عنوان یک ترکیب آنتی‌اکسیدانتی به افزایش مقاومت تحت شرایط کمبود آب و در نتیجه بهبود سایر پارامترهای مورد اندازه‌گیری در این بررسی منجر شده‌اند.

کارآیی مصرف آب (WUE)

در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۱/۰۸ کیلوگرم بر متر مکعب (افزایش ۶۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین کارآیی مصرف آب را داشت اما از اختلاف معنی‌داری با تیمارهای باسیلوس آمیلولیکوفسینس و تیمار ازتوباکتر برخوردار نبود (شکل ۲-A). در ۷۵ درصد آبیاری کامل، تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب (افزایش ۷۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین کارآیی مصرف آب را

کلروفیل، کلروفیل b به کلروفیل a تبدیل شده و به‌همین دلیل سبب افزایش نسبت کاروفیل‌های a/b در سطوح بالای تنشی می‌گردد (Azizpour et al., 2010). احتمالاً باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق جذب بیشتر عناصری چون آهن و منیزیم که نقش اساسی در ساختمان کلروفیل دارند سبب افزایش این رنگدانه می‌گردند (Asghari et al., 2014). باکتری‌های محرک رشد باسیلوس سبب افزایش محتویات کلروفیل در گندم نسبت به گیاهان تیمار نشده گشتند (Moustaine et al., 2016). در گزارشی دیگر، افزایش در محتویات کلروفیل برگ‌ها در گیاهان تیمار شده با سویه‌ای از باکتری سودوموناس، به فعالیت آنزیم ACC-دآمیناز و کاهش خسارت به کلروفیل نسبت داده شد (Teng et al., 2010). بنابراین، باکتری‌های محرک رشد احتمالاً از طریق افزایش جذب عناصر غذایی که در ساختمان کلروفیل‌ها نقش اساسی دارند و همچنین افزایش فعالیت‌های آنزیمی سبب افزایش مقاومت به تنش و در نتیجه کاهش تخریب کلروفیل‌ها تحت شرایط تنش‌زا می‌گردند.

محتوای کارتنوئید

طبق نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری و تلقیح باکتریایی، در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل تیمار سودوموناس پوتیدا با میانگین ۴/۳۶ میلی‌گرم بر گرم (افزایش ۲۴۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد) از بیشترین محتوای کارتنوئید برخوردار بود (شکل ۱-F). در ۷۵ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۴/۳۷ (افزایش ۱۱۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین محتوای کارتنوئید را داشت ولی از افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار آزوسپیریلیوم برخوردار نبود (شکل ۱-F). در ۵۰ درصد آبیاری

تعداد کپسول در بوته

در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل، تیمارهای باسیلوس سویه ۱ و باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۲۵/۸ و اختلاف ۵۲ درصدی با شاهد، بیشترین تعداد کپسول در بوته را داشتند (شکل ۲-۲). در ۷۵ درصد آبیاری کامل، بیشترین تعداد کپسول متعلق به تیمارهای ازتوباکتر، باسیلوس سویه ۱ و باسیلوس آمیلولیکوفسینس با میانگین ۲۰/۵ و افزایش ۳۷ درصدی نسبت به شاهد بود (شکل ۲-۲). تیمارهای باسیلوس سویه ۱، باسیلوس آمیلولیکوفسینس و ازتوباکتر در ۵۰ درصد آبیاری کامل با میانگین ۱۷/۲ و اختلاف ۴۶ درصدی با شاهد بیشترین مقدار را نشان دادند (شکل ۲-۲). در گیاه ماش تعداد غلاف تحت کاربرد باکتری‌های محرک رشد ازتوباکتر، آزوسپیریلیوم، ریزوبیوم، کاربرد دوگانه و سه‌گانه این باکتری‌ها در مقایسه با عدم تلقیح باکتریایی افزایش معنی‌داری داشت (Hossein *et al.*, 2014). گزارش شده است در گیاه برنج، احتمالاً تعداد پانیکول، تعداد دانه در پانیکول و درصد پنجه‌های بارور برنج به دلیل افزایش در بیوماس گیاه، طول شدن ریشه، جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم تحت کاربرد باکتری‌های محرک رشد افزایش یافته است (Elekhtyar, 2015). طبق نتایج حاصل، باکتری‌های محرک رشد با افزایش رشد ریشه سبب افزایش دسترسی به آب و عناصر غذایی گشته و در نتیجه موجب افزایش توسعه سطح برگ، فتوسنتز بیشتر و افزایش رشد قسمت‌های مختلف گیاه و اختصاص مواد بیشتر به بخش‌های رویشی و زایشی می‌گردد.

تعداد دانه در کپسول

تاثیر سطوح مختلف آبیاری بر تعداد دانه در کپسول در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود

نشان داد با این وجود اختلاف معنی‌داری با تیمار باسیلوس سویه ۱ نداشت (شکل ۲-۲). تیمار باسیلوس آمیلولیکوفسینس در ۵۰ درصد آبیاری کامل با میانگین ۱/۴ کیلوگرم بر متر مکعب (افزایش ۷۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین کارایی مصرف آب را نشان داد. این تیمار تفاوت معنی‌داری با تیمار باسیلوس سویه ۱ نداشت (شکل ۲-۲). کارایی مصرف آب میزان بیوماس گیاه در هر واحد از تعرق گیاه می‌باشد و رابطه بین مصرف آب و تولید محصول را نشان می‌دهد. گیاهانی که مقاوم به خشکی هستند یا در محیط‌هایی که کمبود آب وجود دارد رشد یافته‌اند مقدار کارایی مصرف آب بیشتری نسبت به گیاهان رشد یافته در محیط‌های فاقد تنش دارند (Smith *et al.*, 1989). افزایش در راندمان مصرف آب تحت تلقیح باکتریایی می‌تواند به دلیل تولید بیوماس بیشتر حتی در شرایطی که میزان آب در دسترس کمتر است باشد، زیرا اتیلن تولید شده تحت شرایط تنش می‌تواند توسط فعالیت ACC-دآمیناز باکتریایی هیدرولیز شده، در نتیجه بیوماس بیشتری در واحد آب کمتر تولید شود (Zahir *et al.*, 2008).

در گیاه کتان، تیمارهای حاوی قارچ و همچنین ترکیب قارچ و باکتری محرک رشد سودوموناس سبب افزایش معنی‌داری در مقدار عملکرد و همچنین کارایی مصرف آب تحت شرایط تنش خشکی گردیدند (Rahimzadeh and Pirzad, 2017). از این رو باکتری‌های محرک رشد می‌توانند از طریق افزایش محتوای نسبی آب برگ و افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی که در این تحقیق شاهد آن بودیم به تولید بیوماس بیشتر حتی تحت شرایط کمبود آب کمک کرده و در نهایت سبب افزایش کارایی مصرف آب گردند.

نیز در ۵۰ درصد آبیاری کامل با میانگین وزن ۴/۷ گرم و تفاوت ۴ درصدی با شاهد بیشترین مقدار این صفت را داشتند (شکل ۲-C). در یک بررسی افزایش وزن صد دانه گندم در گیاهان تلقیح شده به نقش مثبت باکتری‌های محرک رشد در گسترش ریشه، جذب آب، عناصر غذایی و انتقال آن به گیاه نسبت داده شد (Haghabadori and Seyed Sharifi, 2014). کاربرد باکتری محرک رشد ازتوباکتر سبب افزایش وزن هزار دانه، تجمع ماده خشک، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت جو گردید (Mirshakari et al., 2012). وزن هزار دانه از جمله صفاتی می‌باشد که نقش مؤثری بر میزان عملکرد دانه داشته و همواره به‌عنوان یکی از عوامل سه‌گانه عملکرد محسوب می‌گردد. بنابراین باکتری‌های محرک رشد طی مکانیسم‌های مختلف از جمله تولید هورمون‌های محرک رشد و تامین عناصر غذایی (Hamidi et al., 2007) و در نتیجه امکان تداوم بیشتر دوره پرشدن دانه و در نهایت افزایش وزن دانه می‌توانند در افزایش وزن هزار دانه موثر باشند.

عملکرد دانه

در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۱۶۵۱ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۶۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد) و نداشتن اختلاف معنی‌دار با تیمار باسیلوس آمیلولیکوفوسینس بیشترین عملکرد دانه را نشان داد (شکل ۲-D). در ۷۵ درصد آبیاری کامل، تیمار باسیلوس سویه ۱ با میانگین ۱۱۹۳ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۵۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد) از بیشترین مقدار عملکرد دانه برخوردار بود. این تیمار تفاوت معنی‌داری با تیمار باسیلوس آمیلولیکوفوسینس نداشت (شکل ۱-D). در ۵۰ درصد آبیاری کامل، تیمار باسیلوس سویه ۱ با

(جدول ۲). تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری کامل با بیشترین تعداد دانه در کپسول از افزایش معنی‌دار ۳/۹ و ۶ درصدی به ترتیب نسبت به تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل برخوردار بود (جدول ۳). تاثیر تلقیح باکتریایی نیز بر این صفت در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). بیشترین تعداد دانه در کپسول متعلق به تیمار باسیلوس آمیلولیکوفوسینس بود با این وجود این تیمار از اختلاف معنی‌داری با تیمارهای باسیلوس سویه ۱، باسیلوس سویه ۲ و سودوموناس برخوردار نبود (جدول ۳). کمترین تعداد دانه در کپسول در تیمار شاهد با کاهش ۲۵ درصدی نسبت به تیمار باسیلوس آمیلولیکوفوسینس مشاهده شد (جدول ۳). افزایش تعداد دانه در سنبله گیاهان جو (Hokmalipour and Sharifi, 2015) و گندم (Haghigi et al., 2014) تحت پیش تیمار بذور با باکتری‌های محرک رشد گزارش گردیده است. می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که این باکتری‌ها از طرق مختلف از جمله فراهمی عناصر غذایی و اثر مثبت بر طول دوره پر شدن دانه و همچنین از طریق دوام شاخص سطح برگ و تخصیص بیشتر مواد به دانه می‌توانند سبب افزایش تعداد دانه در کپسول گردند.

وزن هزار دانه

در ۱۰۰ درصد آبیاری کامل، تیمارهای ازتوباکتر و باسیلوس آمیلولیکوفوسینس با میانگین ۵/۹ گرم و افزایش ۵ درصدی نسبت به تیمار عدم تلقیح از بیشترین وزن هزار دانه برخوردار بودند (شکل ۲-C). تیمارهای باسیلوس سویه ۱ و ازتوباکتر در ۷۵ درصد آبیاری کامل با اختلاف ۶ درصدی نسبت به شاهد و وزن ۵/۵ گرم بیشترین وزن را نشان دادند (شکل ۲-C). تیمارهای باسیلوس سویه ۱ و باسیلوس آمیلولیکوفوسینس

بررسی‌های سایر محققان شاهد آن بودیم می‌توانند در نهایت به افزایش عملکرد دانه منجر گردند.

نتیجه‌گیری کلی

طبق نتایج حاصل، با افزایش سطوح تنش خشکی مقادیر صفات مورد اندازه‌گیری به استثنای کارآیی مصرف آب کاهش یافت با این وجود تیمارهای تلقیح باکتریایی سبب تخفیف اثرات تنش گردیدند. از بین تیمارهای باکتریایی در بیشتر صفات مورد بررسی باکتری‌های باسیلوس سویه ۱، باسیلوس آمیلولیکوفسینس و ازتوباکتر بیشترین تاثیر را در بهبود اثرات تنش داشته به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار عملکرد دانه نیز متعلق به این تیمارها بود. در این بررسی تیمارهای باکتریایی احتمالاً از طریق بهبود محتوای آب نسبی برگ، افزایش پایداری غشای سلولی و همین‌طور افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی سبب افزایش عملکرد نهایی به خصوص تحت شرایط تنش گردیده‌اند. افزایش تعداد کپسول و وزن هزار دانه به عنوان اجزای مهم عملکرد نیز تحت تلقیح باکتریایی در شرایط تنش مشاهده شد. بیشترین کارآیی مصرف آب نیز متعلق به تیمارهای باکتریایی تحت شرایط تنش بود. با توجه به نتایج حاصل از این بررسی و مشکلات خشک‌سالی در سال‌های اخیر در بیشتر نقاط کشور، استفاده از اباکتری‌های محرک رشد گیاه به‌عنوان راهکاری مؤثر در جهت بهبود رشد گیاهان زراعی و از جمله کتان روغنی تحت شرایط کمبود آب پیشنهاد می‌گردد.

میانگین ۸۸۵ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۶۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد) بیشترین مقدار عملکرد دانه را داشت با این وجود اختلاف معنی‌داری بین این تیمار با تیمارهای باسیلوس آمیلولیکوفسینس و ازتوباکتر مشاهده نشد (شکل ۱-D). در تفسیر نتیجه حاصله می‌توان گفت از آنجایی‌که تیمارهای باکتریایی باسیلوس سویه ۱، باسیلوس آمیلولیکوفسینس و ازتوباکتر از محتوای آب نسبی برگ، محتوای کلروفیل *a*، کارآیی مصرف آب و اجزای عملکرد بالاتری در مقایسه با سایر تیمارها برخوردار بوده‌اند در نتیجه بالاتر بودن عملکرد در این تیمارها دور از انتظار نخواهد بود. علاوه بر این، توانایی باکتری‌های جنس باسیلوس در تولید سیدروفور، تولید هورمون‌های رشدی مانند اکسین، انحلال و تحرک فسفات در خاک، تولید لیپوپپتیدها و آنزیم‌های هیدرولیتیک، ممانعت از تولید اتیلن و مقاومت سیستماتیک به پاتوژن‌ها (Pindi *et al.*, 2014; Nihorimbere and Ongena, 2017) و باکتری‌های ازتوباکتر در تثبیت نیتروژن، انحلال فسفر، تولید ایندول استیک اسید و تولید آنزیم‌های هیدرولیتیک (Romero Perdomo *et al.*, 2017) را نیز بایستی مد نظر داشت. در گیاه کتان، باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق انحلال فسفر و کمک به تامین مواد مغذی ضروری، عملکرد را افزایش دادند (Neetu *et al.*, 2012). طبق نتایج حاصل از این بررسی که شامل تاثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد بر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشای سلولی، محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، کارآیی مصرف آب و اجزای عملکرد دانه و همچنین مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم دیگر که در

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of site soil

عمق Depth	هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH	ازت کل N	شن Silt	سیلت Silt	رس Clay	کربن آلی O.C	پتاسیم K	فسفر P	هدایت الکتریکی EC	بافت خاک Soil Texture
cm	dS.m ⁻¹			(%)			mg.kg ⁻¹			(dS.m ⁻¹)	
0-30	0.38	7.8	0.11	28	34	38	0.6	470	17.6	0.38	Silty-loam

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک، اجزای عملکرد و عملکرد کتان روغنی تحت تلقیح باکتریایی و سطوح مختلف آبیاری

Table 2-Variance analysis of physiological traits, yield components and yield of flax under bacterial inoculation and different irrigation levels

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f.	محتوای آب نسبی برگ RWC	پایداری غشای سلولی CMS	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل a/b Chl a/b	کارتنوئید Car
تکرار Replication	2	13.4*	0.4 ^{ns}	0.00005 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.03 ^{ns}
آبیاری Irrigation	2	1443.5**	2287.1**	0.2**	0.1**	0.6**	6.5**
خطا Error (a)	4	4.4	1.6	0.001	0.003	0.004	0.03
باکتری Bacteria	6	262.1**	613.6**	0.4**	0.4**	3.2**	4.1**
باکتری×آبیاری Bacteria×Irrigation	12	30.4**	95.8**	0.007**	0.2**	1**	3.9**
خطا Error (b)	36	3.6	1.2	0.0003	0.002	0.004	0.02
ضریب تغییرات (%) C.V.		3.2	3	7	7.3	7.1	6.7

*، ** و ^{ns} به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم وجود اثر معنی‌دار می‌باشند.

*، ** and ^{ns} represent significant at 5%, 1% level of probability and non-significant, respectively.

ادامه جدول ۲-
Table 2-Continued

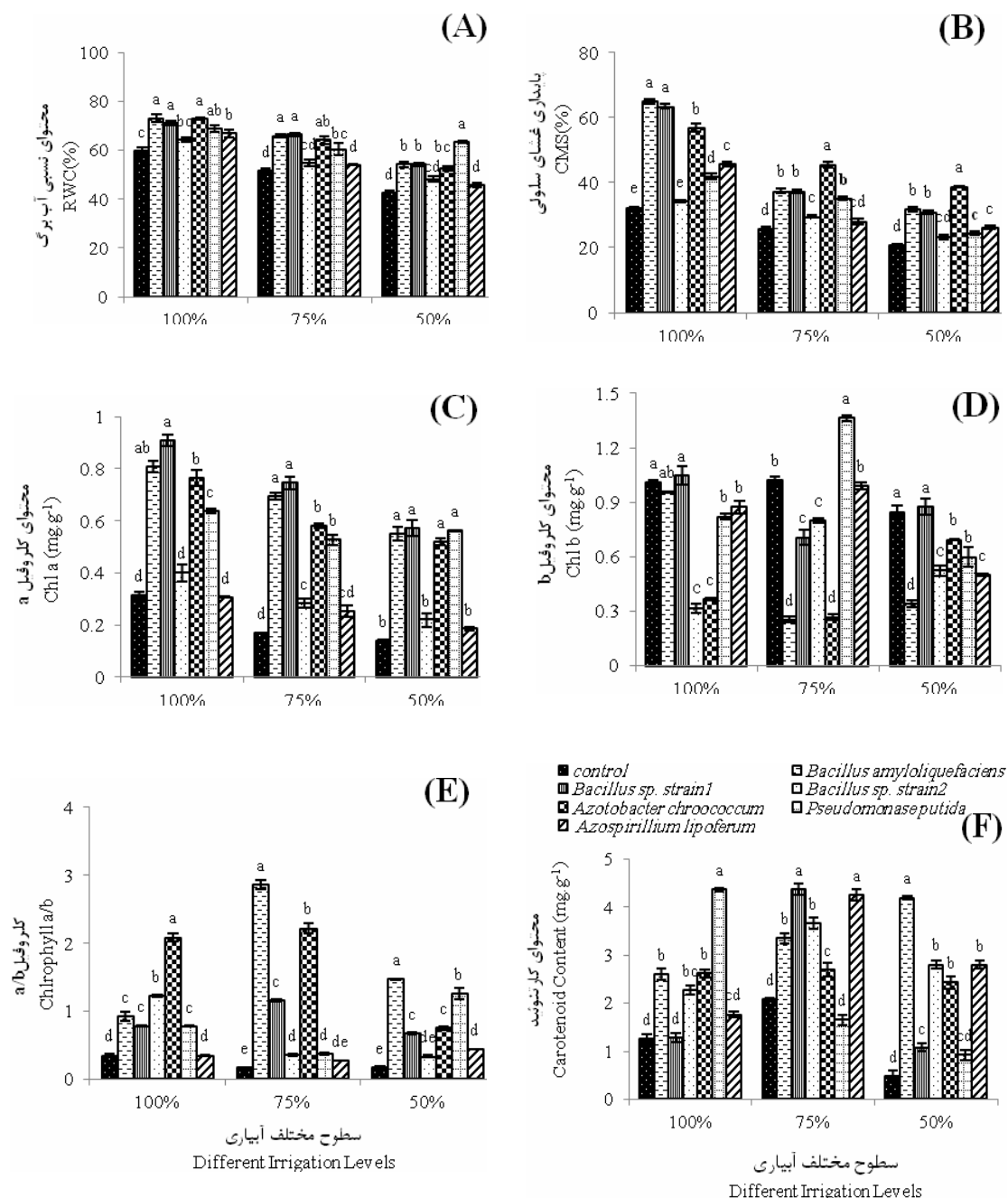
منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی d.f.	کارایی مصرف آب WUE	تعداد کپسول Capsule Number	تعداد دانه در کپسول Grain Number per Capsule	وزن هزار دانه 1000 Grain Weight	عملکرد دانه Grain Yield
تکرار Replication	2	0.0002 ^{ns}	0.1 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	557 ^{ns}
آبیاری Irrigation	2	0.3 ^{**}	254.4 ^{**}	0.7 ^{**}	6.1 ^{**}	2187601.6 ^{**}
خطا Error (a)	4	0.001	0.5	0.03	0.004	2701.5
باکتری Bacteria	6	0.3 ^{**}	54 ^{**}	0.3 ^{**}	0.1 ^{**}	269599.1 ^{**}
باکتری × آبیاری Bacteria × Irrigation	12	0.006 ^{**}	2.7 ^{**}	0.02 ^{ns}	0.008 [*]	14089 ^{**}
خطا Error (b)	36	0.001	0.5	0.02	0.003	589.9
ضریب تغییرات C.V. (%)		3.1	3.8	2.8	1.2	2.3

*، ** و ^{ns} به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم وجود اثر معنی‌دار می‌باشند.
*، ** and ^{ns} represent significant at 5%, 1% level of probability and non-significant, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و باکتری‌های محرک رشد گیاه بر تعداد دانه در کپسول کتان روغنی
Table 3- Mean comparison for main effect of irrigation and plant growth promoting bacteria on flax grain number per capsule

سطوح مختلف آبیاری (%) Different Irrigation Levels (%)				باکتری‌های محرک رشد گیاه PGPR					
100	75	50	Control	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	<i>Bacillus sp. strain1</i>	<i>Bacillus sp. strain2</i>	<i>Azotobacter chroococcum</i>	<i>Pseudomonas putida</i>	<i>Azospirillum lipoferum</i>
5.3 ^a	5.1 ^b	5 ^c	4.8 ^c	6 ^a	5.3 ^a	5.3 ^a	5.1 ^b	5.3 ^a	5.1 ^b

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.
The means with similar letter in each column are not significantly different (LSD 0.05).

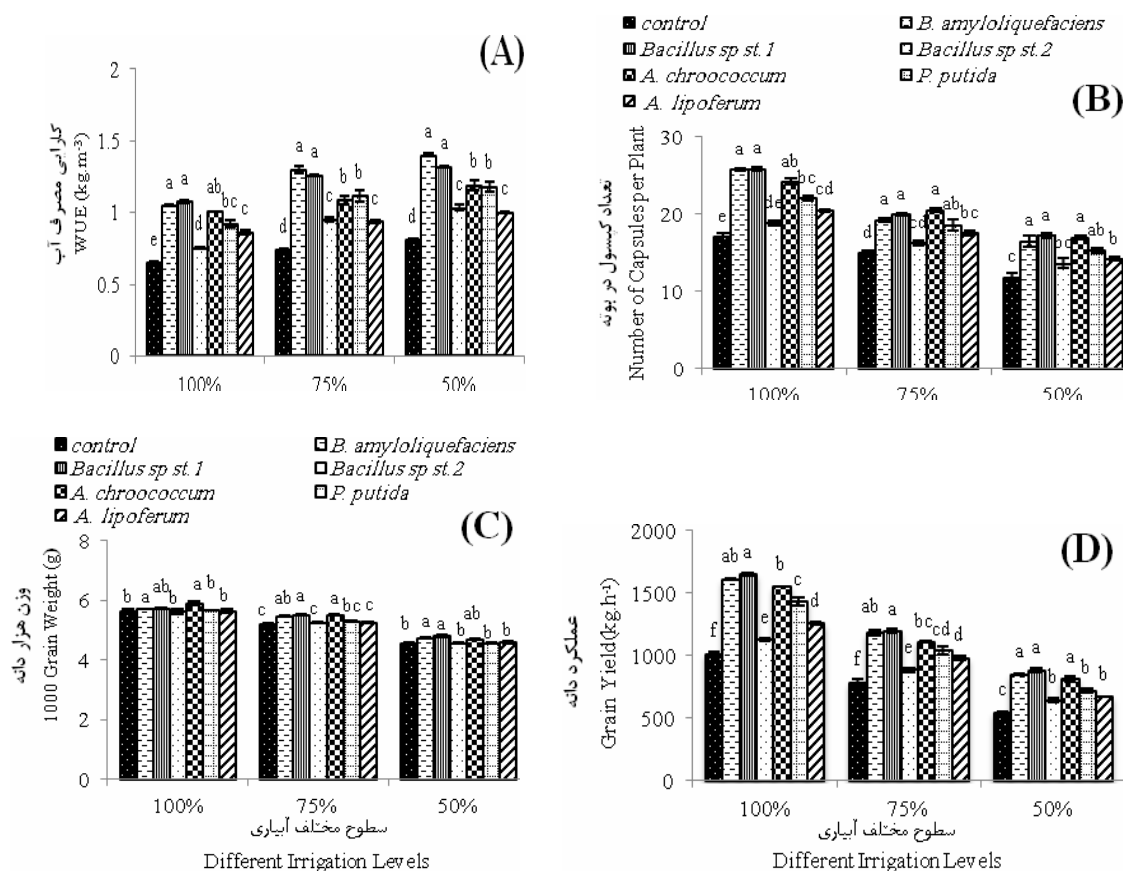


شکل ۱- تاثیر باکتری‌های محرک رشد بر محتوای نسبی آب برگ (A)، پایداری غشای سلولی (B) و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی (F,E,D,C) کتان روغنی تحت سطوح مختلف آبیاری

Figure 1- Effect of plant growth promoting bacteria on water use efficiency (A), cell membrane stability (B) and photosynthesis pigments (C,D,E,F) of flax under different irrigation levels

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

The means with similar letter in each column are not significantly different.



شکل ۲- تاثیر باکتری‌های محرک رشد بر کارایی مصرف آب (A)، تعداد کپسول در بوته (B)، وزن هزار دانه (C) و عملکرد دانه (D) کتان روغنی تحت سطوح مختلف آبیاری

Figure 1- Effect of plant growth promoting bacteria on physiological water use efficiency (A), number of seed per plant (B), 1000 grain weight (C) and seed yield (D) of flax under different irrigation levels

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

The means with similar letter in each column are not significantly different.

References

منابع مورد استفاده

- Alizadeh, A. 2005. Relation between water and soil and plant. Astan Ghoda Razavi Press. 470 pp. (In Persian).
- Arnon, A.N. 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*. 23: 112-121.
- Asghari, J., M. Ehteshami, Z. Rajabi Darvishan, and K. Khavazi. 2014. Effect of spraying and root inoculation with plant growth promoting bacteria and their metabolites on chlorophyll content, mineral absorption and yield of Hashemi cultivar of rice. *Soil Biology Journal*. 2(1): 21- 31. (In Persian).
- Ashraf, M., S.H. Berge, and O.T. Mahmood. 2004. Inoculating wheat seedling with exopolysaccharide producing bacteria restricts sodium uptake and stimulates plant growth under salt stress. *Biology and Fertility of Soils*. 40: 157-162.
- Azizpour, K., M.R. Shakiba, N.A. Khoshkholg Sima, H. Alyari, M. Moghaddam, E. Esfandiari, and M. Pessarakli. 2010. Physiological response of spring durum wheat genotypes to salinity. *Journal of Plant Nutrition*. 36: 859-873.
- Bellingham, B.K. 2009. Method for irrigation scheduling based on soil moisture data acquisition. Irrigation district sustainability strategies to meet the challenges. U. S. Committee on Irrigation and Drainage. 383 pp.
- Bhattacharyya, P.N., and D.K. Jha. 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in Agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 28: 1327-1350.
- Candan, N., and L. Tarhan. 2003. Relationship among chlorophyll-carotenoid content, antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation levels by Mg²⁺ deficiency in the *Mentha pulegium* leaves. *Plant Physiology and Biochemistry*. 41: 35-40.
- Dabighi, Kh., E. Fateh, and A. Ayneband. 2016. Effect of different green manure crops and nitrogen sources on grain yield, oil content and some qualitative traits of canola (*Brassica napus*). *Applied Field Crops Research*. 29: 95- 104.
- Dodd, I.C., N.Y. Zinovkina, V.I. Safronova, and A.A. Belimov. 2010. Rhizobacterial mediation of plant hormone status. *Annals of Applied Biology*. 157: 361–379.
- Elekhtyar, N.M. 2015. Efficiency of *Pseudomonas fluorescence* as plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of seedling vigor, nitrogen uptake, yield and its attributes of rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Scientific Research in Agriculture Sciences*. 2: 57- 67.
- Eskandarinejad, A., A. Zafarzadeh, R. Paydar, and M. Khezri. 2015. Quantifying water quality in northeastern of Golestan province reservoirs in terms of heavy metals (Chromium and Lead) and fecal coliforms. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*. 5: 314-318.
- Farooq, M., S.M.A. Basra, R. Tabassun, and N. Ahmad. 2006. Evaluation of seed vigor enhancement techniques on physiological and biochemical techniques on physiological basis in coars rice (*Oriza sativa* L.). *Seed Science Technology*. 34: 741- 750.
- Farshi, A., H. Siadat, S. Darbandi, M. Ansari, J. Kheirabi, M. Mirlofti, A. Salamat, and L.H. Sadatmiri. 2003. Management of irrigation water in field. 76: 178pp. (In Persian).

- Gururani, M.A., C.P. Upadhyaya, V. Baskar, J. Venkatesh, A. Nookaraju, and S.W. Park. 2013. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance abiotic stress tolerance in *Solanum tuberosum* through inducing changes in the expression of ROS-Scavenging enzymes and improved photosynthetic performance. *Journal of Plant Growth Regulation*. 32: 245–258.
- Haghabadori, M., and R. Seyed Sharifi. 2014. Quantitative and qualitative study, chlorophyll content and some growth indices of wheat in response of seed pretreatment with PGPR in different salinity levels. *Science and Technology of Greenhouse Crops*. 5(18): 51- 64. (In Persian).
- Haghigi, P., D. Habibi, and B. Sani. 2014. Wheat response to plant growth promoting rhizobacteria, humic acid and sn-brassinolide. *International Journal of Biosciences*. 5(1): 51- 60.
- Hamidi, A., A. Asgharzadeh, R. Chokan, M. Dehghan, A. Shoar Ghalavand, and M.J. Malakouti. 2007. Rhizobacteria (PGPR) biofertilizer application in maize (*Zea mays* L.) cultivation by adequate input. *Environmental Science*. 4(4): 1-20.
- Han, H.S., and K.D. Lee. 2005. Plant growth promoting rhizobacteria effect on antioxidant status, photosynthesis, mineral uptake and growth of Lettuce under soil salinity. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*. 1: 210-215.
- Hokmalipour, S., and R.S. Sharifi. 2015. Effect of seed inoculation with plant growth promoting rhizobacteria on dry matter remobilization of spring barley at different levels of nitrogen and phosphorous fertilizers. *Iranian Journal of Soil Research*. 29(4): 407- 425. (In Persian).
- Hossein, A., A. Maleki, K. Fasihi, and R. Naseri. 2014. The co-application of plant growth promoting rhizobacteria and inoculation with rhizobium bacteria on grain yield and its components of mungbean (*Vigna radiate* L.) in Ilam province, Iran. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 8 (7): 776- 781.
- Jalili Marandi, R. 2010. Physiology of environmental stress and residence mechanisms in horticultural plants. Orumieh University Jihad Press. 636 pp. (In Persian).
- Kazemi Nasab, A., M. Yarnia, and M.M. Lebaschy. 2015. The response of drought stressed Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.) to vermicompost and PGPR. *Biological Forum*. 7(1): 1336- 1344.
- Khajepour, M.R. 2004. Industrial crops. Isfahan University of Technology Press. 571 pp.
- Ludvikova, M., and M. Griga. 2015. Transgenic flax/linseed (*Linum usitatissimum* L.) Expectations and reality. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 51(4): 123- 141.
- Megala, S., and N. Paranthaman. 2017. Effect on the plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) increasing plant height, chlorophyll and protein content of *Solanum nigrum*. *International Journal of Applied Research*. 3 (12): 147- 150.
- Meher, R., P. Shivakrishna, K. Ashok Reddy, and D.M. Rao. 2018. Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*. (25): 285- 289.
- Mirshekari, B., S. Hokmalipour, R. Seyed Sharifi, F. Farahvash, and A. Ebadi Khazine Gadim. 2012. Effect of seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria

- (PGPR) on yield and dry matter accumulation of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) at various levels of nitrogen and phosphorus fertilizers. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 10: 314-20.
- Mohammadi Babazeidi, H., M. Falaknaz, P. Heidari, M.S. Hemmati, and Sh. Farokhian. 2013. Effect of *Azospirillum* bacteria and salicylic acid on physiological and morphological traits of basil under water deficit. *The Journal of Recent Molecular-Cellular Biotechnology*. (In Persian).
 - Moustaine, M., R. Kahkahi, A. Benbouazza, R. Benkirane, and H. Achbani. 2016. The role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in stimulating the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Meknes region, Morocco. *Plant Cell Biotechnology and Molecular*. 17(7-8): 363- 373.
 - Naderi, M.R. 2012. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on phytoremediation of lead by sun flower in a Pb-bearing soil for long term. MS.c. Thesis. University of Shahrekord. 120 pp. (In Persian).
 - Neetu, N., A. Aggarwal, A. Tanwar, and A. Alpa. 2012. Influence of *Arbuscular mycorrhiza* fungi and *Pseudomonas fluorescens* at different superphosphate levels on linseed (*Linum usitatissimum* L.) growth response. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 72(1): 237-243.
 - Nihorimbere, V., and M. Ongena. 2017. Isolation of plant growth promoting *Bacillus* strains with biocontrol activity in vitro. *Merit Research Journal of Microbiology and Biological Science*. 5(2): 13- 21.
 - Ortiz, N., E. Armada, A. Duque, A. Roldan, and R. Azcon. 2015. Contribution of *arbuscular mycorrhizal* fungi and/or bacteria to enhancing plant drought tolerance under natural soil conditions: Effectiveness of autochthonous or allochthonous strains. *Journal of Plant Physiology*. 174: 87–96.
 - Pindi, P.K., T. Sultana, and P.K. Vootla. 2014. Plant growth regulation of Bt-cotton through *Bacillus* species. 3 *Biotech Journal*. 4: 305- 315.
 - Rahimzadeh, S., and A.R. Pirzad. 2017. Microorganisms (AMF and PSB) interaction on linseed productivity under water deficit condition. *International Journal of Plant Production*. 11(2): 259- 273.
 - Rahman, M., A.A. Sabir, J.A. Mukta, M.M.A. Khan, M. Mohdi up Din, M.G. Miah, M. Rahman, and M.T. Isilam. 2018. Plant probiotic bacteria *Bacillus* and *Parabukholderia* improve growth, yield and content of antioxidant in strawberry fruit. *Scientific Reports*. 8: 1- 11.
 - Romero Perdomo, F., J. Abril, M. Camelo, A. Moreno Galvan, I. Pastrana, D. Rojas Tapias, and R. Bonilla. 2017. *Azotobacter chroococcum* as a potentially useful bacterial biofertilizer for cotton (*Gossypium hirsutum*): Effect in reducing N fertilization. *Revista Argentina De Microbiologia*. 49(4): 377- 383.
 - Sairam, R.K., P.S. Deshmukh, and D.S. Shukla. 1997. Tolerance to drought and temperature stress in relation to increased antioxidant enzyme activity in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 178:171-177.
 - Shaukat, M. F. 2013. Seed biopriming with *Serratia plymuthica* HRO-C48 for the control of *Verticillium longisporum* and *Phoma lingam* in *Brassica napus* L. spp. *Oleifera*. SLU. Swedish University of Agricultural Science. Pp.22.

- Silska, G. 2017. Genetic resources of flax (*Linum usitatissimum* L.) as very rich source of α -linolenic acid. *Herba Polonica*. 63(4): 26- 33.
- Smith, J.A.C., M. Popper, U. Luttge, W.J. Cram, M. Diaz, H. Griffiths, M.S.J. Lee, E. Medina, C. Schafer, K.H. Stimmel, and B. Thonke. 1989. Ecophysiology of xerophytic and halophytic vegetation of a coastal alluvial plain in northern Venezuela. II. Cactaceae. *New Phytologist*. 111(2): 245- 251.
- Soltani, E., and A. Soltani. 2015. Meta-analysis of seed priming effects on seed germination, seedling emergence and crop yield: Iranian studies. *International Journal of Plant Production*. 9 (3): 413- 432.
- Teng, S., Y. Liu, and L. Zhao. 2010. Isolation, identification and characterization of ACC deaminase-containing endophytic bacteria from halophyte *Suaeda salsa*. *Journal of Acta Microbiologica Sinica*. 50(11): 1503-1509.
- Timmusk, S., A. Islam, D. Abd El, C. Lucian, T. Tanilas, A. Kannaste, L. Behers, E. Nevo, G. Seisenbaeva, E. Stenetrom, and U. Niinemes. 2014. Drought tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh environments: Enhanced biomass production and reduced emissions of stress volatiles. *Plos One*. 9: 1- 13.
- Yamasaki, S., and L.R. Dillenburg. 1999. Measurements of leaf relative water content in *Araucaria angustifolia*. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 11: 69-75.
- Yasmin, H., A. Nosheen, R. Naz, A. Bano, and R. Keyani. 2017. L-tryptophan-assisted PGPR-mediated induction of drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Interactions*. 12(1): 567- 578.
- Young Shim, Y., B. Gui, P.G. Arnison, Y. Wang, and M.J.T. Reaney. 2014. Flax (*Linum usitatissimum* L.) bioactive compounds and peptide nomenclature: A review. *Trends in Food Science and Technology*. 38: 5-20.
- Zahir, Z.A., A. Munir, H.N. Asghar, B. Shaharoon, and M. Arshad. 2008. Effectiveness of rhizobacteria containing ACC-deaminase for growth promotion of pea (*Pisum sativum*) under drought conditions. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 18: 958-963.

Effects of Plant Growth Promoting Bacteria and Irrigation Levels on Physiological Traits and Yield of Flax (*Linum usitatissimum* L.)

Sanaz Rajabi Khamseh¹, Abdolrazagh Danesh Shahraki^{2*}, Mohammad Rafieiohossaini², Keramatollah Saeedi³, and Mahdi Ghobadinia⁴

Received: July 2018, Revised: 7 December 2018, Accepted: 24 January 2019

Abstract

To evaluate the effects of plant growth promoting bacteria and irrigation levels on some physiological traits and yield of flax, a split-plot experiment was conducted based on randomized complete block design with three replications at the research farm of Agricultural Faculty of Shahrekord University in 2015. The main factor was three irrigation levels (100 % of full irrigation as control, 75 and 50 % of full irrigation) and the sub-factor was seven levels of plant growth promoting bacteria (no inoculation as control and inoculation with *Bacillus* SP. strain1, *Bacillus* SP. strain2, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Azotobacter Chroococcum*, *Pseudomonas putida* and *Azospirillum lipoferum*). The interaction effect of irrigation and bacterial inoculation on relative water content, cell membrane stability, chlorophyll a, b and carotenoid content, chlorophyll a/b ratio, water use efficiency, number of capsules per plant, 1000 grain weight and seed yield were significant but non significant on seed number per capsule. The highest amounts of measured traits in each irrigation level were related to the bacterial treatments. The highest seed yield (with 62% increase) was obtained from *Bacillus* sp. strain1 in treatment and 100% of full irrigation as compared to that of control. According to the results of main effect of irrigation on number of seeds per capsule, full irrigation treatment resulted in highest number of grain per capsule as compared to the other levels. Among bacterial treatments, *B. Amyloliquefaciens* had the highest significant number of seeds per capsule, as compared with no inoculation treatment. The effects of treatments of *Bacillus* SP. strain1, *B. amyloliquefaciens* and *A. Chroococcum* treatments were more pronounced as compared to other bacterial treatments traits studied under normal and stress conditions. According to the results of this research, flax seed treatment with plant growth promoting bacteria is recommended flax seed production under water deficit conditions.

Key words: *Azospirillum*, PGPR, Photosynthesis, Priming, *Pseudomonas*.

1- Ph.D. Student of Crop Physiology, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Irrigation Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

*Corresponding Author: ar_danesh2000@yahoo.com

