

تغییرات صفات آگرومورفولوژیک بذرک (*Linum usitatissimum* L.) تحت تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه و تنش خشکی

ساناز رجبی خمسه^۱، عبدالرزاق دانش‌شهرکی^{۲*}، محمد رفیعی‌الحسینی^۲، کرامت‌الله سعیدی^۳، مهدی قبادی‌نیا^۴

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

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

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

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

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۰۸

چکیده

جهت بررسی تأثیر سطوح مختلف آبیاری و باکتری‌های محرک رشد گیاه بر برخی صفات آگرومورفولوژیک بذرک، آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد در سال ۹۴-۹۳ اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و باکتری‌های محرک رشد در هفت سطح (عدم تلقیح باکتریایی، تلقیح با شش باکتری *Bacillus sp strain1*، *Bacillus sp strain2*، *Bacillus amyloliquefaciens*، *Azotobacter chroococcum*، *Pseudomonas putida* و *Azospirillum lipoferum*) بودند. نتایج نشان داد، اثرات اصلی آبیاری و باکتری‌های محرک رشد بر تمام صفات معنی‌دار بود. اثرات متقابل فاکتورهای مورد بررسی بر ارتفاع بوته، تعداد سرشاخه گل‌دار، تعداد کیپسول در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و درصد روغن معنی‌دار ولی بر تعداد دانه در کیپسول بی تأثیر بود. بیشترین عملکرد دانه با میانگین ۱۶۵۰ کیلوگرم در هکتار و درصد روغن با میانگین ۴۴/۷ درصد در تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد. در بیشتر صفات مورد بررسی تیمارهای *Bacillus sp strain1*، *Bacillus amyloliquefaciens* و *Azotobacter chroococcum* از تأثیر بیشتری در افزایش مقادیر اندازه‌گیری شده برخوردار بودند. بیشترین میزان عملکرد دانه و درصد روغن در هر سه سطح آبیاری متعلق به تیمار *Bacillus sp strain1* بود. مطابق این نتایج، بیش تیمار بذر با باکتری‌های محرک رشد سبب افزایش در عملکرد، اجزای عملکرد و درصد روغن گیاه بذرک تحت شرایط فاقد تنش و تنش کم آبیاری گردید؛ بنابراین استفاده از باکتری‌ها فوق جهت افزایش رشد و عملکرد گیاهان تحت شرایط کمبود آب پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: ازتوباکتر، بیوپرایمینگ، دانه‌های روغنی، PGPR

مقدمه

یک‌ساله، دولپه و خودگرده‌افشان که از روغن و فیبر آن در صنایع مختلف استفاده می‌گردد (Ludvikova and Griga, 2015). دانه‌های بذرک محتوی ترکیبات و اجزای فعال زیستی شامل لینولونیک‌اسید، لیگنان‌ها، امگا ۳ و دیگر ترکیبات ضروری می‌باشند (Turner et al., 2014). با توجه به قرار گرفتن ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک وقوع

ارزش غذایی دانه‌های روغنی از نظر تأمین کالری و انرژی موردنیاز انسان و دام در بین محصولات کشاورزی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به کمبود سطح زیر کشت و تولید دانه‌های روغنی در کشور، سالانه میلیاردها دلار صرف واردات دانه‌های روغنی، روغن خام و کنجاله به کشور می‌گردد. بذرک (*Linum usitatissimum* L.) گیاهی است

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد با متوسط بارندگی ۳۱۶ میلی‌متر، عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۴۹ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۱۱۶ متر از سطح دریا به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایشی شامل آبیاری در سه سطح (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و باکتری‌های محرک رشد در هفت سطح (عدم تلقیح باکتریایی به‌عنوان شاهد و تلقیح بذر با شش باکتری محرک رشد گیاهی شامل *Bacillus* *Bacillus* sp strain1, *amyloliquefaciens* *Bacillus* sp strain2, *Azotobacter chroococcum* sp strain2, *Azospirillum lipoferum* و *Pseudomonas putida* بودند. باکتری‌های فوق با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های پیشین و سودمندی هر یک از این باکتری‌ها در گیاهان مختلف انتخاب شدند (جدول ۱).

خشکی در دوره رشد محصولات کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌صورت پرایمینگ، به‌عنوان یک روش مؤثر در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. باکتری‌های محرک رشد با تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات و پتاسیم، تولید سیدروفور، تولید فیتوهورمون‌ها، آنتی‌بیوتیک‌ها، آگرو پلی‌ساکاریدها، آنزیم‌های هیدرولیتیک و القای مقاومت سیستمیک، سبب افزایش تولید گیاهان می‌گردند (Gupta et al., 2015). افزایش در عملکرد و صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک در گیاهان بزرگ (Masciarelli and Rahimzadeh and Pirzad, 2017)، سویا (Paulucci et al., 2015) و پنبه (et al., 2014)، بادام‌زمینی (Romero Perdomo et al., 2017) تحت تلقیح باکتریایی در شرایط فاقد تنش و تنش خشکی گزارش شده است. از آنجا که تنش کم‌آبی یکی از موانع اصلی در تولید محصولات زراعی در ایران محسوب می‌شود و از سویی دیگر تولید و سطح زیر کشت دانه‌های روغنی در کشور بسیار اندک است، بنابراین این تحقیق با هدف بررسی تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر تولید گیاه دانه روغنی بزرگ تحت تنش کمبود آب طراحی و اجرا گردید.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های باکتری‌های مورد بررسی

Table 1. Some properties of investigated bacteria

ویژگی‌ها Properties	باکتری‌های محرک رشد گیاه PGPR
تولید سیدروفور، انحلال فسفات، تأثیر بر خصوصیات خاک مانند میزان عناصر فسفر و نیتروژن، EC، pH و CEC (Jamal et al., 2016)	<i>B. amyloliquefaciens</i>
تولید سیدروفور، لیپوپپتیدها، آنزیم‌های هیدرولیتیک و هورمون‌های رشدی مانند اکسین، انحلال و تحرک فسفات در خاک، ممانعت از تولید اتیلن و مقاومت سیستماتیک به پاتوژن‌ها (Pindi et al., 2014; Nihorimbere and Ongena, 2017)	<i>Bacillus</i> sp
تولید نیتروژن، انحلال فسفات، تولید اکسین و آنزیم‌های هیدرولیتیک (Romero Perdomo et al., 2017)	<i>A. Chroococcum</i>
تولید سیدروفور و اکسین، انحلال فسفات (Santora et al., 2015)	<i>P. putida</i>
تولید هورمون‌های اکسین، جیبرلین و برخی پروتئین‌ها مانند پلی‌آمین‌ها، تثبیت نیتروژن، افزایش رشد ریشه، کنترل پاتوژن‌های گیاهی، مقاومت به تنش خشکی (Cassan et al., 2001; Agami et al., 2017)	<i>A. lipoferum</i>

ابتدا با اتانول ۷۰ درصد به مدت ۱۰ ثانیه ضدعفونی و بعد از شستشو با آب مقطر، با محلول هیپوکلریت سدیم ۲ درصد به مدت ۱۰ دقیقه استریل و سپس چند بار با آب مقطر استریل شستشو و سپس دو ساعت در دمای اتاق، در آب مقطر برای تیمار شاهد قرار گرفتند. مایه تلقیح باکتری‌های مورد آزمایش

باکتری‌های *Bacillus* از پژوهشکده زیست‌فناوری دانشگاه شهرکرد، باکتری‌های *Azotobacter* و *Pseudomonas* از بانک میکروب ایران و باکتری *Azospirillum* از موسسه تحقیقات آب‌و خاک کرج تهیه شدند. به‌منظور انجام آزمایش، بذور کتان توده چهارمحل،

کشت و بلافاصله آبیاری شدند. آبیاری تا زمان اعمال تنش‌ها به فاصله یک روز در میان به صورت غرقاب انجام شد. پس از سبز شدن مزرعه، از مرحله رشد سومین جفت برگ حقیقی و شروع متناوب شدن برگ‌ها تا رسیدن به تراکم ۳۰۰ بوته در مترمربع طی دو مرحله تنک صورت گرفت. وجین علف‌های هرز نیز به صورت دستی انجام شد. اعمال تنش‌ها ۱۴ روز پس از کاشت، هم‌زمان با شروع رشد طولی ساقه صورت گرفت. برای تعیین زمان و میزان آبیاری، رطوبت خاک به صورت روزانه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج (SM300, England) اندازه‌گیری شد (Farshi et al., 2003) و سپس به میزان کمبود رطوبت خاک برای تیمار شاهد آبیاری انجام گردید.

در تیمارهای تلقیحی با استفاده از محیط TSB^۱ و روش کدورت‌سنجی با تنظیم جذب ۰/۵ در طول موج ۶۰۰ نانومتر تهیه گردیدند. به منظور اعمال تیمارهای تلقیحی، بذور ضدعفونی شده به مدت ۲ ساعت در سوسپانسیون باکتریایی قرار داده شدند (Naderi, 2012). عملیات خاک‌ورزی و تهیه زمین، نیمه اول و کشت در نیمه دوم اردیبهشت‌ماه سال ۹۴ انجام شد. نیاز غذایی گیاه با توجه به نتایج آزمون خاک (جدول ۲) و نیاز غذایی بذرک محاسبه و اعمال گردید. بذرها در کرت‌هایی به ابعاد ۱/۵×۱ مترمربع شامل ده خط کشت به طول یک متر و با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر و فاصله بذور سه سانتی‌متر (Khajepour, 2004) به صورت دستی

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2. Physical and chemical properties of site soil

عمق Depth	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			----- % -----				---- mg.kg ⁻¹ ----		ds.m ⁻¹	سیلتی لومی Silty loam
0-30	7.8	0.11	28	34	38	0.6	470	17.6	0.38	

معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد و مقایسه میانگین‌های برهمکنش‌ها از روش برش‌دهی اثرات متقابل انجام شد.

نتایج و بحث

اثرات اصلی آبیاری و تیمار باکتریایی بر همه صفات مورد بررسی در سطح آماری یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). اثرات متقابل تنش و تلقیح باکتریایی بر ارتفاع بوته، تعداد سرشاخه گل‌دار، تعداد کپسول در بوته، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و درصد روغن در سطح آماری یک درصد و بر وزن هزار دانه در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار، اما بر صفت تعداد دانه در کپسول معنی‌دار نشد (جدول ۳).

ارتفاع گیاه

طبق نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل، در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تیمار باکتریایی *Azotobacter*

برای تیمارهای تحت تنش نیز مطابق با سطح تنش، به میزان ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، آبیاری انجام شد. در مرحله گلدهی تعداد سرشاخه‌های گل‌دار مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در مرحله رسیدگی و زرد شدن، بوته‌های هر سه تکرار (با حذف حاشیه‌ها) برداشت و ارتفاع بوته، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول با انتخاب ده گیاه به تصادف اندازه‌گیری شد. عملکرد بیولوژیک در یک مترمربع از هر کرت محاسبه و سپس به صورت کیلوگرم در هکتار بیان شد. عملکرد دانه نیز پس از کوبیدن و بوجاری بوته‌های برداشت‌شده عملکرد بیولوژیک، برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. (Kadkhodaei and Ehsanzadeh, 2011) وزن هزار دانه با شمارش هزار بذر و سپس توزین آن‌ها به دست آمد. به منظور استخراج روغن و تعیین درصد آن از روش سوکسله و حلال هگزان استفاده گردید (Hosseini, 2003). تجزیه واریانس نتایج با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱)، مقایسه میانگین‌ها به روش کمترین اختلاف

¹ Tryptic Soy Broth

مواد غذایی به‌واسطه توسعه بیشتر ریشه‌ها در اثر تولید هورمون‌های گیاهی و همچنین انجام فرآیند تثبیت زیستی نیتروژن نسبت داد (Chamani et al., 2012).

در گیاه گوجه‌فرنگی، سویه‌های باکتریایی از طریق مکانیسم‌هایی مانند فعالیت آنزیم-ACC دامیناز، تولید اکسین، انحلال فسفات، معدنی نمودن فیتات و تولید سیدروفور سبب افزایش ارتفاع، تعداد برگ، میوه و درنهایت عملکرد محصول گردیدند (Gururani et al., 2013). استفاده از گونه‌های باکتریایی محرک رشد *Azospirillum*, *Bacillus*, *Azotobacter* و همچنین استفاده ترکیبی آن‌ها در نوعی بادمجان سبب افزایش ارتفاع بوته گردید (Megala and Paranthaman, 2017). در آفتابگردان نیز افزایش معنی‌داری در ارتفاع گیاه، درصد روغن و عملکرد دانه تحت کاربرد باکتری‌های محرک رشد مشاهده شده است (Afshinfar et al., 2014).

میانگین ۶۰/۸ (افزایش ۱۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین ارتفاع بوته را نشان داد (شکل ۱). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار باکتریایی *Pseudomonas* میانگین ۵۶/۸ سانتی‌متر (افزایش ۲۷/۵۶ درصدی نسبت به شاهد در این سطح) از بیشترین ارتفاع بوته برخوردار بود (شکل ۱). در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به نظر می‌رسد تلقیح باکتریایی تأثیر چندانی نداشته است، زیرا تفاوت معنی‌داری بین تیمار شاهد با بیشتر تیمارهای تلقیح باکتریایی مشاهده نشد. در این سطح تنش تیمار *Bacillus* sp strain1 با میانگین ۴۹/۵ سانتی‌متر بیشترین و تیمارهای *Azospirillum* و *Azotobacter* کمترین ارتفاع بوته را داشتند (شکل ۱).

در گیاه بذرک خشکی ناشی از سطوح مختلف آبیاری سبب کاهش ارتفاع گیاهچه‌ها نسبت به شرایط نرمال گردید (Mirshekari et al., 2012). کاربرد باکتری‌های محرک رشد در افزایش ارتفاع گیاه را می‌توان به افزایش جذب آب و

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و درصد روغن بذرک تحت تنش خشکی

Table 3. Analysis of variance for effects of plant growth promoting bacteria inoculation on yield, yield components and oil percentage of flax under drought stress

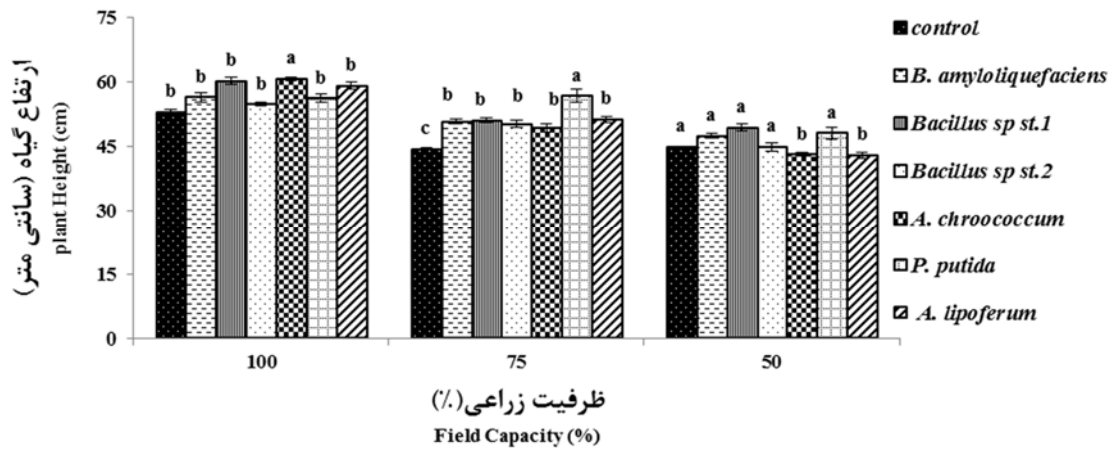
S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant Height	تعداد سرشاخه گل‌دار Number of Flower Heads	تعداد کپسول Number of Capsule	تعداد دانه در کپسول Number of Grain per Capsule
Replication	تکرار	2	2.1 ^{ns}	1.4 ^{ns}	0.1 ^{ns}	0.02 ^{ns}
Stress	تنش	2	686.7 ^{**}	328.1 ^{**}	254.4 ^{**}	0.7 ^{**}
Error (a)	خطای الف	4	3.5	5	0.5	0.03
Bacteria	باکتری	6	41.8 ^{**}	97.7 ^{**}	54 ^{**}	0.3 ^{**}
Bacteria×Stress	باکتری×تنش	12	21.1 ^{**}	10 ^{**}	2.7 ^{**}	0.02 ^{ns}
Error (b)	خطای ب	16	1.7	4	0.5	0.02
C.V (%)	ضریب تغییرات		2.6	5	3.8	2.8

Table 3. Continued

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	وزن هزار دانه 1000 Grain Weight	عملکرد بیولوژیک Biological Yield	عملکرد دانه Grain Yield	درصد روغن Oil Percentage
Replication	تکرار	2	0.01 ^{ns}	28742.3 ^{ns}	557 ^{ns}	4.7 ^{ns}
Stress	تنش	2	6.1 ^{**}	9808528.2 ^{**}	2187601.6 ^{**}	366.1 ^{**}
Error (a)	خطای الف	4	0.004	21571.6	2701.5	1.8
Bacteria	باکتری	6	0.1 ^{**}	862129.3 ^{**}	269599.1 ^{**}	143.4 ^{**}
Bacteria×Stress	باکتری×تنش	12	0.008 [*]	77027 ^{**}	14089 ^{**}	19 ^{**}
Error (b)	خطای ب	16	0.003	9749.5	589.9	1.6
C.V (%)	ضریب تغییرات		1.2	2.4	2.3	3.8

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

*, ** and ns represent significant at 5%, 1% level and non-significant, respectively



شکل ۱. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر ارتفاع گیاه

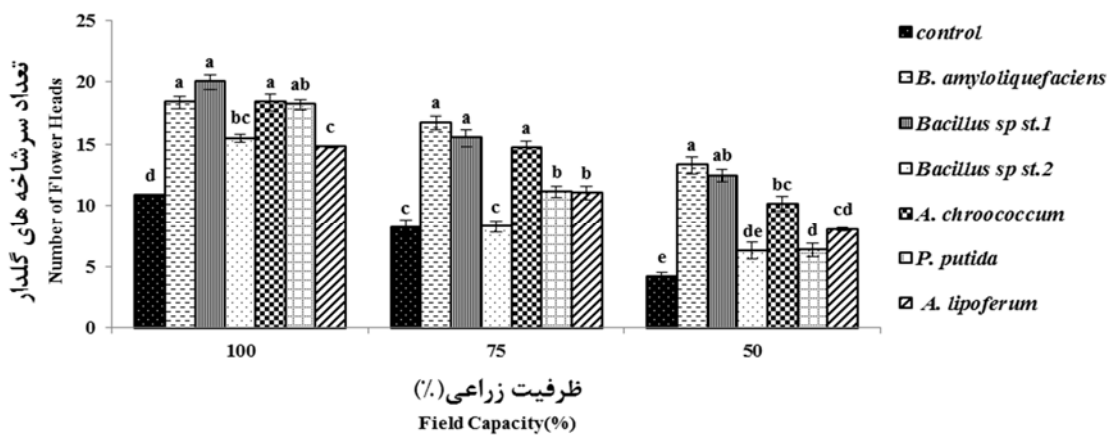
Fig. 1. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on plant height

تیمار *Bacillus amyloliquefaciens* با میانگین ۱۳/۳ (افزایش ۲۲۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد آن) بود (شکل ۲).

باکتری‌ها با تولید هورمون‌های اکسین، سیتوکنین و جیبرلین‌ها سبب تکثیر سلولی شده (Arora et al., 2013) و بدین ترتیب می‌توانند سبب افزایش شاخص‌های رشدی گیاه و از جمله سرشاخه‌های گل‌دار در گیاه گردند. در گیاه بادرشبو نیز سویه‌هایی از باکتری‌های محرک رشد *Bacillus* و مایکوباکتریوم سبب افزایش تعداد سرشاخه‌های گل‌دار گردیدند (Torfi et al., 2016).

تعداد سرشاخه گل‌دار

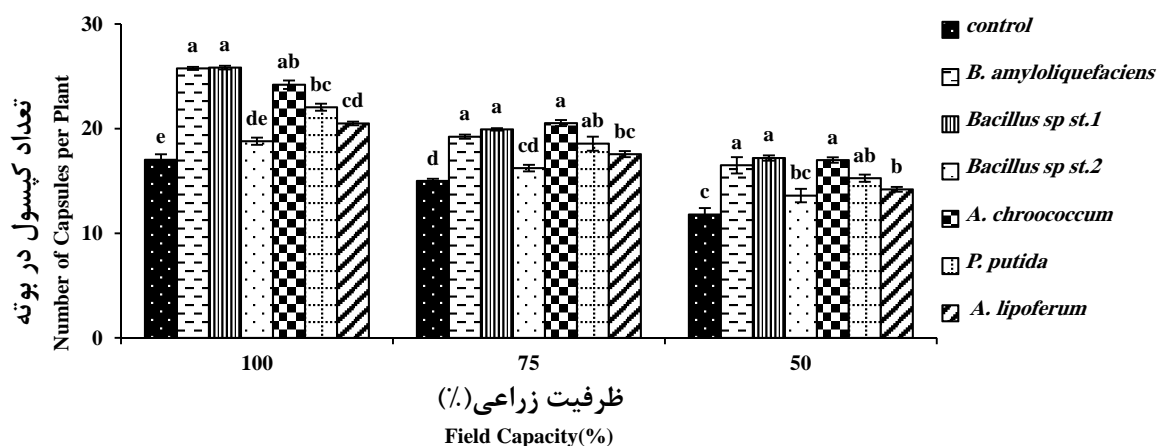
در بررسی تعداد سرشاخه گل‌دار، تیمار *Bacillus sp strain1* در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، با میانگین ۲۰ (افزایش ۸۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین تعداد سرشاخه گل‌دار را داشت (شکل ۲). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار *Bacillus amyloliquefaciens* با میانگین ۱۶/۷ (افزایش ۱۰۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) از بیشترین تعداد سرشاخه گل‌دار برخوردار بود (شکل ۲). در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین تعداد سرشاخه گل‌دار متعلق به



شکل ۲. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر تعداد سرشاخه گل‌دار

Fig. 2. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on number of flower heads

تیمارهای *Azotobacter* strain1 و *Bacillus amyloliquefaciens* با میانگین ۲۰/۵ (افزایش ۳۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) مشاهده شد (شکل ۳). در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمارهای *Bacillus amyloliquefaciens* sp strain1 و *Azotobacter* با میانگین ۱۷/۲ (افزایش ۴۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) از بیشترین تعداد کپسول در بوته برخوردار بود (شکل ۳).



شکل ۳. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر تعداد کپسول در بوته

Fig3. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on number of capsules per plant

تیمارهای تلقیح باکتریایی، تیمارهای *Bacillus amyloliquefaciens* با میانگین ۶ بیشترین و تیمار شاهد با میانگین ۴/۸ (کاهش ۲۵ درصدی) کمترین تعداد دانه در کپسول را نشان دادند (جدول ۴). باکتری‌ها احتمالاً از روش‌هایی مانند 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 گردند. پیش‌تیمار بذور با باکتری‌های محرک رشد گیاهی *Azospirillum* و *Azotobacter* سبب افزایش معنی‌داری در تعداد دانه در سنبله جو نسبت به تیمار شاهد گردید (Hakam Alipour and Seyed Sharifi, 2015).

وزن هزار دانه

تیمار *Azotobacter* و *Bacillus amyloliquefaciens* در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با میانگین ۵/۹ گرم (افزایش ۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین وزن

تعداد کپسول در بوته

مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد، در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین تعداد کپسول در بوته متعلق به تیمارهای *Bacillus amyloliquefaciens* و *Bacillus sp strain1* با میانگین ۲۵/۸ (افزایش ۵۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بود (شکل ۳). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین تعداد کپسول در بوته در

تعداد کپسول در بوته از مهم‌ترین اجزای عملکرد دانه است. از این رو باکتری‌های محرک رشد از طریق سنتز فیتوهورمون‌ها، سیدروفور، حلالیت فسفات‌های نامحلول و تولید آنزیم-ACC دامیناز سبب افزایش جذب عناصر غذایی از محیط به‌وسیله گیاه (Glick, 2010)، افزایش اختصاص مواد به بخش زایشی و افزایش تعداد کپسول، سبب افزایش عملکرد دانه می‌گردند. در پژوهش انجام‌شده در گیاه برنج، باکتری‌های محرک رشد با تولید ایندول استیک اسید و انحلال فسفات سبب افزایش تعداد پانیکول شدند (Gholamalizadeh et al., 2017).

تعداد دانه در کپسول

در بررسی میانگین اثرات اصلی آبیاری، بیشترین و کمترین تعداد دانه به ترتیب متعلق به تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با میانگین ۵/۳ و تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی با میانگین ۵ (کاهش ۶ درصدی) بود (جدول ۴). در بررسی اثرات اصلی

تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر افزایش وزن هزار دانه را می‌توان به تولید هورمون‌های محرک رشد و تأمین عناصر غذایی و در نتیجه امکان تداوم بیش‌تر دوره پر شدن دانه و در نهایت افزایش وزن هزار دانه نسبت داد (Hamidi et al., 2007). افزایش در وزن هزار دانه در گندم (Furlan et al., 2017) تحت کاربرد باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش گزارش شده است.

هزار دانه را نشان دادند (شکل ۴). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمارهای *Bacillus sp strain1* و *Azotobacter* با میانگین ۵/۵ گرم (افزایش ۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) از بیشترین وزن هزار دانه برخوردار بودند (شکل ۴). در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمارهای *Bacillus sp strain1* و *Bacillus amyloliquefaciens* با میانگین ۴/۷ (افزایش ۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین وزن هزار دانه را داشتند (شکل ۴).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و باکتری‌های محرک رشد گیاه بر عملکرد، اجزای عملکرد و درصد روغن بذک

Table 4. Mean comparison for main effect of irrigation and plant growth promoting bacteria on yield, yield components and oil percentage of flax

تیمارها Treatments	ارتفاع گیاه Plant Height (cm)	سرشاخه گل‌دار Flower Heads	تعداد کپسول Number of Capsule	تعداد دانه در کپسول Grain per Capsule
100%	57.3 ^a	16.6 ^a	22 ^a	5.3 ^a
75%	50.6 ^b	12.2 ^b	18.1 ^b	5.1 ^b
50%	45.9 ^c	8.7 ^c	15.1 ^c	5 ^c
C	47.5 ^c	7.7 ^e	14.6 ^e	4.8 ^c
B1	51.6 ^b	16.1 ^a	20.5 ^a	6 ^a
B2	53.7 ^a	16 ^a	21 ^a	5.3 ^a
B3	50 ^b	10 ^d	16.2 ^d	5.3 ^a
A1	51.1 ^b	14.4 ^b	20.6 ^a	5.1 ^b
P	53.8 ^a	11.9 ^c	18.6 ^b	5.3 ^a
A2	51.2 ^b	11.3 ^c	17.4 ^c	5.1 ^b

Table 4. Continued

تیمارها [§] Treatments [§]	وزن هزار دانه 1000 Grain Weight (g)	عملکرد بیولوژیک Biological Yield (kg.h ⁻¹)	عملکرد دانه Grain Yield (kg.h ⁻¹)	درصد روغن Oil Percentage (%)
100%	5.70 ^a	4764.5 ^a	1378.8 ^a	37.50 ^a
75%	5.35 ^b	4204.3 ^b	1026.5 ^b	33.81 ^b
50%	4.65 ^c	3404.6 ^c	733.9 ^c	29.17 ^c
C	5.12 ^b	3660.7 ^c	783.5 ^g	30.15 ^e
B1	5.32 ^a	4383.9 ^a	1212.7 ^b	35.07 ^{bc}
B2	5.35 ^a	4452.2 ^a	1242.9 ^a	40.12 ^b
B3	5.15 ^b	3804.8 ^d	887.2 ^f	31.85 ^d
A1	5.26 ^a	4394.8 ^a	1159.7 ^c	34.06 ^c
P	5.18 ^a ^b	4136.9 ^b	1067.1 ^d	35.33 ^b
A2	5.16 ^b	4035.6 ^c	970.8 ^e	27.57 ^f

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.
[§] ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد از ظرفیت زراعی.

The means with similar letter in each column are not significantly different (LSD 0.05)

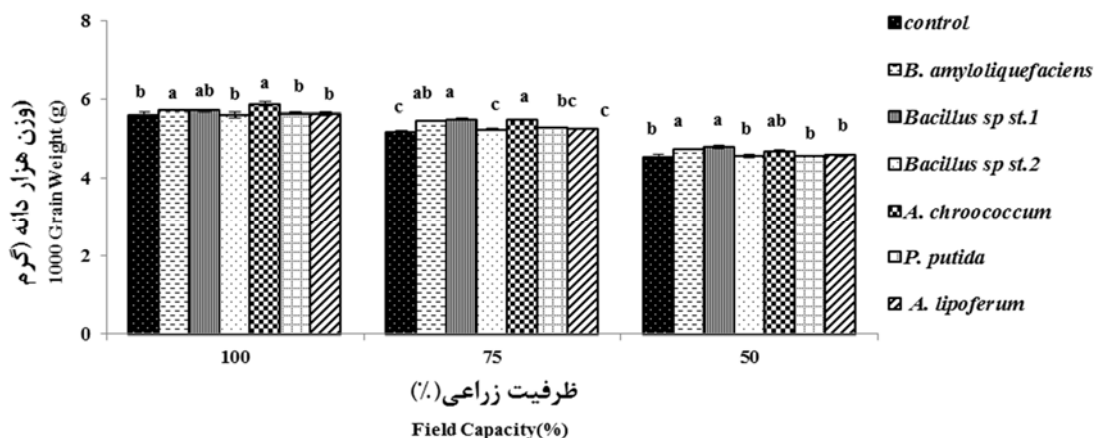
[§] 100, 75 and 50% are percentage of field capacity. *Bacillus amyloliquefaciens* (B1), *Bacillus sp strain1* (B2), *Bacillus sp strain2* (B3), *Azotobacter chroococcum* (A1), *Pseudomonas putida* (P), *Azospirillum lipoferum* (A2)

عملکرد بیولوژیک را داشت اما از تفاوت معنی‌داری با تیمار *Azotobacter* برخوردار نبود (شکل ۵). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار *Azotobacter* با میانگین ۴۵۳۶ کیلوگرم در هکتار (افزایش

عملکرد بیولوژیک در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمارهای *Bacillus sp strain1* با میانگین ۵۲۳۱ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۲۹ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین مقدار

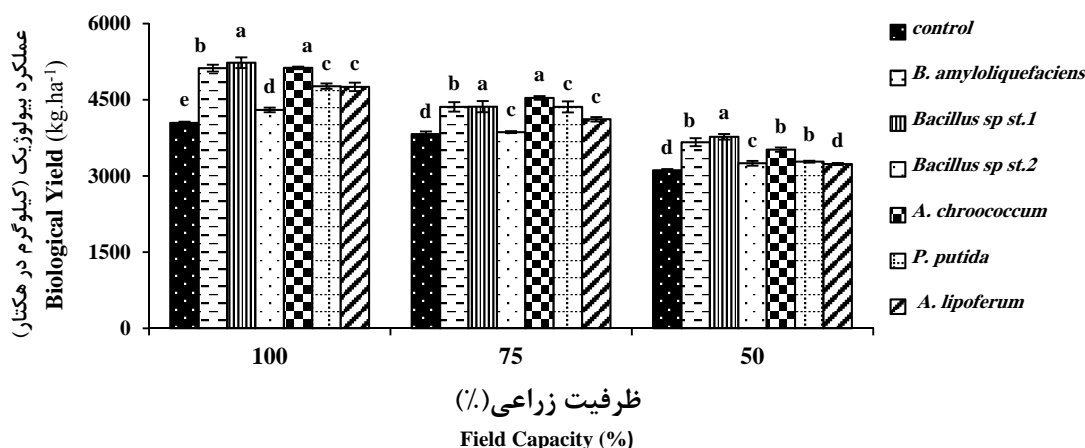
زراعی، تیمار *Bacillus sp strain1* با میانگین ۳۷۷۰ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۲۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) بیشترین عملکرد را داشت (شکل ۵).

۱۸ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) مشاهده شد. با این وجود از افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار *Bacillus sp strain1* برخوردار نبود (شکل ۵). در ۵۰ درصد ظرفیت



شکل ۴. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر وزن هزار دانه

Fig 4. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on 1000 grain weight



شکل ۵. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر عملکرد زیستی

Fig 5. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on Biological yield

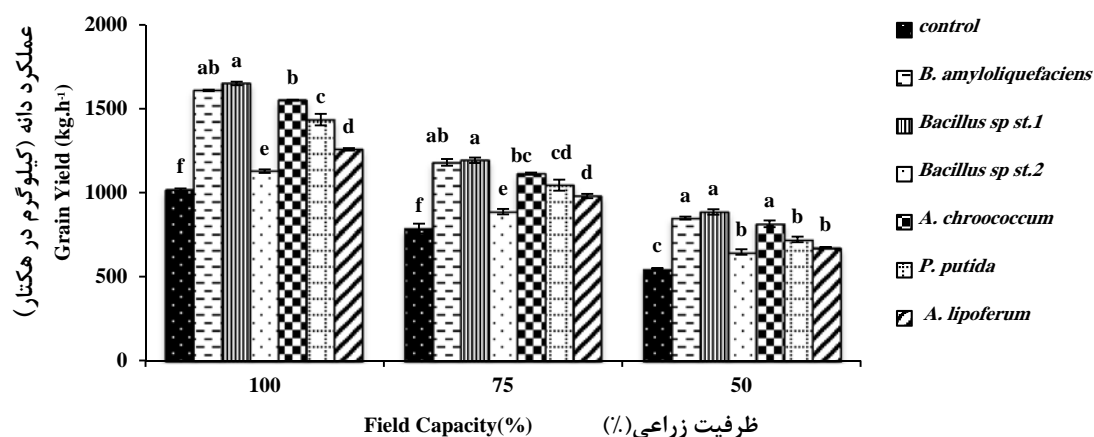
عملکرد دانه

در بررسی تأثیر آبیاری و تلقیح باکتریایی بر عملکرد دانه، در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمار *Bacillus sp strain1* با میانگین ۱۶۵۱ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۶۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد در این سطح) و نداشتن اختلاف معنی‌دار با تیمار *Bacillus amyloliquefaciens* بیشترین عملکرد دانه را نشان داد (شکل ۶). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، تیمار

باکتری‌های محرک رشد گیاه، تولید عملکرد را از طریق تولید برخی ترکیبات مانند آنزیم-ACC دامیناز، سیانید هیدروژن، افزایش دسترسی به عناصر غذایی، کاهش تنش‌ها، تولید هورمون‌های گیاهی و تثبیت نیتروژن اتمسفری در روابط همزیستی و غیرهمزیستی افزایش می‌دهند (Yang et al., 2009). گزارش شده است تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد سبب افزایش معنی‌داری در عملکرد بیولوژیک سویا نسبت به عدم تلقیح گردید (Esmaeili et al., 2016).

Bacillus sp strain1 با 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 *Bacillus amyloliquefaciens* و *Azotobacter* مشاهده نشد (شکل ۶).

Bacillus sp strain1 با میانگین ۱۱۹۳ کیلوگرم در هکتار (افزایش ۵۱ درصدی نسبت به شاهد در این سطح) و بدون داشتن اختلاف معنی‌دار با تیمار *Bacillus amyloliquefaciens* از بیشترین مقدار عملکرد دانه برخوردار بود (شکل ۶). در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمار



شکل ۶. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر عملکرد دانه

Fig. 6. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on grain yield

سریع گیاهان سبب افزایش عملکرد نهایی می‌گردند (Mahmood et al., 2016).

درصد روغن دانه

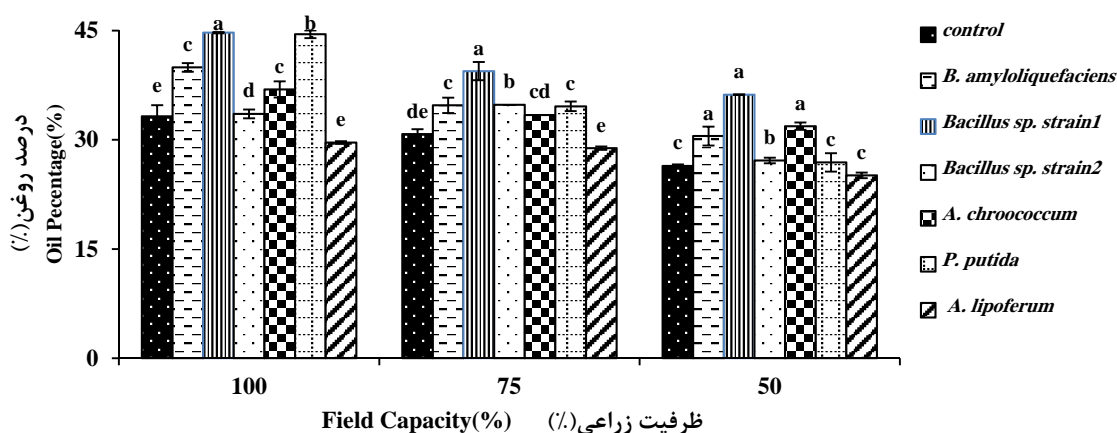
بیشترین درصد روغن دانه در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی گیاه در تیمار *Bacillus sp strain1* با میانگین ۴۴/۷ درصد حاصل شد که افزایش ۳۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد با میانگین ۳۳/۲ درصد داشت (شکل ۷). در ۷۵ درصد ظرفیت زراعی نیز تیمار *Bacillus sp strain1* با میانگین ۳۹/۴ درصد و اختلاف ۲۷ درصدی با میانگین ۳۰/۸ درصد، از بیشترین درصد روغن برخوردار بود (شکل ۷). در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، تیمار *Bacillus sp strain1* با میانگین ۳۶/۲ و افزایش ۳۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد با میانگین ۲۶/۴ درصد، بیشترین درصد روغن دانه را نشان داد. تفاوت معنی‌داری بین تیمار *Bacillus sp strain1* با تیمارهای *Bacillus amyloliquefaciens* و *Azotobacter* وجود نداشت (شکل ۷).

تنش کم‌آبی از طریق اختلال در پر شدن دانه و همچنین افزایش نسبت پوسته به دانه ممکن است سبب کاهش در

طبق نتایج حاصل تیمار *Bacillus sp strain1* در هر سه سطح تنش بیشترین و تیمار شاهد نیز کمترین مقدار عملکرد دانه را نشان دادند. می‌توان گفت از آنجاکه تیمارهای باکتریایی *Bacillus sp strain1* و *Bacillus amyloliquefaciens* از تعداد ساقه، سرشاخه گل‌دار و تعداد کپسول در بوته بیشتری تحت شرایط فاقد تنش و تنش برخوردار بودند، در نتیجه عملکرد بیشتر در این تیمارها دور از انتظار نخواهد بود. علاوه بر این باکتری‌های جنس *Bacillus* با انحلال فسفر، تولید ایندول استیک اسید، سیتوکنین و آنزیم-ACC دامیناز می‌تواند اثرات مثبتی در افزایش عملکرد داشته باشد. باکتری‌های محرک رشد از طریق برخی از فرآیندها شامل تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، تولید-ACC دامیناز، سیدروفور و ایندول استیک اسید و فعالیت‌های ضد قارچی سبب افزایش عملکرد گیاهان می‌گردند (De Souza et al., 2015). در گیاه بذرک، باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق انحلال فسفر و کمک به تأمین مواد مغذی ضروری رشد گیاه، عملکرد را افزایش دادند (Neeto et al., 2012). گزارش شده است باکتری‌های محرک رشد از طریق افزایش یکنواختی جوانه‌زنی و توسعه

درصد روغن و عملکرد دانه داشتند (Afshinfar et al., 2014). استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید خاکزی می‌تواند سبب تسهیل در ذخیره و حتی آزادسازی عناصر غذایی از منابع این عناصر گردند. با افزایش جذب عناصر غذایی، بیوماس گیاه می‌تواند افزایش یابد و به دنبال آن عملکرد روغن نیز به دلیل سرعت فتوسنتز بیشتر و افزایش تولید مواد فتوسنتزی افزایش یابد (Shoghi Kalkhoran et al., 2013).

درصد روغن گردد (Dehkhoda et al., 2013). تولید و تخریب نشاسته در مراحل ابتدایی توسعه صورت می‌گیرد درحالی‌که تجمع روغن در اواسط و اواخر مراحل فنولوژیک گیاه صورت گرفته در نتیجه تنش خشکی می‌تواند از طریق کاهش در طول پر شدن دانه سبب کاهش میزان روغن در مقایسه با شرایط فاقد تنش گردد (Nouraei et al., 2016). در بررسی واریته‌های گیاه بذرک، تنش خشکی سبب کاهش درصد روغن گردید (Mirshakari et al., 2012). در گیاه آفتابگردان، باکتری‌های محرک رشد تأثیر معنی‌داری بر



شکل ۷. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تلقیح باکتریایی بر درصد روغن

Fig7. The effect of irrigation levels and bacterial inoculation on Oil percentage

باکتریایی بود. باکتری‌های محرک رشد سبب افزایش تعداد سرشاخه‌های گل‌دار، تعداد کپسول و وزن هزار دانه تحت شرایط تنش شدند که این اجزای عملکرد نقش مهمی در افزایش عملکرد دانه خواهند داشت. درصد روغن در تیمارهای باکتریایی از افزایش چشمگیری نسبت به تیمارهای شاهد برخوردار بود. با توجه به نتایج حاصل و بروز خشک‌سالی در سال‌های اخیر در کشور، استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌عنوان راهکاری مؤثر در جهت بهبود رشد گیاه دانه روغنی بذرک به‌ویژه در شرایط کم‌آبیاری پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

طبق نتایج حاصل، با افزایش سطوح تنش مقادیر اکثر صفات مورد اندازه‌گیری کاهش یافت، با این وجود تیمارهای باکتریایی سبب تخفیف اثرات تنش نسبت به تیمار شاهد گردیدند. در بیشتر صفات مورد بررسی تیمارهای باکتریایی *Bacillus sp. strain1* و *Bacillus amyloliquefaciens* بیشترین تأثیر را در بهبود اثرات تنش داشته به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار عملکرد دانه، عملکرد زیستی و درصد روغن به‌عنوان صفات مهم مورد بررسی متعلق به این تیمارهای

منابع

Agami, R.A., Ghramh, H.A., Hashem, M., 2017. Seed inoculation with *Azospirillum lipoferum* alleviates the adverse effects of drought stress on wheat plants. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 90, 165- 173.

Afshinfar, P., Mehraban, A., Ganjali, H.R., 2014. Evaluation of the effect of growth multiplier bacteria's on qualitative function of sunflower oil in the area of Sistan. *International Journal of Farming and Allied Science*. 3, 791- 793.

- Arora, N.K., Tewari, S., Singh, R., 2013. Multifaceted plant associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPR. *Fundamentals and Advances*. 411- 449.
- Cassan, F., Lucangeli, C. D., Bottini, R., Piccoli, P. N., 2001. *Azospirillum* spp. metabolize [17, 17-2H2] gibberlin A20 to [17, 17- 2H2] gibberellin A1 in vivo in dy rice mutant seedlings. *Plant Cell Physiology*. 42, 763- 767.
- Chamani, F., Khodabandeh, N., Habibi, D., Asgharzadeh, A., Davoodi Fard, M., 2012. Effect of salinity on yield and yield components of inoculated wheat with plant growth promoting bacteria (*Azotobacter chroococcum*, *Azospirillum lipoferum*, *Pseudomonas putida*) and humic acid. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*. 8, 25-37. [In Persian with English summary].
- Dehkhoda, A., Naderi Darbaghshahi, M., Rezaei, A., Majd Nasiri, B., 2013. Effect of water deficiency stress on yield and yield component of sunflower cultivars in Isfahan. *International Journal of Farming Allied Science*. 2, 1319–1324.
- De Souza, R., Ambrosini, A., Passaglia, L. M. P., 2015. Plant growth promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*. 34, 401- 419.
- Esmaeili, M., Heidarzade, A., Ramezani, A., 2016. The effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and spray of micronutrient of two soybean (*Glycine max*) cultivars. *ARNP Journal of Agricultural and Biological Science*. 11, 63-68.
- Farshi, A., Siadat, H., Darbandi, S., Ansari, M., Kheirabi, J., Mir lotfi, M., Salamat, A., Sadat Miri, L.H., 2003. Management of irrigation water in field. 1st edition. 76, 178p. [In Persian].
- Furlan, F., Saatkamp, K., Gazolla Volpiano, C., De Assis Franco, F., Fonseca dos Santos, M., Cristina Gruszka Vendruscolo, E., Francisco Guimaraes, V., Carlos Torres da Costa, A., 2017. Plant growth promoting bacteria effect in withstanding drought in wheat cultivars. *Revista Scientia Agraria*. 18, 104- 113.
- Gholamalizadeh, R., Khodakaramian, G., Ebdali, A.A., 2017. Assessment of rice associated bacterial ability to enhance rice seed germination and rice growth promotion. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 60, 1- 13.
- Glick, B. R., 2010. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology advances*. 28, 367-374.
- Gupta, G., Parihar, S.S., Ahirwar, N.A.K., Snehi, S. K., Singh, V., 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Current and future prospects for development of sustainable agriculture. *Microbial and Biochemical Technology*. 7, 96- 102.
- Gururani, M.A., Upadhyaya, C.P., Baskar, V., Venkatesh, J., Nookaraju, A., Park, S.W., 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. *Plant Growth Regulation*. 32, 245–258.
- Hakam Alipour, S., Seyed Sharifi, R., 2015. The effect of seed inoculation by plant growth promoting bacteria on remobilization of photothynthetic materials in spring barley under different nitrogen and phosphorus fertilizer. *Soil Science Researches (Soil and Water Science)*. 29, 407- 425. [In Persian with English Summary].
- Hamidi, A., Asgharzadeh, A., Chokan, R., Dehghan Shoar, M., Ghalavand, A., Malakouti, M.J., 2007. Rhizobacteria (PGPR) biofertilizer application in maize (*Zea mays* L.) cultivation by adequate input. *Environmental Science*. 4, 1-20.
- Hosseini, Z., 2003. Common Methods on Decomposition of Food Materials. University of Shiraz Publication. 210p. [In Persian].
- Jamal, Q., Lee, Y.S., Jeon, H.D., Kim, K.Y., 2016. Effect of plant growth-promoting bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* Y1 on soil properties, Pepper seedling growth, rhizosphere bacterial flora and soil enzymes. *Plant protection Science*. 54, 129- 137.
- Kadkhodaei, A., Ehsanzadeh, P., 2011. The relationship between grain yield and oil content of flax with leaf chlorophyll, proline and soluble carbohydrates amounts under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Crop Science*. 42, 125- 131. [In Persian with English Summary].
- Khajepour, M. R., 2004. Industrial Crops. Technology University of Isfahan Publication. 571 p. [In Persian]
- Ludvikova, M., Griga, M., 2015. Transgenic flax/linseed (*Linum usitatissimum* L.)

- Expectations and reality. Czech Journal of Genetics and Plant Breeding. 51, 123- 141.
- Mahmood, A., Can Turgay, O., Farooq, M., Hayat, R., 2016. Seed biopriming with plant growth promoting rhizobacteria: a review. FEMS Microbiology Ecology. 92, 1-14.
- Masciarelli, O., Llanes, A., Luna, V.A., 2014. New PGPR co-inoculated with Bradyrhizobium japonicum enhances soybean nodulation. Microbiological Research. 169, 609- 615.
- Megala, S., Paranthaman, A., 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, 147- 150.
- Mirshekari, M., Amiri, R., Iran Nezhad, H., 2012. Effects of planting date and water deficit on quantitative and qualitative traits of flax seed. American Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Sciences. 14, 901- 913.
- 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. MSc dissertation, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran. [In Persian with English Summary].
- Neetu, N., Aggarwal, A., Tanwar, A., Alpa, A., 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, 237-243.
- Nihorimbere, V., Ongena, M., 2017. Isolation of plant growth promoting Bacillus strains with biocontrol activity in vitro. Merit Research Journal of Microbiology and Biological Science. 5, 13- 21.
- Nouraei, S., Rahimmalek, M., Saeidi, G., Bahreinejad, B., 2016. Variation in seed oil content and fatty acid composition of globe artichoke under different irrigation regimes. Journal of the American Oil Chemists Society. 93, 953- 962.
- Paulucci, N.S., Gallarato, L., Reguera, Y.B., Vicario, J.C., Cesari, A.B., Garcia de Lema, M.B., Dardanelli, M.S., 2015. *Arachis hypogaea* PGPR isolated from Argentine soil modifies its lipids components in response to temperature and salinity. Microbiological Research. 173, 1- 9.
- Pindi, P.K., Sultana, T., Vootla, P.K., 2014. Plant growth regulation of Bt-cotton through Bacillus species. Biotechnology. 4, 305- 315.
- Rahimzadeh, S., Pirzad, A.R., 2017. Microorganisms (AMF and PSB) interaction on linseed productivity under water deficit condition. International Journal of Plant Production. 11, 259- 273.
- Romero Perdomo, F., Abril, J., Camelo, M., Moreno Galvan, A., Pastrana, I., Rojas Tapias, D., Bonilla, R., 2017. *Azotobacter chroococcum* as a potentially useful bacterial biofertilizer for cotton (*Gossypium hirsutum*): Effect in reducing N fertilization. Revista Argentina De Microbiologia. 49, 377- 383.
- Santora, M.V., Cappellari, L.R., Giordano, W., Banchio, E., 2015. Plant growth-promoting effects of native Pseudomonas strains on *Mentha piperita* (peppermint): an in vitro Study. Plant Biology. 17, 1218- 1226.
- Shoghi Kalkhoran, S., Ghalavand, A., Modarres-Sanavy, S.A.M., Mokhtassi- Bidgoli, A., Akbari, P., 2013. Integrated fertilization system enhance quality and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Journal of Agricultural Science and Technology. 15, 1343- 1352.
- Torfi, V., Danesh Shahraki, A., Saeedi, K., 2016. Effect of plant growth promoting bacteria on morphological traits and essential oil of moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.). Plant Production (Journal of Scientific Agriculture). 39, 57- 70. [In Persian with English Summary].
- Turner, T.D, Mapiye, C., Aalhus, J.L., Beaulieu, A.D., Patience, J.F., Zijlstra, R.T., Dugan, M.E., 2014. Flaxseed fed pork: n-3 fatty acid enrichment and contribution to dietary recommendations. Meat Science. 96, 541- 547.
- Yang, J., Kloepper, J., Ryu, C.N., 2009. Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. Trends in Plant Science. 14, 1- 4.