مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۵ شماره ۱ صفحه‌های ۱ تا ۲۴ (۱۴۰۳)
مقاله پژوهشی

بررسی اثر کاربرد باکتری‌های محرک رشد و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات زراعی و محتوای اسانس بومادران در شرایط تنش خشکی

Effect of Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Salicylic acid on Agronomic Properties and Essential Oil Content of Yarrow (*Achillea millefolium* L.) under Drought Stress Conditions

محسن زارع پور[۱]، محمد مهدی رحیمی[۱*]، مسلم عبدی پور[۲*]، عبدالصمد کلیدری[۱]

۱-گروه زراعت، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کهگیلویه و بویراحمد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گچساران، ایران.

* نویسندگان مسئول، پست الکترونیک: (abdipur.m@gmail.com و mm.rahimi1351@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۱۲

چکیده

به‌منظور بررسی اثر باکتری‌های محرک رشد و اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی بر گیاه بومادران، آزمایشی به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در طی دو سال (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) در یک مزرعه آزمایشی در شهرستان باشت از توابع استان کهگیلویه و بویراحمد اجرا شد. تنش خشکی به عنوان عامل اصلی در دو سطح تنش خشکی و عدم تنش خشکی و فاکتورهای فرعی شامل محلول پاشی با اسید سالیسیلیک در دو سطح شاهد (محلول پاشی با آب مقطر) و محلول پاشی با اسید سالیسیلیک (۴۰۰ میلی گرم در لیتر) و استفاده از باکتری‌های محرک رشد در چهار سطح شاهد (عدم تلقیح با باکتری)، تلقیح با باکتری سودوموناس، تلقیح با باکتری ازتوباکتر و تلقیح با هر دو باکتری به‌ترتیب به پلات‌های اصلی و فرعی اختصاص داده شدند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب دو ساله نشان داد اثر سال، تنش خشکی، باکتری، اسید سالیسیلیک و برهمکنش اثر تنش خشکی × اسید سالیسیلیک × باکتری بر صفات ارتفاع بوته، عملکرد ساقه، وزن هزار دانه، عملکرد گل، عملکرد بیولوژیک و محتوای اسانس معنی‌دار بود. میانگین عملکرد گل در سال اول ۷۳۱/۴۵ کیلوگرم در هکتار بود که نسبت به سال دوم اختلاف معنی‌داری داشت. بیشترین ارتفاع بوته (۶۵/۹۴ سانتی‌متر) در تیمار کاربرد ازتوباکتر و اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری به‌دست آمد. این در حالی است که در هر دو شرایط عدم تنش و تنش خشکی بیشترین وزن هزار دانه (۰/۲۹ و ۰/۲۳ گرم)، عملکرد گل (۱۳۸۹ و ۴۹۲ کیلوگرم در هکتار)، عملکرد بیولوژیک (۸۶۳۴ و ۴۱۰۶ کیلوگرم در هکتار)، شاخص برداشت (۱۶/۰۹ و ۱۱/۹۹ درصد)، محتوای اسانس (۱/۴۱ و ۰/۸۰ درصد) و عملکرد اسانس (۱/۷۷ و ۱۹/۵۴ کیلوگرم در هکتار) در تیمار کاربرد همزمان دو باکتری و اسید سالیسیلیک به دست آمد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داد. نتایج این آزمایش نشان داد اگرچه تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار تمام صفات بویژه عملکرد گل، محتوای و عملکرد اسانس شد، کاربرد باکتری‌های محرک رشد و یا اسید سالیسیلیک بویژه در تیمار کاربرد همزمان دو باکتری و اسید سالیسیلیک باعث کاهش قابل توجه خسارت تنش خشکی بر عملکرد گل، محتوای و عملکرد اسانس در مقایسه با شاهد شد.

واژه های کلیدی: اسید سالیسیلیک، باکتری‌های محرک رشد، محتوای اسانس، عملکرد گل، شاخص برداشت.

مقدمه

کمبود آب از مهمترین عوامل محدود کننده تولید گیاهان زراعی در جهان به شمار می‌رود و این موضوع در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران از اهمیت بیشتری برخوردار است. عامل خشکی زمانی ایجاد می‌شود که ترکیبی از عوامل فیزیکی و محیطی باعث تنش در گیاه شده و در نتیجه رشد و عملکرد گیاه را کاهش دهند (Ghodrat and Bahrani, 2022). تنش خشکی

بسته به زمان، شدت و مدت تنش تاثیر متفاوتی بر گیاهان دارد. به‌هرحال اولین نشانه تنش خشکی در گیاه، معمولا با بازدارندگی سریع رشد رویشی اندام هوایی و به مقدار کمتر رشد ریشه همراه است که این تغییرات در نتیجه کاهش فشار آماس و نمو سلول است (Sedaghati *et al.*, 2021). این تغییرات با بسته شدن جزئی یا کامل روزنه‌ها و به دنبال آن کاهش تبخیر و جذب CO_2 فتوسنتزی صورت می‌گیرد. استمرار تنش خشکی در این حالت به پیری زودرس برگ‌های جوان و پژمردگی آنها، اختلال در نمو و سیستم تولید مثل، کاهش طول دوره گلدهی و فتوسنتزی، کاهش انتقال مواد حاصل از فتوسنتز جاری به دانه، کاهش سهم انتقال مجدد مواد ذخیره شده در دانه و در نهایت کاهش عملکرد گل، دانه و اسانس استخراج شده منجر می‌شود (Sharma and Zheng, 2019).

گیاه بومادران با نام علمی *Achillea millefolium* L. متعلق به تیره Asteraceae است که در نواحی مختلف اروپا، نواحی معتدل آسیا (بویژه ایران) و نواحی شمالی آمریکا می‌روید. این جنس بیش از ۱۰۰ گونه زینتی و دارویی دارد که ۱۹ گونه از آن در ایران گزارش شده است (Mozaffarian, 2008). این گیاه دارویی قابلیت رشد در شرایط خشک را داشته و در مقایسه با بسیاری از گیاهان دارویی به عنوان یک گیاه کم توقع به‌شمار می‌رود. بومادران از اهمیت اقتصادی بالایی در صنایع آرایشی، بهداشتی و دارویی برخوردار است و قرن‌ها در طب سنتی به عنوان مدر، قابض، بند آورنده خون، محرک گوارشی، محرک ترمیم زخم، ضد درد، ضد اسهال، ضد انگل، ضد نفخ و معرق کاربرد داشته است (Asgarirad *et al.*, 2010). ارزش دارویی بالای بومادران و ویژگی تحمل به خشکی، این گیاه را به یک گیاه هدف برای ارزیابی پتانسیل تولید اسانس در شرایط تنش خشکی در بسیاری از مطالعات تبدیل کرده است (Sharifi Ashorabadi *et al.*, 2009).

صرف‌نظر از روش‌های به‌نژادی که اغلب بلند مدت و هزینه‌بر هستند، افزایش تحمل به تنش خشکی از طریق تنظیم کننده‌های رشد از جمله روش‌های میان‌بری هستند که استفاده از آنها به دلیل آسان‌تر و ارزان‌تر بودن رو به گسترش است (Bhatta *et al.*, 2021). در این میان نقش اسید سالیسیلیک در القای تحمل به بسیاری از تنش‌های غیرزیستی بویژه خشکی مورد توجه قرار گرفته است (Ighbal *et al.*, 2021; Salarpour Ghoraba and Farahbakhsh, 2014). اسید سالیسیلیک یک ترکیب فنلی است که با داشتن خاصیت آنتی اکسیدانی در تنظیم فرایندهای فیزیولوژیکی گیاهان نقش دارد و به عنوان یک ملکول پیام رسان مهم در پاسخ‌های گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی شناخته شده است (Saleem *et al.*, 2021). اسید سالیسیلیک در خاک از طریق تقویت رشد میکروبی، بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی و فعالیت آنزیمی باعث بهبود تولید محصولات کشاورزی می‌شود (Khan *et al.*, 2020). نتایج مطالعات بر روی برخی از گیاهان زراعی نشان داد که فعالیت روبیسکو و سرعت فتوسنتز تحت تنش خشکی و در زمان تیمار با اسید سالیسیلیک افزایش پیدا کرده که این امر موجب افزایش عملکرد در مقایسه با گیاهانی شد که با اسید سالسیلیک تیمار نشده بودند (Khodary, 2004).

باکتری‌های محرک رشد از جمله کودهای زیستی مهمی هستند که نقش محلول کردن و افزایش فراهمی زیستی عناصر معدنی را دارند که بطور مستقیم با تثبیت نیتروژن و تولید هورمون‌های رشد و بطور غیرمستقیم با تولید انواع مواد آنتی‌بیوتیک و سیدروفورها[۱] سبب کاهش و یا پیشگیری از اثرات زیان‌آور بیمارهای گیاهی شده و بدین طریق رشد و عملکرد گیاهان زراعی را بهبود می‌بخشند (Boroujeni *et al.*, 2021). باکتری‌هایی نظیر سودوموناس با تولید اگزوپلی ساکاریدها[۲] سبب حفظ محتوای رطوبت خاک و افزایش تحمل گیاه در برابر تنش خشکی می‌شوند (Naseem and Bano, 2014). همچنین ترکیبات آلی فرار باکتریایی چون اسید استیک با تشکیل بیوفیلم در خاک می‌توانند به افزایش تحمل به خشکی در گیاهان کمک کنند (Liu and Zhang, 2015). افزایش عملکرد اسانس و کاهش هورمون اسید آبسیزیک در گیاهان بومادران تیمار شده با باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش خشکی در مطالعه Mirjalili و همکاران (2016) گزارش شده است. Alipour و همکاران (2021) نیز با مطالعه تاثیر باکتری‌های محرک رشد بر گیاه رازیانه در شرایط تنش رطوبتی دریافتند که تلقیح با این باکتری اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه، عملکرد زیستی، عملکرد اسانس و کلروفیل داشته و سبب کاهش معنی‌دار اثرات منفی تنش شده است.

۱- Siderophores

۲- Exopolysaccharides

اگرچه مطالعات زیادی برای ارزیابی تحمل به خشکی در گونه‌های دارویی مختلف انجام شده است، تاکنون برای ارزیابی اثر برهمکنش باکتری‌های محرک رشد و اسید سالیسیلیک در تعدیل اثرات تنش خشکی بر گیاه دارویی بومادران مطالعه‌ای انجام نشده است. تاثیر مثبت برهمکنش باکتری‌های محرک رشد و اسید سالیسیلیک در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر عملکرد گل و اسانس گیاه دارویی بومادران، ضمن یافتن یک رویکرد برای مقابله با تنش خشکی در این گیاه می‌تواند نوید بخش کاهش مصرف کودها و سموم شیمیایی در کشت گیاهان دارویی در کشور باشد و بدین طریق بتوان گامی در جهت تولید ارگانیک محصولات دارویی برداشت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور بررسی اثر کاربرد اسید سالیسیلیک و باکتری‌های محرک رشد بر خصوصیات زراعی و محتوای اسانس گیاه بومادران (*Achillea millefolium* L) تحت شرایط تنش خشکی طی دو سال متوالی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در یک مزرعه آزمایشی در شهرستان باشت از توابع استان کهگیلویه و بویراحمد (با مختصات ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۶۶۸ متر از سطح دریا) اجرا شد. پارامترهای آب و هوایی ثبت شده در نزدیکترین ایستگاه هواشناسی به مزرعه آزمایشی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این مطالعه که به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد، تنش خشکی به عنوان عامل اصلی در دو سطح آبیاری کامل (عدم تنش خشکی) و ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس خاک (تنش خشکی) و فاکتورهای فرعی شامل محلول پاشی با اسید سالیسیلیک در دو سطح شاهد (محلول پاشی با آب مقطر) و محلول پاشی با اسید سالیسیلیک به میزان ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر (Amin *et al.*, 2013; Hayati *et al.*, 2022) و استفاده از باکتری‌های محرک رشد در چهار سطح شاهد (عدم تلقیح با باکتری)، تلقیح با باکتری سودوموناس پوتیدا (*Pseudomonas putida*)، تلقیح با باکتری ازتوباکتر کروکوم (*Azotobacter chrococcum*) و تلقیح با هر دو باکتری بود. لازم به ذکر است برای ایجاد شرایط مشابه و دخالت ندادن تاثیر تیمارهای سال اول در نتایج سال دوم، در سال اول و در کنار قطعه کاشت شده یک قطعه مشابه انتخاب و تا سال بعد به حالت آیش گذاشته شد.

بافت خاک مزرعه آزمایشی لومی بود و ۶۰ تا ۹۰ سانتیمتر عمق داشت. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۲ ارائه شده است. میانگین رطوبت وزنی خاک در زمان کاشت در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲۵/۲۱ و ۲۶/۷۰ درصد بود. به‌منظور تعیین دقیق وضعیت رطوبتی خاک آزمایش بطور همزمان از تانسیومتر و بلوک گچی در پلات‌های آزمایشی استفاده شد (Biglouei *et al.*, 2013). از دستگاه صفحه فشاری[۱] برای به‌دست آوردن نقطه ظرفیت زراعی[۲] (FC) و نقطه پژمردگی دائم[۳] (PWP) استفاده شد. رطوبت حجمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی برابر با ۳۲/۴ درصد و در نقطه پژمردگی ۱۵/۲ درصد بود (بنابراین آب قابل استفاده در این خاک ۱۵۲ میلیمتر در یک متر عمق خاک است). برای تعیین آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری از معادله (۱) استفاده شد (Alizadeh, 2004).

$$Dn = \frac{FC-PWP}{100} \times \rho b \times Dr \times F \qquad (۱)$$

در این معادله، Dn مقدار آب در هر نوبت آبیاری (میلیمتر)، FC درصد وزنی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی، PWP درصد وزنی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم، ρb جرم مخصوص ظاهری خاک (۱/۴۵ گرم بر سانتیمتر مکعب)، Dr عمق موثر ریشه (میلی‌متر) وF ضریب تخلیه رطوبت خاک (درصد) هستند. انتقال آب از منبع تا کرت‌های آزمایشی با استفاده از لوله پلی اتیلن و از طریق یک پمپ صورت می‌گرفت.

۱- Pressure plate ۲- Field capacity ۲- Permanent wilting point

جدول ۱. داده‌های هواشناسی منطقه آزمایش در طی دو سال.

Table 1. Meteorological data of the test area during two years.

بارش (میلی‌متر) Rainfall (mm)	میانگین رطوبت نسبی (٪) Average relative humidity (%)	میانگین دما (درجه سانتی گراد) Average temperature (°C)	ماه های سال Months of year	سال Year
9.4	33	18.3	فروردین April	1398 2019
7.2	42	24	اردیبهشت May	
2.1	25	29.2	خرداد June	
-	13	34.3	تیر July	
-	16	38.6	مرداد August	
-	17	28.7	شهریور September	
125.2	31	17	فروردین April	1399 2020
6.4	44	26.3	اردیبهشت May	
3.1	25	30.4	خرداد June	
-	12	35	تیر July	
-	17	40.2	مرداد August	
-	14	26.2	شهریور September	

منبع: اداره هواشناسی استان کهگیلویه و بویراحمد Source: Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Meteorological Department

جدول ۲- نتایج تجزیه خاک آزمایش در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر.

Table 2. Results of soil analysis at depth of 0-30 cm.

پتاسیم قابل جذب Absorbable potassium (mg/kg)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg/kg)	نیتروژن Nitrogen (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	مواد خنثی شونده Neutralizing substances (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS/m)	درصد اشباع Percentage of saturated
214	7.4	0.109	1.053	41	7.6	0.62	40

پس از آماده‌سازی زمین، بر اساس نتایج تجزیه خاک، هیچ کود شیمیایی به خاک اضافه نشد. قطعه زمین آماده شده با بند کشی به سه بلوک مساوی تقسیم و تیمارهای آزمایشی طبق نقشه طرح آزمایشی در زمین پیاده شد. هر بلوک شامل ۱۶ کرت بود و هر کرت شامل ۴ خط کشت به طول ۵ متر با فاصله ۵۰ سانتی متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله بلوک‌ها از یکدیگر ۲ متر در نظر گرفته شد.

بذر مورد استفاده از موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و دو باکتری سودوموناس و ازتوباکتر از موسسه تحقیقات خاک و آب، بخش تحقیقات بیولوژی خاک تهران تهیه گردید. کاشت بذور در گلدان‌های سفالی و در گلخانه در دمای ۳۰-۲۵ درجه

سلسیوس در اوایل اسفند ماه (۳ و ۵ اسفند به‌ترتیب برای سال اول و دوم) انجام شد. بعد از سه هفته و جوانه‌زنی کامل گیاهان، گلدان‌ها به مدت ۲ هفته در معرض هوای آزاد قرار گرفتند. در نیمه دوم فروردین ماه گیاهان در مرحله ۶-۴ برگی به همراه خاک گلدان به زمین اصلی انتقال یافتند. به‌منظور تلقیح باکتری به خاک، بعد از تهیه سوسپانسیون با غلظت ۳×۱۰^{۸} CFU m/L، به میزان ۱۰ میلی‌گرم سوسپانسیون از هر باکتری طی دو مرحله (جمعا ۲۰ میلی‌گرم) به خاک در منطقه ریشه گیاه اضافه شد (Naeem and Otroshy, 2015). تلقیح اول در مرحله ۳-۲ برگی و در گلدان‌ها انجام گردید و تلقیح دوم در مرحله ۴ برگی و در زمان انتقال گیاهان به زمین اصلی انجام گردید. در تیمارهای تلفیقی دو باکتری در خاک، از سوسپانسیون هر باکتری مقدار ۱۰ میلی‌گرم (جمعا ۲۰ میلی‌گرم) به خاک گلدان اضافه شد. آبیاری بلافاصله بعد از کاشت صورت گرفت و همزمان با کاشت، تانسیومترها در عمق ۳۵ سانتی‌متری زمین برای تمام تیمارها در کرت‌های آزمایشی کار گذاشته شدند. تا حصول اطمینان از استقرار گیاهان جوان (حدود ۱۵ روز) هیچ تنش خشکی اعمال نشد و بعد از این زمان تیمارهای عدم تنش (آبیاری کامل) و تنش خشکی مطابق با روش توصیف داده شده (Biglouei *et al.*, 2013) اعمال گردید. تیمار محلول پاشی اسید سالیسیلیک طی دو مرحله، ابتدا ۱۰ روز بعد از انتقال گیاهچه‌ها به مزرعه و اطمینان از استقرار آنها و سپس ۲۵ روز بعد از اولین مرحله محلول پاشی انجام شد (Haiati and Roshan, 2014; Salarpour Ghoraba and Farahbakhsh, 2014). تنش خشکی نیز ۵ روز بعد از اولین محلول پاشی اسید سالیسیلیک شروع (۵ اردیبهشت) و تا زمان برداشت (۲۰ مرداد) جمعا ۱۰۸ روز اعمال گردید. در طی هر دو سال آزمایش، مبارزه با علف‌های هرز در طی سه نوبت و به صورت مکانیکی با دست انجام شد. صفات مورد بررسی شامل ارتفاع بوته (فاصله انتهای طوقه در کف زمین تا انتهای شاخه گل‌دهنده به سانتی‌متر)، وزن هزار دانه (گرم)، عملکرد گل (کیلوگرم در هکتار)، عملکرد بیولوژیک (کل وزن خشک بوته به کیلوگرم در هکتار)، شاخص برداشت (نسبت عملکرد گل به عملکرد بیولوژیک به درصد)، محتوای اسانس (درصد) و عملکرد اسانس (کیلوگرم در هکتار) بود.

برای محاسبه ارتفاع، تعداد ۱۰ بوته بطور تصادفی در انتهای فصل رشد از هر تیمار آزمایشی انتخاب و از میانگین نمونه‌ها برای این منظور استفاده شد. عملیات برداشت در طی هر دو سال در نیمه دوم مردادماه انجام شد. برای این منظور دو خط از طرفین حذف و از ابتدا و انتهای کرت نیز ۰/۵ متر به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. بوته‌ها بصورت کف‌بر برداشت شده و گل و ساقه آنها جدا شدند. گل‌های برداشت شده (در مرحله گلدهی کامل و ابتدای روز) به مدت دو هفته در سایه خشک و توزین شدند. اندام رویشی هوایی در داخل آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفتند تا خشک شوند و سپس توزین شدند.

اندازه‌گیری محتوای اسانس به روش تقطیر با استفاده از دستگاه کلونجر انجام شد. بدین منظور از هر کرت آزمایشی یک نمونه ۱۰۰ گرمی از گل آسیاب شده همراه با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر درون بالن ۱۰۰۰ سی‌سی قرار داده و سه ساعت حرارت داده شد. در اثر حرارت و فشار بخار آب غده‌های حاوی اسانس شکسته و اسانس همراه با بخار آب وارد مبرد گردید. در مبرد عمل میعان صورت گرفته و قطرات اسانس درون آب به صورت دو فاز مشخص به طرف لوله مدرج حرکت می‌کند که به دلیل سبک تر بودن اسانس نسبت به آب، اسانس روی آب تجمع پیدا می‌کند و آب اضافی از طریق لوله رابط به بالن باز می‌گردد. سپس با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ اسانس اندازه‌گیری گردید. اسانس به‌دست آمده پس از آبگیری توسط سدیم سولفات برای آنالیزهای بعدی در دمای یخچال (۴ درجه سلسیوس) نگهداری شد. برای محاسبه محتوی اسانس (درصد) در کلیه تیمارها از نسبت وزن اسانس به‌دست آمده (گرم) به وزن گل خشک (۱۰۰ گرم) طبق رابطه $100 \times$ ((گرم)وزن گل خشک)/((گرم) وزن اسانس)) = محتوی اسانس استفاده شد. پس از محاسبه درصد وزنی اسانس، از طریق ضرب کردن محتوای اسانس (درصد) به‌دست آمده در عملکرد گل (گرم در ۴ مترمربع) عملکرد اسانس (گرم در ۴ مترمربع) برای هر تکرار طبق رابطه(%) محتوی اسانس × (گرم) عملکرد گل خشک = عملکرد اسانس استفاده شد. لازم به ذکر است برای تعیین درصد و عملکرد اسانس در کلیه تیمارها، ابتدا محاسبه برمبنای گل برداشت شده (گرم) برای هر تکرار در مساحت برداشتی (مساحت باقیمانده بعد از حذف دو خط از طرفین و نیم متر از ابتدا و انتهای کرت) یعنی ۴ متر مربع انجام شد و سپس به کیلوگرم در هکتار تبدیل شد.

پس از جمع آوری داده ها و بررسی نرمال بودن آنها، تجزیه واریانس داده ها با نرم افزار SAS نسخه 9.4 (SAS Institute, 2017) و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها در ارتباط با ارتفاع بوته نشان داد که اثر سال، تنش خشکی، کاربرد باکتری‌های محرک رشد، اسید سالیسیلیک و اثر متقابل تنش خشکی × باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل باکتری‌های محرک رشد × تنش خشکی و اسید سالیسیلیک × تنش خشکی در سطح احتمال ۵ درصد برای این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر سال نشان دادند که ارتفاع بوته در سال اول ۴۹/۰۲ سانتی‌متر بود که نسبت به سال دوم (۴۶/۵۷ سانتی‌متر) اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۴). تاثیر تیمارهای آبیاری بر ارتفاع بوته نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته به میزان ۲۹/۵۸ درصد در مقایسه با شاهد (عدم تنش خشکی) شده است (جدول ۵). بر اساس نتایج میانگین دو ساله، ارتفاع گیاهان تیمار شده با اسید سالیسیلیک افزایش معنی‌داری (۱۶/۶۲ درصد) نسبت به گیاهان تیمار نشده نشان داده‌اند. نتایج برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد اسید سالیسیلیک نشان داد که کاربرد اسید سالیسیلیک در مقایسه با عدم کاربرد آن در شرایط تنش موجب افزایش ۲۴/۹۶ درصدی و در شرایط عدم تنش موجب افزایش ۱۰/۷۰ درصدی این صفت شده است (شکل ۱). این تفاوت نقش پررنگ‌تر این کود زیستی را در جلوگیری از کاهش ارتفاع در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شرایط عدم تنش خشکی نشان می‌دهد.

کاربرد باکتری محرک رشد نیز باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته نسبت به شاهد شد و در مقایسه تاثیر دو باکتری بر ارتفاع بوته می‌توان گفت باکتری ازتوباکتر بویژه در شرایط تنش نقش موثرتری در کاهش اثرات منفی تنش بر این صفت داشته است (شکل ۱). به‌هرحال صرف‌نظر از تیمار ترکیبی ازتوباکتر و اسید سالیسیلیک که بیشترین ارتفاع بوته (۶۵/۹۵ سانتی‌متر) در شرایط عدم تنش را نشان دادند، بیشترین ارتفاع بوته و به عبارتی کمترین کاهش ارتفاع بوته در شرایط تنش مربوط به تیمار کاربرد همزمان دو باکتری بویژه در ترکیب با اسید سالیسیلیک بوده است. این نتایج اثر هم افزایی باکتری‌های محرک رشد و اسید سالیسیلیک را در افزایش ارتفاع بوته نشان می‌دهند.

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب مربوط به صفات مورد مطالعه طی دو سال روی بومادران (*Achillea millefolium* L.)

Table 3- Combined analysis of variance related to the studied traits during two years on yarrow (*Achillea millefolium* L.)

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	وزن هزار دانه Thousand seed weight	عملکرد گل Flower yield	عملکرد بیولوژیک Biological Yield	شاخص برداشت Harvest index	محتوای اسانس Essential oil content	عملکرد اسانس Essential oil yield
سال (Y)	1	100165.9179**	1.43874595**	1956914779**	1546433418**	0.7452	12.40181586**	3.8637**
تکرار (سال)	4	13.2919	0.00006603	4120.05	155403	0.329544	0.00059457	0.14652
تنش خشکی (A)	1	6173.4432**	0.2717339**	7319245.38**	483601003**	50.376646**	1.6963091**	2.5496**
سال×تنش خشکی (Y×A)	1	2472.1543**	0.09769758**	3406008.4**	171927038**	27.456411**	0.75595476**	1.4347*
خطای a (Error a)	4	50.9484	0.00001514	300.97	631153	0.188515	0.00001089	0.07453
باکتری(B)	3	2165.0311**	0.08075282**	2255220.91**	150723044**	22.879321**	0.53266011**	3.2108**
اسید سالیسیلیک (C)	1	857.9781**	0.04459338**	1684144.43**	99261488**	16.383657**	0.39616021**	2.7465**
سال×باکتری (Y×B)	3	956.9877**	0.02566656**	925126.59**	57519238**	6.838774**	0.30477461**	2.0855**
سال×سالیسیلیک (Y×C)	1	399.9543**	0.02764273**	657110.86**	40679810**	5.140438**	0.17370037**	0.8651*
A×B	3	99.96*	0.00004591	15975.88*	1466	27.093022**	0.00938719*	0.4632*
A×C	1	71.5974*	0.00063641	10725.4	135077	8.88393**	0.00158205	0.1928
B×C	3	46.8496	0.00107066*	42967.92**	3214502**	3.305685**	0.01464354**	0.2776
سال×تنش خشکی×باکتری (Y×A×B)	3	64.2883*	0.00153288**	15799.89*	1256485*	2.164682**	0.00684619	0.3081
سال×تنش خشکی×سالیسیلیک (Y×A×C)	1	14.2111	0.00016658	8950.86	444655	2.859788*	0.00129788	0.4764
سال×باکتری× سالیسیلیک (Y×B×C)	3	22.5678	0.00148346**	16768.51*	891018*	2.587437**	0.00820587*	0.2459
تنش خشکی×باکتری×سالیسیلیک (A×B×C)	3	156.4196**	0.0022014**	71280.3**	7699382**	1.127887*	0.02774378**	0.6217**
سال×تنش خشکی×باکتری× سالیسیلیک (Y×A×B×C)	3	14.8886	0.00141611**	49702.53**	1436290**	2.065254**	0.00298672	0.3049
خطای b (Error b)	56	17.6875	0.00029697	5650.89	316266	0.388625	0.00267993	0.1335
ضریب تغییرات (CV)		9.21	9.38	11.03	9.21	10.11	9.726398	5.21

* و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

* and **: Significant at the 0.05 and 0.01 levels of probability, respectively.

جدول۴- نتایج مقایسه میانگین ساده صفات طی دو سال.

Table 4. Results of comparison of simple mean of traits during two years.

عملکرد اسانس Essential oil yield (kg/ha)	محتوای اسانس Essential oil (%)	شاخص برداشت Harvest index	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد گل Flower yield (kg/ha)	وزن هزار دانه Thousand seed yield (g)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	سال (Year)
6.29 a	0.86 a	13.07 a	5593.80 a	731.45 a	0.179 b	49.02 a	سال اول First year
5.43 b	0.81 b	12.54 a	5346.57b	670.29 b	0.195 a	46.57 b	سال دوم Second year

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن ندارد.

In each column, the means with common letters are not significantly different in the level of 5 % probability with Duncan test.

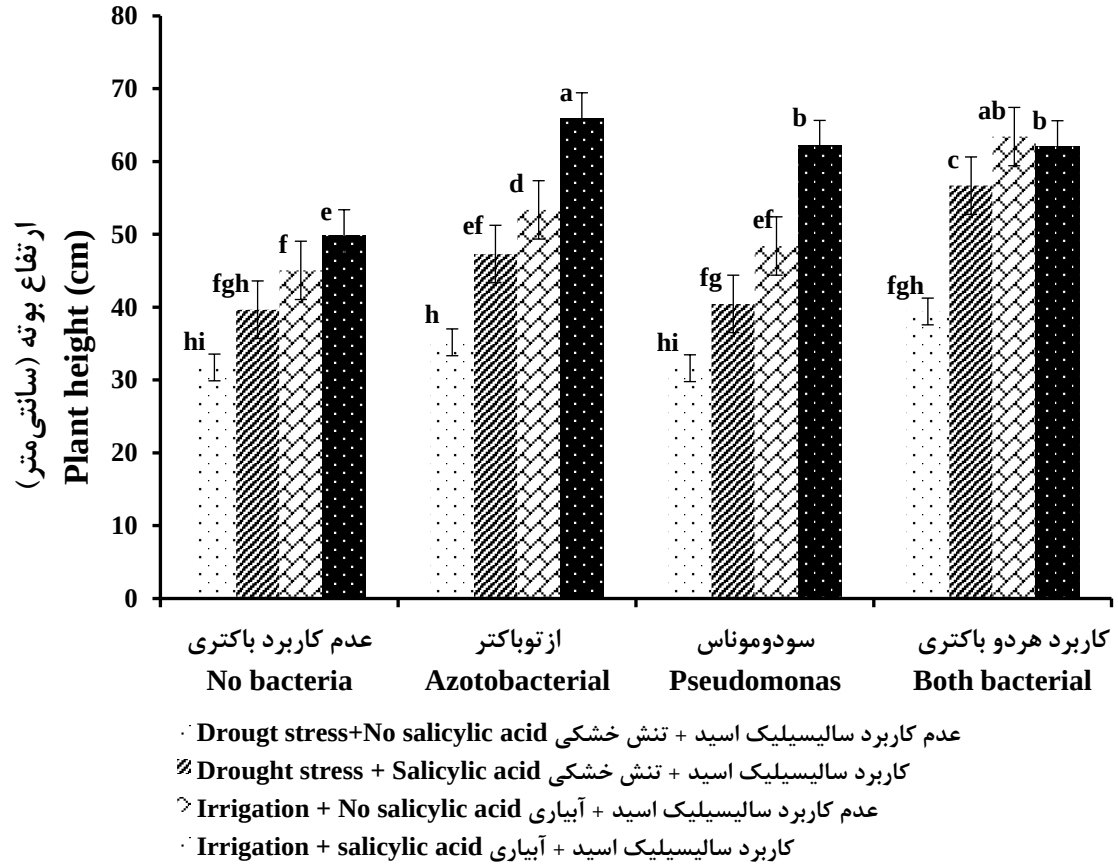
جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده صفات .

Table 5. Results of comparison of simple mean of traits.

عملکرد اسانس Essential oil yield (kg/ha)	محتوای اسانس Essential oil (%)	شاخص برداشت Harvest index	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد گل Flower yield (kg/ha)	Thousand seed yield (g)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	سطوح تیماری Treatment levels	تیمار Treatment
0.67 f	0.36 g	7.18 f	2533.82 g	182.02 g	0.067 f	31.73 f	تنش خشکی Drought stress	آبیاری Irrigation
5.59 c	0.78 c	10.87 d	6532.12 a	710.27 bc	0.194 b	45.06 c	عدم تنش خشکی Non-drought stress	
3.13 e	0.57 f	9.03 e	4532.97 f	446.14 f	0.131 de	38.39 e	عدم محلول پاشی Non- spraying	سالیسیلیک اسید Salicylic acid
5.52 c	0.73 cd	12.25 b	5203.06 d	665.05 d	0.156 cd	44.77 c	محلول پاشی Spraying	
4.32 d	0.656 e	10.64 d	4868.01 e	555.60 e	0.143 d	41.58 d	عدم تلقیح باکتری No inoculation	تلقیح باکتری
7.68 b	0.912 ab	12.31 b	5604.05 c	732.88 b	0.205 ab	50.45 b	ازتوباکتر Azotobacterial	
5.95 c	0.785 c	11.58 c	5247.65 d	649.49 d	0.169 c	45.66 c	سودوموناس Pseudomonas	
10.04 a	0.983 a	13.12 a	6161.03 b	865.51 a	0.231 a	55.41 a	Both bacteria	

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن ندارد.

In each column, the means with common letters are not significantly different in the level of 5 % probability with Duncan test.



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر ارتفاع بوته. ستون‌های دارای حروف مشترک بدون اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

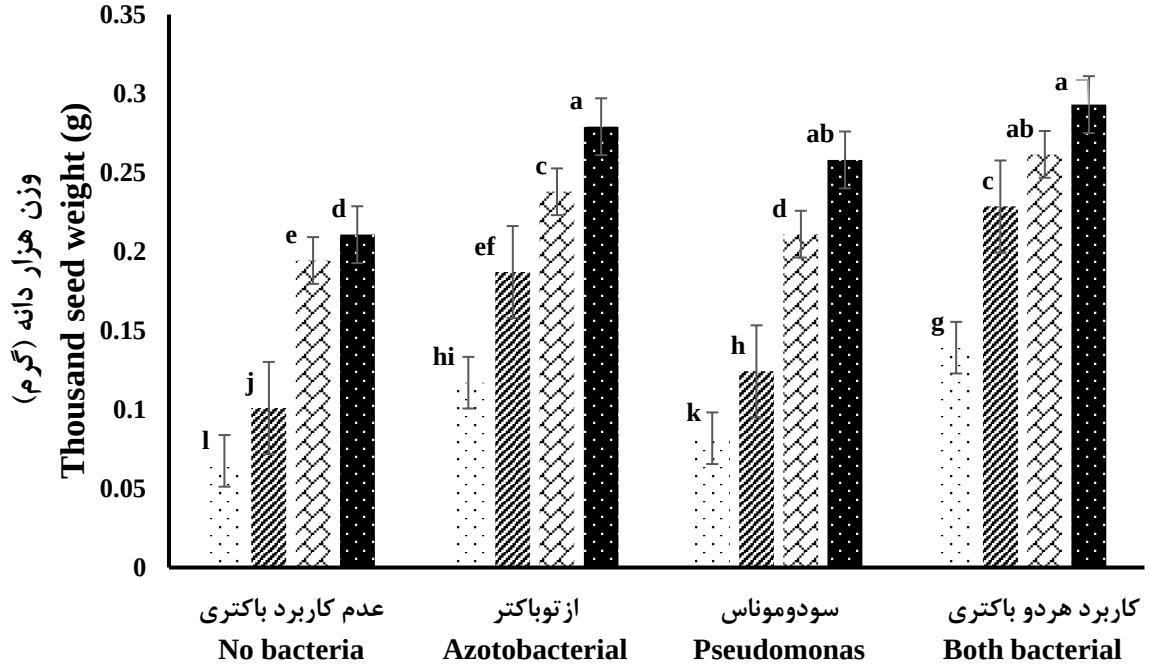
Fig. 1. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on plant height. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

وزن هزار دانه

نتایج حاصل نشان دادند که اثر سال، تنش خشکی، کاربرد سالیسیلیک اسید، باکتری و برهمکنش سه گانه تنش خشکی × باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۱ درصد و برهمکنش دوگانه باکتری باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۵ درصد بر این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر سال نشان دادند که وزن هزار دانه در سال دوم معادل ۰/۱۹۵ گرم بود که نسبت به سال دوم اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۴).

نتایج دو ساله مربوط به تاثیر تیمارهای آبیاری بر این صفت نشان دادند که وزن هزار دانه در تیمار آبیاری کامل معادل ۰/۱۹۴ گرم بود که با تیمار تنش خشکی اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۵) و تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه به میزان ۶۵/۴۶ درصد در مقایسه با شاهد (گیاهان آبیاری شده) شده است. همچنین وزن هزار دانه در اثر استفاده از اسید سالیسیلیک افزایش معنی‌داری معادل با ۱۶/۰۳ درصد در مقایسه با شاهد محلول پاشی نشده نشان داده است. نتایج برهمکنش اسید سالیسیلیک و تنش خشکی افزایش ۴۹/۶۳ درصدی وزن هزار دانه نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۸/۴۱ درصدی نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش خشکی) شده است (شکل ۲). کاربرد باکتری‌های محرک رشد نیز منجر به افزایش معنی‌دار این صفت در مقایسه با شرایط عدم تلقیح شد، بطوریکه گیاهان تلقیح نشده با باکتری‌ها کاهش ۴۱/۰۳ درصدی وزن هزار دانه را در مقایسه با گیاهان تلقیح شده با باکتری‌ها نشان دادند (جدول ۵). نتایج دو ساله برهمکنش کاربرد باکتری و تنش خشکی نیز افزایش معنی‌دار ۶۶/۹۱ ٪ عملکرد ساقه نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که استفاده از این باکتری‌ها در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۲۱/۸۴ ٪ نسبت به شاهد (گیاهان

تیمار نشده و در شرایط عدم تنش) شده است. این نتایج اهمیت استفاده از باکتری‌های محرک رشد در کاهش اثرات منفی تنش بر این صفت در مقایسه با شرایط عدم تنش خشکی را نشان می‌دهد (شکل ۲). علیرغم کارایی بالای سودوموناس، کاربرد ازتوباکتر در برهمکنش با تیمارهای آبیاری و اسید سالیسیلیک با نتایج بهتری همراه بوده است. وزن هزار دانه بالای در تیمار کاربرد دو باکتری در مقایسه با تیمارهای کاربرد تکی ازتوباکتر و سودوموناس، اثر هم‌افزایی این دو باکتری را بر روی این صفت نشان می‌دهند. صرف‌نظر از اثر هم‌افزایی این باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر این صفت بودند بطوریکه بالاترین وزن هزار دانه در شرایط تنش (۰/۲۲۸ گرم) و عدم تنش (۰/۲۹۳ گرم) مربوط به تیمارهای برهم‌کنش کاربرد دو باکتری × اسید سالیسیلیک بوده است (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر وزن هزار دانه. ستون‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

Fig. 2. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on thousand seed weight. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

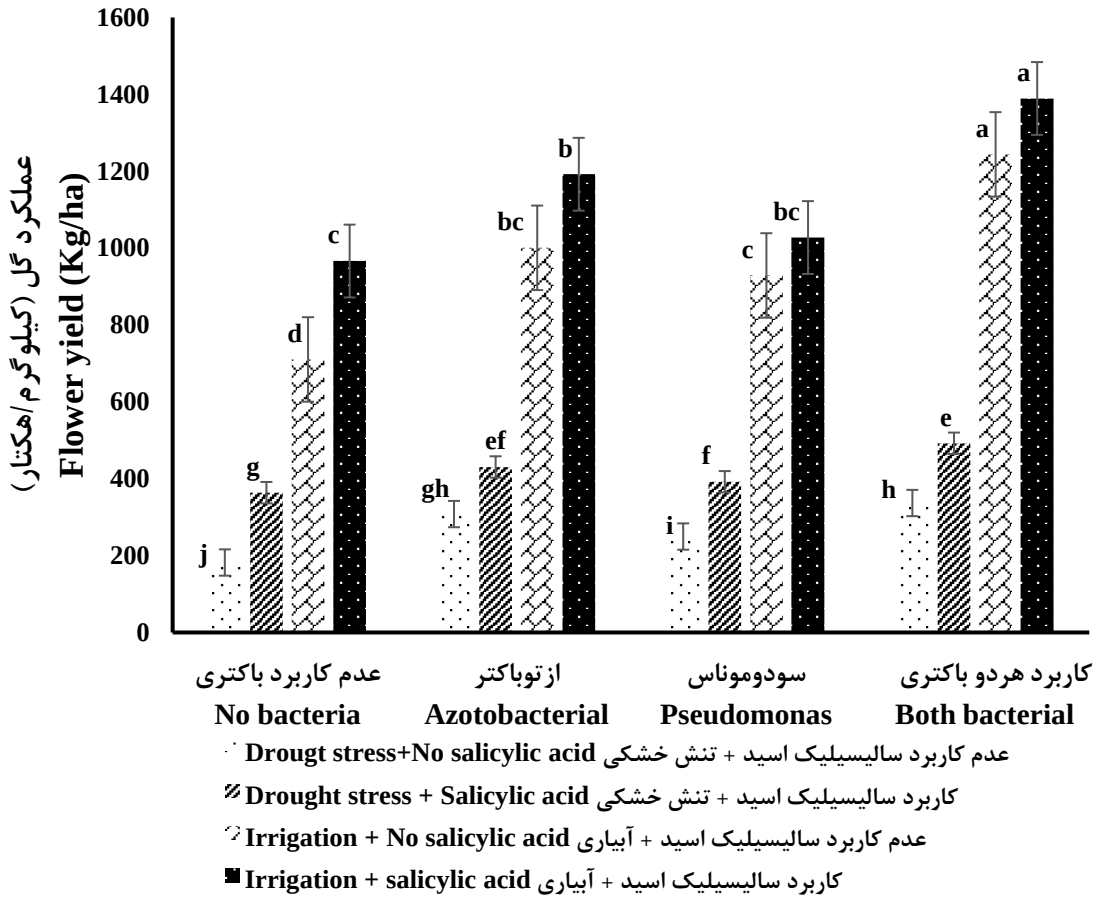
عملکرد گل

بر اساس نتایج تجزیه واریانس مرکب دو ساله، اثر سال، تنش خشکی، کاربرد سالیسیلیک اسید، باکتری و برهمکنش دوگانه باکتری × اسید سالیسیلیک و سه گانه تنش خشکی × باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۱ درصد و برهمکنش دوگانه تنش خشکی × باکتری بر عملکرد گل معنی‌دار بودند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین این صفت در سال‌های مختلف نشان داد که بیشترین عملکرد گل معادل ۷۳۱/۴۵ کیلوگرم در هکتار مربوط به سال اول بود که نسبت به سال دوم اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۴).

عملکرد گل بر اساس نتایج میانگین دو ساله در تیمار آبیاری کامل معادل ۷۱۰/۲۷ کیلوگرم در هکتار بود که با تیمار تنش خشکی اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۵). کاهش ۷۴/۳۷ درصدی عملکرد گل در مقایسه با شرایط تنش خشکی تاثیر شدیدتر تنش خشکی بر صفات زایشی را در مقایسه با صفات رویشی نشان می‌دهد.

این صفت در اثر استفاده از اسید سالیسیلیک نیز افزایش معنی‌داری معادل با ۲۶/۰۸ درصدی در مقایسه با شاهد محلول پاشی نشده نشان داد. نتایج برهمکنش اسید سالیسیلیک و تنش خشکی افزایش ۵۸/۹۹ درصدی عملکرد گل نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۳۶/۰۵ درصدی نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش خشکی) شده است (شکل ۳). این نتایج کارآیی بالاتر محلول پاشی با اسید سالیسیلیک در افزایش این صفت در مقایسه با شرایط عدم تنش را نشان می‌دهند. نتایج مقایسه میانگین دو ساله، افزایش معنی‌دار عملکرد گل در گیاهان تلقیح شده با باکتری‌ها را به میزان ۳۴/۸۶ درصد در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده نشان داد (جدول ۵).

برهمکنش کاربرد باکتری و تنش خشکی نیز افزایش معنی‌دار ۶۳/۸۱ درصدی عملکرد گل نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که استفاده از این باکتری‌ها در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۲۰/۵۰ درصدی نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش) شده است. این نتایج اهمیت استفاده از باکتری‌های محرک رشد در کاهش اثرات منفی تنش بر این صفت در مقایسه با شرایط عدم تنش خشکی نشان می‌دهد (شکل ۳). باتوجه به نتایج کاربرد باکتری‌ها، کاربرد ازتوباکتر در مقایسه با سودوموناس در برهمکنش با تیمارهای آبیاری و اسید سالیسیلیک با نتایج بهتری همراه بوده است. عملکرد بالای گل در تیمار کاربرد دو باکتری در مقایسه با تیمارهای کاربرد تکی ازتوباکتر و سودوموناس، اثر هم‌افزایی این دو باکتری را بر روی این صفت نشان می‌دهند. صرف‌نظر از اثر هم‌افزایی این باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر این صفت بودند بطوریکه بالاترین عملکرد گل در شرایط تنش (۰/۲۲۸ گرم) و عدم تنش (۰/۲۹۳ گرم) مربوط به تیمارهای برهم‌کنش کاربرد دو باکتری × سالیسیلیک اسید بوده است (شکل ۳).



شکل ۳- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر عملکرد گل. ستون‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

Fig. 3. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on flower yield. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

عملکرد بیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در ارتباط با عملکرد بیولوژیک نشان داد، اثر سال، تنش خشکی، کاربرد باکتری، اسید سالیسیلیک، برهمکنش دوگانه باکتری × اسید سالیسیلیک و برهمکنش سه گانه تنش خشکی × باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۱ درصد و کاربرد اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۵ درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بودند (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین سال‌ها، بیشترین عملکرد بیولوژیک معادل ۵۵۹۳/۸۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به سال اول بود که نسبت به سال دوم اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۴).

بر اساس نتایج دو ساله تاثیر تیمارهای آبیاری بر عملکرد بیولوژیک، بیشترین عملکرد بیولوژیک در تیمار آبیاری کامل تولید گردید که معادل ۷۵۳۰/۵۹ کیلوگرم در هکتار بود که با عملکرد بیولوژیک تولید شده در شرایط تنش خشکی (۳۴۰۹/۷۸ کیلوگرم در هکتار) اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۵).

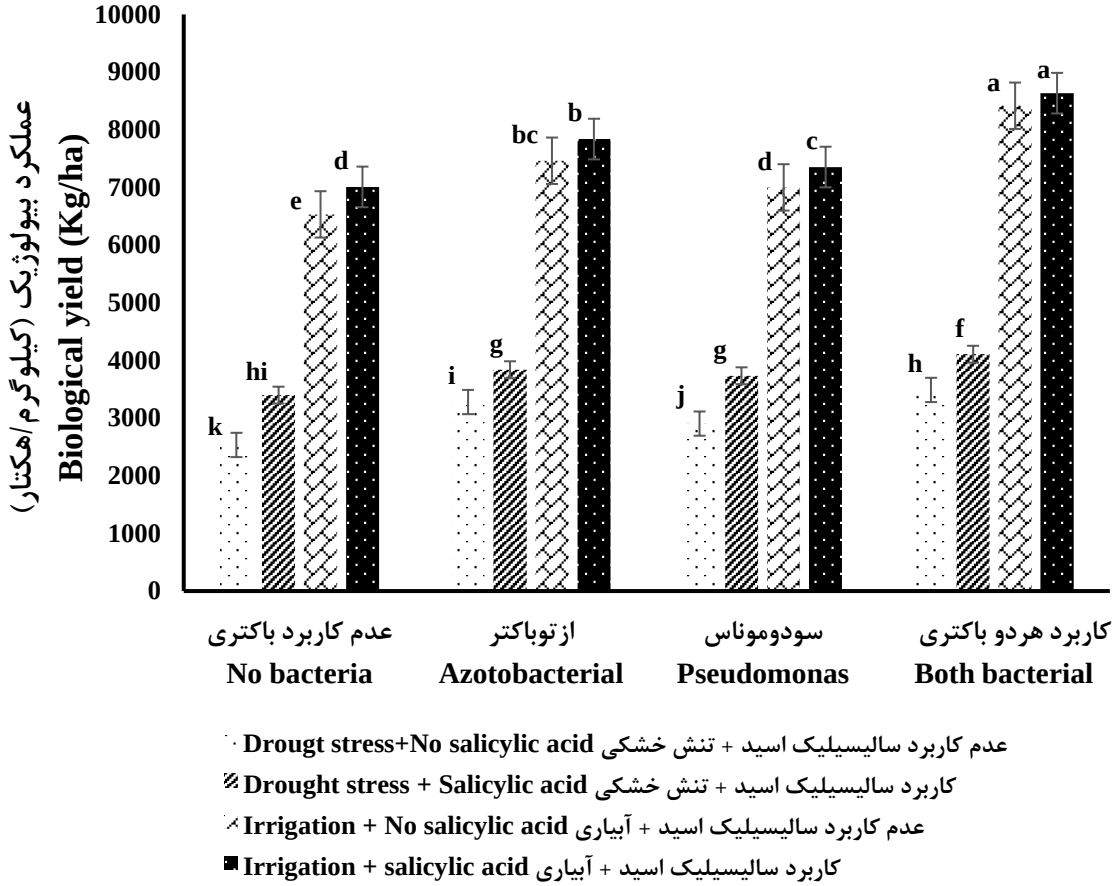
همچنین عملکرد بیولوژیک در اثر استفاده از اسید سالیسیلیک افزایش معنی‌داری معادل با ۱۰/۳۲ درصد در مقایسه با شاهد محلول پاشی نشده نشان داده است. نتایج برهمکنش اسید سالیسیلیک و تنش خشکی افزایش ۳۴/۰۹ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۷/۲۹ درصدی نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش خشکی) شده است (شکل ۴). کاربرد باکتری‌های محرک رشد نیز منجر به افزایش معنی‌دار این صفت در مقایسه با شرایط عدم تلقیح شد، بطوریکه گیاهان تلقیح شده با باکتری‌ها افزایش ۱۶/۴۹ درصدی عملکرد بیولوژیک را در مقایسه با گیاهان تلقیح شده با باکتری‌ها نشان دادند (جدول ۵). نتایج دو ساله برهمکنش کاربرد باکتری (بدون کاربرد سالیسیلیک اسید) و تیمارهای آبیاری نیز به ترتیب افزایش ۲۷/۲۰ و ۲۸/۸۴ درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به شاهد را در هر دو شرایط تنش خشکی و آبیاری کامل نشان داد (شکل ۵). صرف‌نظر از کارآیی بالای کاربرد هر کدام از دو باکتری در افزایش عملکرد بیولوژیک در برهمکنش با تیمارهای آبیاری (محلول پاشی و عدم محلول پاشی سالیسیلیک اسید)، کاربرد ازتوباکتر در مقایسه با سودوموناس در اکثر ترکیبات تیماری با نتایج بهتری همراه بوده است (شکل ۴). عملکرد بیولوژیک بالا در تیمار کاربرد دو باکتری در مقایسه با تیمارهای کاربرد تکی ازتوباکتر و سودوموناس، اثر هم‌افزایی این دو باکتری را بر روی این صفت نشان می‌دهند. صرف‌نظر از اثر هم‌افزایی این باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر این صفت بودند بطوریکه بالاترین عملکرد بیولوژیک در شرایط تنش (۴۱۰۶/۷۲ کیلوگرم در هکتار) و عدم تنش (۸۶۳۴/۰۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمارهای برهم‌کنش کاربرد دو باکتری × سالیسیک اسید بوده است (شکل ۴).

شاخص برداشت

نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس مرکب دو ساله نشان داد که اثر سال، تنش خشکی، کاربرد سالیسیلیک اسید، باکتری، برهمکنش دو گانه تنش خشکی × باکتری، تنش خشکی × سالیسیلیک اسید، باکتری × سالیسیلیک اسید، و برهمکنش سه گانه تنش خشکی × باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۱ درصد بر شاخص برداشت معنی‌دار بودند (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین این صفت طی سال‌های مختلف بیشترین شاخص برداشت معادل ۱۳/۰۷ درصد مربوط به سال اول بود که نسبت به سال دوم (۱۲/۵۴ درصد) اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴).

بیشترین شاخص برداشت بر اساس نتایج میانگین دو ساله مربوط به تیمار آبیاری کامل معادل با ۱۳/۹۲ درصد بود که با تیمار تنش خشکی اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۵). تاثیرات شدیدتر تنش خشکی بر عملکرد گل در مقایسه با خصوصیات رشد چون عملکرد ساقه که منجر به کاهش نسبت عملکرد گل به عملکرد بیولوژیک شده از دلایل اصلی کاهش این شاخص در شرایط تنش در مقایسه با شرایط آبیاری کامل در این مطالعه است (جدول ۵). این شاخص در اثر استفاده از اسید سالیسیلیک نیز افزایش معنی‌داری معادل با ۱۸/۷۳ درصدی در مقایسه با شاهد محلول پاشی نشده نشان داد. نتایج برهمکنش اسید سالیسیلیک و تنش خشکی افزایش ۴۹/۱۶ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۲۶/۸۶ درصدی این شاخص نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش خشکی) شده است (شکل ۵). این نتایج کارآیی بالاتر محلول پاشی با اسید سالیسیلیک در افزایش این شاخص در مقایسه با شرایط عدم تنش را نشان می‌دهند. نتایج مقایسه میانگین دو

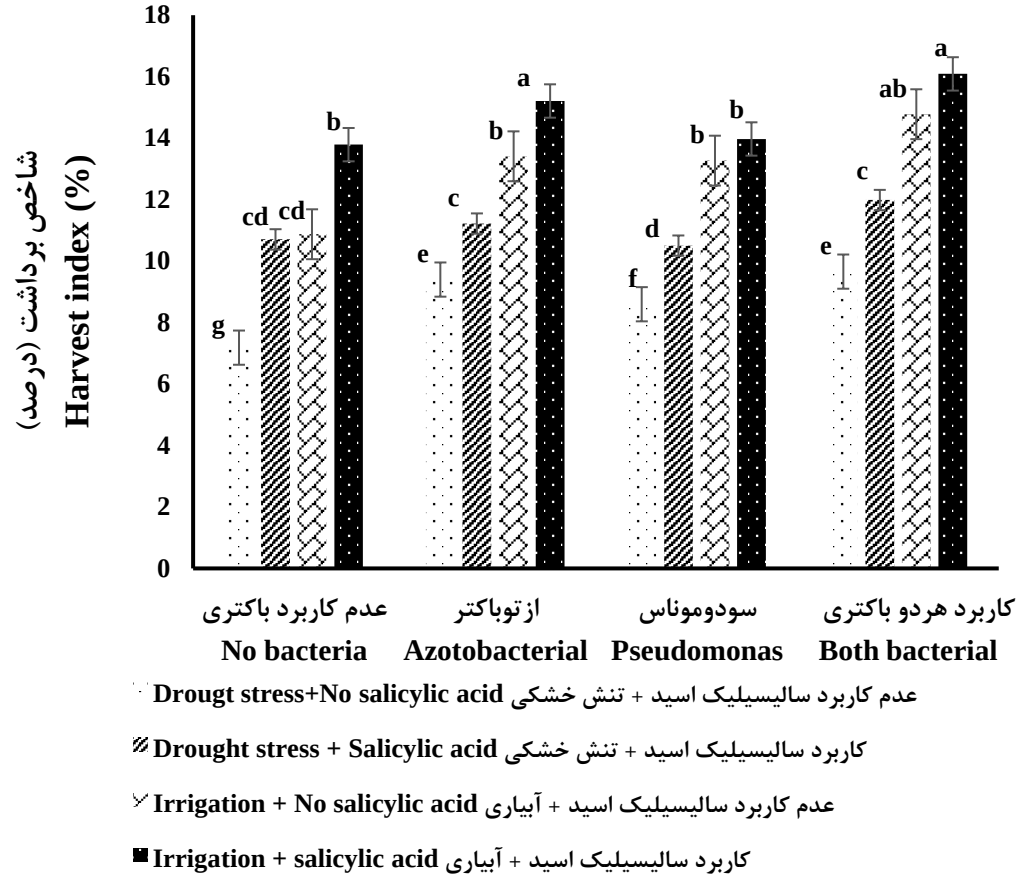
ساله نیز افزایش ۱۵/۹۴ درصدی شاخص برداشت در گیاهان تلقیح شده با باکتری‌ها را در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده نشان داد (جدول ۵).



شکل ۴. مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر عملکرد بیولوژیک. ستون‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

Fig. 4. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on biological yield. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

بر اساس نتایج برهمکنش کاربرد باکتری × تنش خشکی، کاربرد باکتری‌ها به‌ترتیب سبب افزایش ۲۸/۳۱ و ۲۷/۰۹ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد در شرایط تنش (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) و آبیاری کامل (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش) شده‌اند (شکل ۵). ازتوباکتر در مقایسه با سودوموناس در برهمکنش با تیمارهای آبیاری و کاربرد اسید سالیسیلیک با نتایج بهتری همراه بوده است. درصد بالاتر شاخص برداشت در تیمار کاربرد دو باکتری در مقایسه با تیمارهای کاربرد تکی ازتوباکتر و سودوموناس، اثر هم‌افزایی این دو باکتری را بر روی این صفت نشان می‌دهند. صرف‌نظر از اثر هم‌افزایی این باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر این شاخص بودند بطوریکه بالاترین شاخص برداشت در شرایط تنش (۱۱/۹۹ درصد) و عدم تنش (۱۶/۰۹ درصد) مربوط به تیمارهای برهم‌کنش کاربرد دو باکتری × سالیسیک اسید بوده است (شکل ۵).



شکل ۵- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر شاخص برداشت. ستون‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

Fig. 5. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on harvest index. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

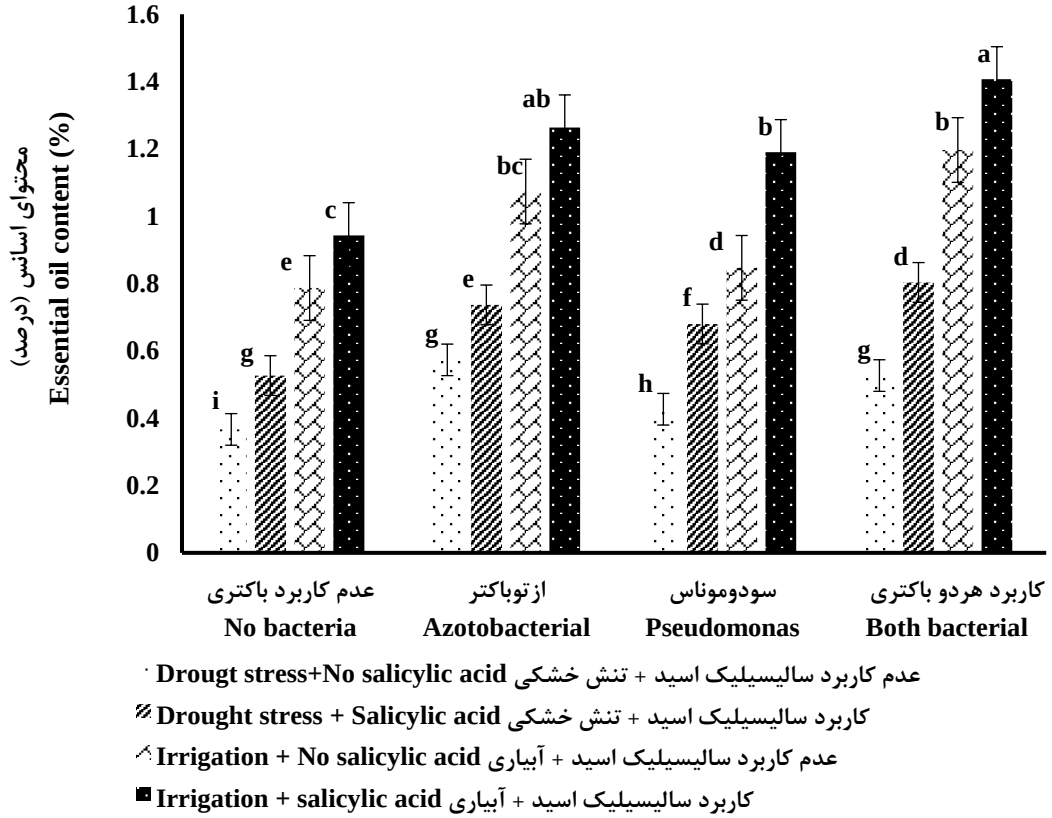
محتوای اسانس

با توجه به نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در ارتباط با محتوای اسانس، اثر سال، تنش خشکی، کاربرد سالیسیلیک اسید، باکتری، برهمکنش دوگانه باکتری × اسید سالیسیلیک و برهمکنش سه گانه تنش خشکی × باکتری × اسید سالیسیلیک در سطح احتمال ۱ درصد و برهمکنش تنش خشکی × باکتری در سطح احتمال ۵ درصد بر این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۳). بر اساس نتایج مقایسه میانگین سال‌ها، بیشترین محتوای اسانس معادل ۰/۸۶ درصد مربوط به سال اول بود که نسبت به سال دوم اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۴).

بر اساس نتایج دو ساله تاثیر تیمارهای آبیاری بر محتوای اسانس، بیشترین محتوای اسانس در تیمار آبیاری کامل تولید گردید که معادل ۱/۰۹ درصد بود که با محتوای اسانس تولید شده در شرایط تنش خشکی (۰/۵۸ درصد) اختلاف معنی‌داری داشت (جدول ۵).

محتوای اسانس همچنین با کاربرد اسید سالیسیلیک افزایش معنی‌داری معادل با ۳۰/۵۶ درصد در مقایسه با شاهد محلول پاشی نشده نشان داده است. نتایج برهمکنش کاربرد اسید سالیسیلیک و تنش خشکی افزایش ۴۳/۶۴ درصدی این صفت نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۱۹/۹۱ درصدی نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش خشکی) شده است (شکل ۶). این نتایج کارآیی بالاتر محلول پاشی با اسید سالیسیلیک در افزایش این صفت در مقایسه با شرایط عدم تنش را نشان می‌دهند.

کاربرد باکتری‌های محرک رشد نیز منجر به افزایش معنی‌دار محتوای اسانس در مقایسه با شرایط عدم تلقیح شد، بطوریکه گیاهان تلقیح شده با باکتری‌ها افزایش ۳۶/۱۸ درصدی این صفت را در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده با باکتری‌ها نشان دادند (جدول ۵). نتایج دو ساله برهمکنش کاربرد باکتری (بدون کاربرد سالیسیلیک اسید) و تیمارهای آبیاری نیز به ترتیب افزایش ۳۸/۷۹ و ۳۲/۰۶ درصدی این صفت نسبت به شاهد را در هر دو شرایط تنش خشکی و آبیاری کامل نشان داد (شکل ۶). علیرغم کارآیی بالای سودوموناس در افزایش محتوای اسانس در برهمکنش با تیمارهای آبیاری (محلول پاشی و عدم محلول پاشی سالیسیلیک اسید)، کاربرد ازتوباکتر در مقایسه با سودوموناس در اکثر ترکیبات تیماری با نتایج بهتری همراه بوده است (شکل ۶). درصد بالای این صفت در تیمار کاربرد دو باکتری در مقایسه با تیمارهای کاربرد تکی ازتوباکتر و سودوموناس، اثر هم‌افزایی این دو باکتری را بر روی این صفت نشان می‌دهند. صرفه‌نظر از اثر هم‌افزایی این باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر این صفت بودند بطوریکه بالاترین محتوای اسانس در شرایط تنش (۰/۰۸ درصد) و عدم تنش (۱/۴۱ درصد) مربوط به تیمارهای برهم‌کنش کاربرد دو باکتری × سالیسیک اسید بوده است (شکل ۶).



شکل ۶- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر محتوای اسانس. ستون‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

Fig. 6. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on essential oil content. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

عملکرد اسانس

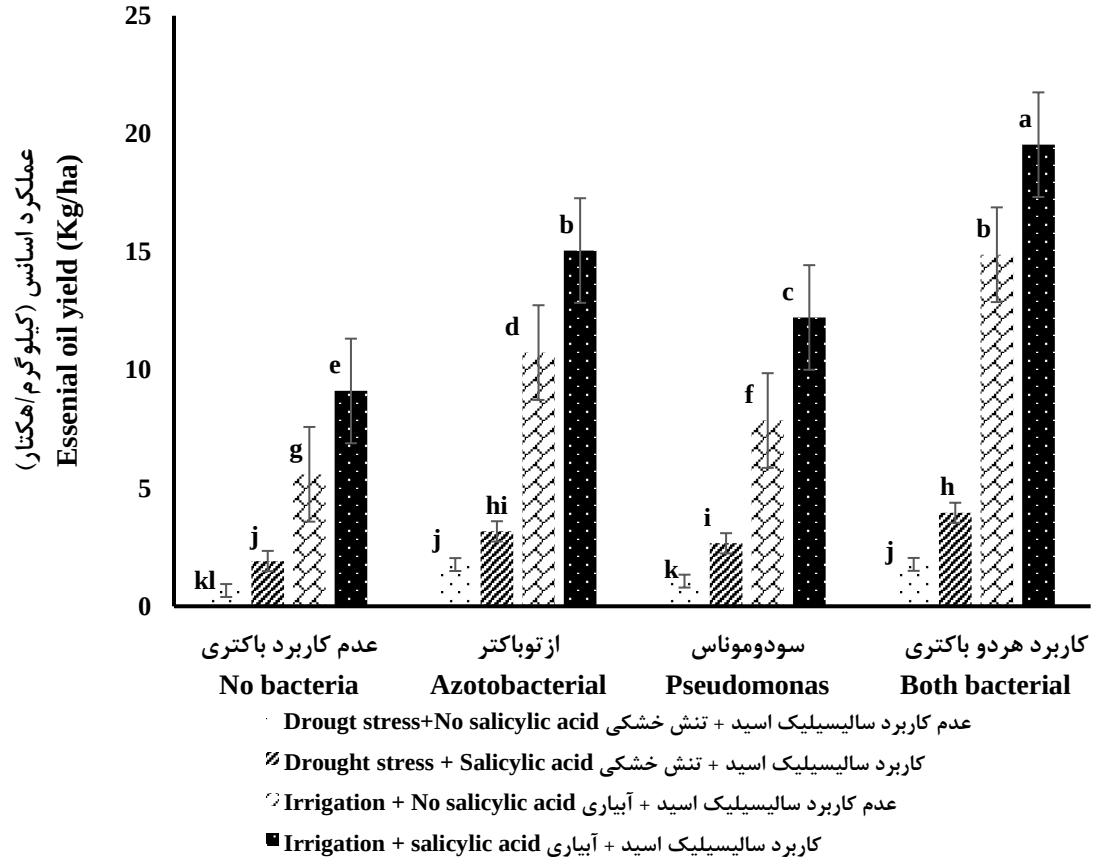
نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس مرکب دوساله نشان داد که اثر سال، تنش خشکی، کاربرد اسید سالیسیلیک، باکتری و برهمکنش تنش خشکی × اسید سالیسیلیک × باکتری، در سطح احتمال ۱ درصد و برهمکنش تنش خشکی × باکتری بر عملکرد اسانس معنی‌دار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های مربوط به تاثیر سال بر این صفت نشان دادند که عملکرد اسانس در سال اول معادل ۶/۲۹ کیلوگرم در هکتار بوده که اختلاف معنی‌داری با سال دوم (معادل با ۵/۴۳ کیلوگرم در هکتار) داشت (جدول

۴). تاثیر تیمارهای آبیاری بر عملکرد اسانس نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد اسانس در مقایسه با شاهد شده است (جدول ۵).

همچنین عملکرد اسانس در اثر استفاده از اسید سالیسیلیک افزایش ۷۶/۳۷ درصدی در مقایسه با گیاهان تیمار نشده با اسید سالیسیلیک نشان داد. افزایش ۱/۸۵ برابری این صفت در شرایط تنش در مقایسه با افزایش ۶۳/۱۵ درصدی آن در شرایط آبیاری، کارآیی بالاتر کاربرد اسید سالیسیلیک در افزایش این صفت در شرایط تنش خشکی را در مقایسه با آبیاری نشان می‌دهد (شکل ۷).

نتایج برهمکنش کاربرد باکتری‌های محرک رشد و تنش خشکی نیز افزایش معنی‌دار ۱/۶۵ برابری عملکرد اسانس نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و تحت تنش) را در شرایط تنش نشان داد. این در حالی است که استفاده از این باکتری‌ها در شرایط آبیاری منجر به افزایش ۱/۶۶ درصدی نسبت به شاهد (گیاهان تیمار نشده و در شرایط عدم تنش) شده است. این نتایج اهمیت استفاده از باکتری‌های محرک رشد در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی نشان می‌دهد (شکل ۷). علیرغم کارایی بالای سودوموناس، کاربرد ازتوباکتر در برهمکنش با تیمارهای آبیاری و اسید سالیسیلیک با نتایج بهتری همراه بوده است. عملکرد بالای اسانس در تیمار کاربرد دو باکتری در مقایسه با تیمارهای کاربرد تکی ازتوباکتر و سودوموناس، اثر هم‌افزایی این دو باکتری را بر روی این صفت نشان می‌دهند.

صرف‌نظر از اثر هم‌افزایی این باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با اسید سالیسیلیک در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر این صفت بودند بطوریکه بالاترین عملکرد اسانس در شرایط تنش (۳/۹۵ کیلوگرم در هکتار) و عدم تنش (۱۹/۵۴ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمارهای برهم‌کنش کاربرد دو باکتری × اسید سالیسیلیک بوده است (شکل ۷).



شکل ۷- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آزمایش بر عملکرد اسانس. ستون‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن هستند.

Fig. 7. Comparison of the average interaction effects of experimental treatments on essential oil yield. Columns with common letters have no significant difference at the 5% probability level with Duncan test.

بحث

تاکنون راهکارهای متفاوتی همچون کاربرد قارچ‌های همزیست، باکتری‌های محرک رشد و کودهای زیستی برای بهبود تحمل به تنش خشکی و کاهش اثرات نامطلوب آن بر رشد و عملکرد گیاهان دارویی پیشنهاد شده‌اند (Alipour *et al.*, 2021; Azmat *et al.*, 2020; Hayati *et al.*, 2022; Sedaghati *et al.*, 2021). در این مطالعه دوساله اثرات کاربرد همزمان باکتری‌های محرک رشد و سالیسیلیک اسید بر خصوصیات رشدی و محتوای اسانس گیاه بومادران تحت شرایط تنش خشکی بررسی شدند. معنی‌دار بودن اثر سال برای صفات مورد ارزیابی بجز شاخص برداشت (جدول ۳)، تاثیر متفاوت سال‌های آزمایش را بر این صفات نشان می‌دهد. این تاثیر متفاوت که منجر به ثبت مقادیر بالاتر برای خصوصیات رشدی، عملکرد گل و اسانس در سال اول در مقایسه با سال دوم شد (جدول ۴) را می‌توان به افزایش دما بویژه در طی ماه‌های اردیبهشت تا مرداد و وزش بادهای گرم و خشک در سال دوم در مقایسه با سال اول نسبت داد (جدول ۱). بر خلاف سایر صفات، وزن هزار دانه در سال دوم در مقایسه با سال اول افزایش داشت. کاهش وزن هزار دانه در سال اول احتمالا با تعداد بیشتر ساقه‌های گل دهنده در بوته و سهم کمتر هر دانه از مواد جذب شده توسط گیاه در این سال نسبت به سال دوم مرتبط است. این نتایج منطق با یافته‌های Asghari و همکاران (2017) است که گزارش دادند افزایش تعداد پنجه در بوته و همچنین تعداد دانه در سنبله گندم، قابلیت دسترسی به مواد فتوسنتزی برای هر دانه را کمتر نموده و منجر به کاهش وزن هزار دانه شده است. در مقابل کاهش معنی‌دار تعداد ساقه گل‌دهنده در بوته (یکی از مهمترین اجزای عملکردی گل در بوته) در سال دوم نسبت به سال اول از مهمترین دلایل کاهش عملکرد گل در این سال بود (جدول ۲). بر خلاف سایر صفات، تغییرات شاخص برداشت در طی دو سال معنی‌دار نبود (جدول ۳). در واقع شاخص برداشت که نشان دهنده نسبت عملکرد گل به عملکرد بیولوژیک است، تابع تغییرات این دو صفت بوده و در صورتیکه نسبت تغییرات این دو نسبت به هم در سال‌های مختلف متفاوت نباشد، علیرغم مقدار متفاوت تغییرات هر کدام از این دو صفت طی سال‌های مختلف، مقدار این شاخص برای این سال‌ها نزدیک خواهد بود. مطابق با نتایج مطالعه حاضر، معنی‌دار نشدن اثر سال برای این شاخص پیش از این در مطالعه Iqbal و همکاران (2021) نیز گزارش شده است. تغییرات مربوط به محتوای اسانس و عملکرد اسانس در طی سال‌های آزمایش از روند مشابه با سایر صفات تبعیت کرده و میزان این صفت در سال اول نسبت به سال دوم برتری معنی‌دار داشت (جدول ۴). احتمالا دمای پایین هوا بویژه در طی ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد در سال اول در مقایسه با سال دوم می‌تواند این تفاوت را توجیه نماید (جدول ۱). در سال اول افزایش ۹/۱۲ درصدی عملکرد گل و همچنین ۶/۱۷ درصدی محتوای اسانس منجر به افزایش ۱۵/۸۴ درصدی عملکرد اسانس در مقایسه با سال دوم گردید. در سال دوم و در پی افزایش نسبی دما در مقایسه با سال اول، با کاهش عملکرد گل و همچنین محتوی اسانس، عملکرد اسانس نیز کاهش یافت. این افزایش نسبی دما بویژه در طی فصل بهار در سال دوم با افزایش وزش بادهای گرم و خشک نیز در این سال در مقایسه با سال اول همراه بود. معنی‌دار شدن اثر سال برای محتوای اسانس و عملکرد اسانس پیش از این نیز در سایر مطالعات (Mehalaine and Chenchouni, 2021; Sharifi *et al.*, 2009) گزارش شده است.

تاثیر تیمارهای آبیاری بر ارتفاع بوته کاهش ۳۹/۸۲ درصدی این صفت را در اثر تنش خشکی در مقایسه با شاهد نشان داد (جدول ۵). تنش خشکی موجب کاهش تورژسانس سلولی و تولید مواد فتوسنتزی می‌شود و در نهایت کاهش رشد و توسعه سلول به‌خصوص در ساقه و برگ را به دنبال خواهد داشت. با کاهش رشد سلول، اندازه اندام محدود می‌شود و به همین دلیل اولین اثر محسوس کم آبی بر گیاه را می‌توان از روی کاهش اندازه برگ، طول میانگره‌ها و ارتفاع تشخیص داد. کاهش ارتفاع بوته در اثر تنش خشکی پیش از این در مطالعات Moaveni و همکاران (2009)، Shahbazi و همکاران (2016)، و Salarpour Ghoraba and Farahbakhsh (2014) نیز گزارش شده است. Sharafi Ashorabadi و همکاران (2009) نیز تاثیر شدید تنش خشکی بر ارتفاع گیاه بومادران را در مطالعه سه ساله خود گزارش کردند. این محققان کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته در شرایط تنش را به عنوان موثرترین عامل در کاهش عملکرد ساقه ذکر کردند. به‌نظر می‌رسد کاهش تعداد ساقه (گزارش نشده) و احتمالا کاهش طول مرحله رشد رویشی توسط گیاه برای فرار از خشکی و تکمیل سریع مرحله رویشی از دیگر عوامل تاثیر گذار بر این صفت باشد (Abobatta, 2019).

وزن هزار دانه با کاهش ۸۵/۵۰ درصدی در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شاهد، از جمله صفات با تاثیرپذیری بالا از تنش خشکی در این مطالعه است (جدول ۵). غالبا بروز تنش خشکی در مراحل زایشی بویژه در دوره پرشدن دانه سبب کاهش وزن دانه‌ها می‌شود که یکی از دلایل آن افزایش سطح آبسیزیک اسید و نقش آن در کاهش تعداد سلول‌های آندوسپرمی و محدود کردن ذخیره سلول‌ها است (Kishor *et al.*, 2022).

کاهش ۲/۱ عملکرد گل در شرایط تنش خشکی آسیب‌پذیری این صفت زایشی را در مقایسه با صفات رویشی نشان داد (جدول ۵). صرف‌نظر از شدت و مدت تنش خشکی، زمان وقوع تنش خشکی و به عبارتی مرحله‌ای که گیاه در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرد از مهمترین فاکتورهای تعیین کننده میزان خسارت تنش خشکی است (Nadeem *et al.*, 2019). در این مطالعه تنش خشکی در مرحله رشد رویشی از طریق تاثیر منفی بر تعداد و رشد ساقه‌های گل‌دهنده و در مرحله گلدهی از طریق تاثیر بر اندازه گل و ماندگاری آن می‌تواند عملکرد گل را کاهش دهد (Alordzinu *et al.*, 2021). پیری زودرس اندام‌های فتوسنتز کننده، اختلال در فتوسنتز، تعرق و فرایندهای متابولیکی گیاه و در نتیجه کاهش نرخ انتقال مواد فتوسنتزی از برگ‌ها به اندام زایشی در گیاه در این مرحله از مهمترین عوامل منفی تاثیر گذار بر عملکرد گل می‌باشد (Choudhary *et al.*, 2021).

عملکرد بیولوژیک در گیاه بومادران برآیندی از عملکرد ساقه و گل بوده و کاهش صفات فوق در شرایط تنش منجر به کاهش ۱۲۰/۸۵ درصدی این صفت در مقایسه با شاهد شده است (جدول ۵). در پژوهشی، Sharifi Ashorabadi و همکاران (2009) کاهش ۶۳/۷۴ درصدی و ۶/۳ برابری عملکرد بیولوژیک گیاه بومادران را به ترتیب برای تنش متوسط و شرایط دیم در مقایسه با شرایط آبیاری کامل گزارش کردند. کاهش رشد و توسعه سلول، اختلال در فرآیندهای متابولیکی مانند تعرق و فتوسنتز، پیری زودرس اندام‌های فتوسنتز کننده و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی از مهمترین عوامل کاهش عملکرد بیولوژیکی در شرایط تنش هستند (Bijalwan *et al.*, 2022). کاهش عملکرد بیولوژیک در اثر تنش خشکی در گیاهان دارویی پیش از این در گیاه زیره سبز (Piri *et al.*, 2019) و بومادران (Sharifi Ashorabadi *et al.*, 2009) گزارش شده است.

شاخص برداشت با ۱۳/۹۲درصد کاهش در مقایسه با سایر صفات کمترین سطح کاهش را در شرایط تنش خشکی داشته است (جدول ۵). از آنجائیکه این شاخص نسبت عملکرد گل به عملکرد بیولوژیک است و هر دوی این صفات در اثر تنش کاهش پیدا کردند، بنابراین نتایج فوق منطقی به نظر می‌رسد. مطابق با نتایج فوق، در مطالعه سه ساله Sharifi Ashorabadi و همکاران (2009) نیز علیرغم وجود تفاوت معنی‌دار عملکرد بیولوژیک و عملکرد گل در شرایط تنش متوسط و شرایط دیم، شاخص برداشت برای این دو تیمار با ثبت مقادیر ۹/۶۶ و ۸/۹۵ درصد تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند. محتوای اسانس با ثبت کاهش ۸۷/۹۳ درصدی در شرایط تنش خشکی از مهمترین صفات تاثیر پذیر از شرایط تنش در این مطالعه بود (جدول ۴). Caser و همکاران (2019) دریافتند که در شرایط تنش خشکی، روزنه‌ها بسته می‌شوند تا تعرق به حداقل برسد و این منجر به جلوگیری از ورود CO_2 به برگ‌ها می‌شود. کاهش تجمع CO_2 در برگ‌ها منجر به کاهش سرعت فتوسنتز و کاهش واکنش‌های چرخه کالوین و در نتیجه کاهش مصرف ATP و NADPH می‌شود. در نتیجه این واکنش‌ها، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و به دنبال آن آسیب به ساختار پروتئینی، آنزیمی، غشای سلولی و DNA منجر به مرگ سلول‌ها و نهایتا کاهش تولید اسانس را در گیاه به همراه دارد. کاهش شدید محتوای اسانس (۴۸ درصد) در شرایط تنش خشکی برای گیاه بومادران در مطالعه Mirjalili و همکاران (2016) نیز گزارش شده است. در مطالعه حاضر، افت بالای عملکرد گل (۲/۹ برابر) و همچنین محتوای اسانس (۱/۱۶ برابر) در شرایط تنش خشکی منجر به کاهش بیش از هفت برابری عملکرد اسانس (۰/۶۷ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با شرایط عدم تنش خشکی (۵/۵۹ کیلوگرم در هکتار) شده است (جدول ۵). کاهش شدید عملکرد اسانس در شرایط تنش خشکی پیش از این در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Liu and Zhang, 2015). در مطالعه Mirzaie و همکاران (2020) در رابطه با تاثیر تنش خشکی بر گیاه علف لیمو، محتوای و عملکرد اسانس در شرایط تنش ملایم (۷۵٪ آب قابل استفاده) افزایش ولی با افزایش سطح تنش (۵۰ و ۲۵٪ آب قابل استفاده) به طور معنی داری کاهش نشان داد. Ghassemi-Golezani and Solhi-Khajemarjan (2021) نیز با ارزیابی گیاه شوید در شرایط تنش خشکی دریافتند که محتوای اسانس با افزایش شدت تنش از فراهمی کامل آب قابل دسترس تا تنش متوسط افزایش می‌یابد اما با افزایش شدت تنش خشکی کاهش می‌یابد. در واقع افزایش محتوای و عملکرد اسانس در شرایط تنش خشکی ملایم تا متوسط یک مکانیسم دفاعی در مقابل تنش‌های محیطی است (Sati *et al.*, 2023). به عبارت دیگر تنش خشکی تولید اسانس را القاء می‌کند و این القاء معمولا با افزایش تراکم کرک‌های غده‌ای تولید کننده اسانس

و همچنین افزایش رونویسی و بیان ژن‌های درگیر در سنتز اسانس همراه است. با این حال، محتوای و عملکرد اسانس اغلب با افزایش سطح تنش به دلیل عدم کارایی سیستم دفاعی گیاه در افزایش رونویسی و بیان ژن‌های درگیر ممکن است به شدت کاهش یابد (Kaya *et al.*, 2023). مطابق با نتایج فوق، به دلیل شدت تنش خشکی در مطالعه حاضر، به نظر می‌رسد سیستم دفاعی گیاه در پاسخ به این سطح از تنش کارایی لازم را نداشته و میزان اسانس تولید شده کاهش معنی‌داری نسبت به گیاهان شاهد نشان داده است (جدول ۵).

نتایج برهمکنش سالیسیلیک اسید و تنش خشکی، به ترتیب افزایش ۲۴/۹۶، ۴۹/۶۳، ۵۸/۹۹، ۳۴/۰۹، ۴۹/۱۶، ۴۳/۶۴ درصدی و ۱/۹ برابری را برای صفات ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد گل، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، محتوای اسانس و عملکرد اسانس در مقایسه با شاهد محلول پاشی نشده به همراه داشت. اگرچه سازوکار دقیق سالیسیلیک اسید به عنوان یک شبه هورمون هنوز مشخص نیست، به نظر می‌رسد این ماده با تأثیر بر مریستم‌های رویشی و افزایش تعداد و طول میانگره‌ها سبب افزایش ارتفاع گیاه می‌شود. تأثیر سالیسیلیک اسید بر ارتفاع بوته، نقش آن را در تنظیم طویل شدن و تقسیم سلولی همانند اکسین پررنگ کرده است (Koo *et al.*, 2020). در پژوهشی، Salarpour Ghoraba و Farahbakhsh (2014) ضمن گزارش اثر معنی‌دار بودن برهمکنش تنش خشکی و سالیسیلیک اسید بر طول میان‌گره در ساقه اصلی در گیاه رازیانه، بیشترین میزان طول میانگره را در تیمار شاهد و غلظت ۱ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید (۱۳/۵۴ سانتی‌متر) و کمترین میزان طول میانگره در تیمار ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و غلظت صفر میلی‌مولار سالیسیلیک اسید (۹/۰۲ سانتی‌متر) گزارش کردند. این محققان اذعان داشتند که سالیسیلیک اسید می‌تواند از طریق بهبود جذب عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی اثرات نامطلوب تنش را کاهش داده و سبب افزایش رشد و در نتیجه ارتفاع بوته گردد. نقش سالیسیلیک اسید در افزایش شاخص‌های رشد در شرایط تنش از جمله ارتفاع بوته در شرایط تنش کم آبی پیش از این توسط Jalalvand و همکاران (2019) در گیاه ریحان نیز گزارش شده است.

اثر معنی‌دار سالسیلیک اسید در افزایش عملکرد بیولوژیک در شرایط تنش خشکی در مقایسه با شرایط نرمال پیش از این در مطالعه Hafez و همکاران (2019) نیز گزارش شده است. این محققان به نقش سالیسیلیک اسید به عنوان یک کوفاکتور در تنظیم صفات فیزیولوژیکی که منجر به بهبود محتوای برگ و فرایندهای فتوسنتزی و در نتیجه بهبود عملکرد ریشه برای جذب آب و افزایش رشد گیاه می‌شود، اشاره داشتند. محلول پاشی سالیسیلیک اسید همچنین با تولید متابولیت های آنزیمی و غیر آنزیمی و ترکیبات آنتی اکسیدانی از اثرات مضر گونه‌های اکسیژن فعال جلوگیری کرده و همچنین منجر به بهبود شرایط برای تثبیت نیتروژن توسط میکروب‌ها در خاک می‌شود (Babaei *et al.*, 2017).

بهبود عملکرد گل، محتوای و عملکرد اسانس در اثر مصرف سالیسیلیک اسید در شرایط تنش خشکی پیش از این در گیاهان دارویی شوید (Ghassemi-Golezani and Solhi-Khajemarjan, 2021)، گشنیز (Yeganehpoor *et al.*, 2017) و مرزه (Ghojavand *et al.*, 2023) نیز گزارش شده است. Ghassemi و همکاران (2019) با تاکید بر نقش سالیسیلیک اسید در دفاع سیستمیک در شرایط تنش خشکی از این هورمون به عنوان یک تنظیم کننده فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در شرایط تنش خشکی یاد کرده‌اند. در واقع سالیسیلیک اسید از طریق افزایش ظرفیت اسمولیت‌ها، محتوای آب، یکپارچگی سلولی، رنگدانه‌های فتوسنتزی، افزایش ظرفیت فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی و القای بیان بسیاری از ژن‌های درگیر در فعالسازی آنزیم‌های مسئول تولید ترکیبات ثانویه می‌تواند تولید اسانس در گیاه را در شرایط تنش خشکی افزایش دهد (Khan *et al.*, 2015). بخش قابل توجه‌ای از این کارکردهای سالیسیلیک اسید به نقش آن در القای سیستم آنتی اکسیدان در گیاه در شرایط تنش خشکی و کاهش اثرات نامطلوب آن همچون بسته شدن روزنه‌های برگ‌ها، لوله شدن برگ‌ها، از دست رفتن محتوای آب در گیاه، کاهش فعالیت کربوکسیلاز روبیسکو و نهایتا نرخ فتوسنتز مرتبط است (Ahmad *et al.*, 2018). بهبود محتوای و عملکرد اسانس گیاه بومادران در مطالعه حاضر بویژه در شرایط تنش خشکی در اثر محلول پاشی سالیسیلیک اسید می‌تواند نتیجه‌ای از اثرات تنظیم کنندگی این هورمون روی رشد و نمو گیاه باشد. این هورمون ممکن است سطح تولید متابولیت‌های ثانویه را از طریق بهبود سطح کلروفیل، کارایی فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه‌ای افزایش دهد (Shaykh Samani *et al.*, 2023). همچنین این هورمون ممکن است از طریق القای بیان بسیاری از ژن‌های دفاعی مسئول فعال سازی پروسه تولید متابولیت‌های ثانویه، سبب افزایش محتوای و عملکرد اسانس شود (Maroufi *et al.*, 2023).

نتایج برهمکنش کاربرد باکتری‌های محرک رشد و تنش خشکی، کارآیی بالاتر ازتوباکتر را در مقایسه با سودوموناس بویژه در شرایط تنش خشکی نشان داد (شکل‌های ۷-۱). کارایی بالاتر ازتوباکتر در مقایسه با سودوموناس در بهبود خصوصیات رشدی و عملکردی در شرایط مختلف رطوبتی در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Mzafari *et al.*, 2015; Mozaffarian, 2008). کاربرد توأم دو باکتری به دلیل اثر هم‌افزایی آنها در مقایسه با کاربرد تکی آنها در شرایط مختلف رطوبتی با نتایج بهتری همراه بود و منجر به افزایش ۳۳/۲۶، ۶۱/۵۴، ۵۵/۷۸، ۲۶/۵۶، ۲۳/۳۱، ۴۹/۸۵ درصدی و ۱/۳ برابری به‌ترتیب برای صفات ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد گل، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، محتوای و عملکرد اسانس در مقایسه با شاهد تلقیح نشده شد (جدول ۵). در انطباق با نتایج مطالعه حاضر، مظفری و همکاران (Mzafari *et al.*, 2015) گزارش کردند که کاربرد باکتری‌های محرک رشد بویژه کاربرد توأم باکتری‌های سودوموناس و ازتوباکتر در مقایسه با تیمار شاهد (عدم مصرف باکتری) سبب بهبود خصوصیات رشدی در هر دو شرایط نرمال و تنش خشکی شدند. این یافته‌ها در انطباق با گزارشات قبلی در رابطه با اثر باکتری‌های محرک رشد در تحمل به تنش کمبود آب در ذرت، آفتابگردان (Gontia-Mishra *et al.*, 2016) و گندم (Omara and Elbagory, 2018) است. در کل قابلیت جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاهان تلقیح شده با باکتری‌های محرک رشد افزایش می‌یابد که این احتمالا به دلیل افزایش رشد و تعداد ریشه است (Chen *et al.*, 2021).

یکی از کارکردهای باکتری‌های محرک رشد از طریق مکانیزم‌های القا یا افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تنش خشکی است که باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های چرخه آسکوربیت-گلوتاتیون ریداکس[1] می‌شود (Nivetha *et al.*, 2021). این باکتری‌ها همچنین با افزایش ترشح هورمون‌هایی چون اکسین سبب افزایش رشد ریشه و نهایتا جذب آب و مواد غذایی برای گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شوند (Bagheri *et al.*, 2019). برتری کاربرد توأم ازتوباکتر و سودوموناس در مقایسه با کاربرد تکی آنها در بهبود خصوصیات رشدی، عملکرد گل و محتوای اسانس پیش از این در زیره سیاه (Moradzadeh *et al.*, 2021) نیز گزارش شده است.

صرف‌نظر از اثر هم‌افزایی باکتری‌ها، کاربرد آنها در ترکیب با سالیسیلیک اسید نیز در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی دارای اثرات هم‌افزایی بر تمام صفات بودند بطوریکه بالاترین مقادیر خصوصیات رشدی، عملکرد گل، شاخص برداشت، محتوای و عملکرد اسانس مربوط به تیمارهای برهم کنش کاربرد دو باکتری × سالیسیلیک اسید بوده است (شکل‌های ۷-۱). اثر هم افزایی باکتری‌های محرک رشد و سالیسیلیک اسید بر خصوصیات رشدی از جمله ارتفاع بوته در مقایسه با کاربرد تکی آنها پیش از این در گیاه آفتابگردان گزارش شده است (Khan *et al.*, 2018). این محققان ضمن اشاره به افزایش بیش از ۶۰ درصدی قابلیت جذب بسیاری از عناصر غذایی در حالت کاربرد تکی تیمارهای فوق، به افزایش ۲۱-۸ درصدی قابلیت جذب برخی از عناصر غذایی مهم در تیمار کاربرد توأم باکتری و سالیسیلیک اسید در مقایسه با حالت کاربرد تکی به عنوان دلیل اصلی بهبود خصوصیات رشدی در شرایط تنش خشکی اشاره کردند. مطابق با نتایج مطالعه حاضر، Azmat و همکاران (2020) دریافتند که کاربرد همزمان باکتری‌های محرک رشد و محلول‌پاشی با سالیسیلیک اسید در شرایط تنش در مقایسه با کاربرد تکی این تیمارها به سبب افزیش محتوای نسبی آب و اسمولیت‌ها و همچنین سیستم‌های دفاعی گیاه در شرایط تنش منجر به افزایش خصوصیات رشدی و فتوسنتزی شده است.

تقریبا تمام فرایندها در گیاهان بطور مستقیم یا غیر مستقیم تحت تاثیر تنش‌های زنده و غیر زنده و تغییرات هورمون های گیاهی در واکنش به این تنش‌ها قرار می گیرند. کاهش رشد و عملکرد گیاه نتیجه برهم خوردن تعادل هورمون ها می باشد (Li *et al.*, 2021). بنابراین کاربرد عوامل تعدیل کننده و یا تنظیم کننده‌های رشد خارجی در شرایط تنش خشکی می‌تواند عاملی در جهت تعدیل اثرات این تنش‌ها باشد (Johnson *et al.*, 2022). سالیسیلیک اسید با القای سیستم دفاعی گیاهی و تنظیم بیان ژن‌های درگیر در فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، و همچنین باکتری‌های محرک رشد از طریق توسعه سیستم ریشه‌ای، ایجاد تعادل بین عناصر غذایی و افزایش قابلیت جذب این عناصر در خاک در شرایط تنش می‌توانند تا حدود زیادی اثرات نامطلوب تنش‌ها بر رشد و عملکرد گیاه را کاهش داده و به عنوان یک رویکرد بهبود عملکرد گیاهان در شرایط تنش استفاده شوند (Khant *et al.*, 2018).

۱- Ascorbate-glutathione redox

نتیجه گیری

بطورکلی نتایج نشان داد که تنش خشکی، خصوصیات رشدی، عملکرد گل، محتوای و عملکرد اسانس را به طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین مشاهده شد که کاربرد سالیسیلیک اسید منجر به بهبود خصوصیات فوق و کاهش اثرات مضر تنش خشکی شد. کاربرد باکتری‌های محرک رشد نیز تاثیرات مثبتی بر خصوصیات مورد بررسی در هر دو شرایط تنش و عدم تنش خشکی داشت. همچنین برهمکنش این تیمارها نشان داد استفاده همزمان باکتری ها و محلول پاشی سالیسیلیک اسید به دلیل تعدیل اثرات نامطلوب تنش خشکی بر عملکرد گل و محتوای اسانس می تواند یک تیمار مناسب در شرایط تنش خشکی باشد. به‌هر حال تحقیقات بیشتری برای روشن شدن نقش برهمکنش باکتری‌های محرک رشد و سالیسیلیک اسید در بهبود صفات در شرایط تنش خشکی بویژه در سطح مولکولی نیاز است.

منابع References

Abobatta, W.F. (2019). Drought adaptive mechanisms of plants–a review. Advances in *Agriculture* and *Environmental Science*, *2*(1), 62-65.

Ahmad, B., Jaleel, H., Sadiq, Y., Khan, M.M.A., & Shabbir, A. (2018). Response of exogenous salicylic acid on cadmium induced photosynthetic damage, antioxidant metabolism and essential oil production in peppermint. *Plant Growth Regulation*, *86*, 273–286.

Alipour A., Rahimi, M.M., Hosseini M., & Bahrani, A. (2021). Mycorrhizal fungi and growth-promoting bacteria improves fennel essential oil yield under water stress. *Industrial Crops* and *Products*, *170*, 1-11.

Alizadeh, A. (2004). Soil, water, plant relationship (4th Ed.). University of Emam Reza Press.

Alordzinu, K.E., Jiuhao, L., Appiah, S.A., Aasmi, A.A.L., Blege, P.K., & Afful, E.A. (2021). Water stress affects the physio-morphological development of tomato growth. *African Journal of Agricultural Research*, *17*(5), 733-742.

Amin, A.A., El-Kader, A.A., Shalaby, M.A., Gharib, F.A., Rashad, E.S.M., & Teixeira da Silva, J.A. (2013). Physiological effects of salicylic acid and thiourea on growth and productivity of maize plants in sandy soil. *Communications* in *Soil Science* and *Plant Analysis*, *44*(7), 1141-1155.

Asgari, K., Dastan, S., Ajam Norouzi, H., & Ghanbari Malider, A. (2017). Effects of grain growth characteristic and yield components on Wheat yield in Golestan province's climatic condition. *Journal of Plant Production Science*, *6*(2), 33-40.

Asgarirad, H., Pourmorad, F., Hosseinimehr, S.J., Saeidnia, S., Ebrahimzadeh, M.A., & Lotfi, F. (2010). In vitro antioxidant analysis of *Achillea tenuifolia*. African Journal of Biotechnology, *24*(9), 3536-3541.

Azmat, A., H., Yasmin, M.N., Hassan, A., Nosheen, R., Naz, M., Sajjad, Ilyas, N., & Akhtar, M.N. (2020). Co-application of bio-fertilizer and salicylic acid improves growth, photosynthetic pigments and stress tolerance in wheat under drought stress. *PeerJ*, *8*, 9960.

Babaei, K., Seyed Sharifi, R., Pirzad, A., & Khalilzadeh, R. (2017). Effects of bio fertilizer and nano Zn-Fe oxide on physiological traits, antioxidant enzymes activity and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Journal* of *Plant Interactions*, *12*(1), 381-389.

Bagheri, N., Alizadeh, O., Zadeh, S.S., Aref, F., & Ordookhani, K. (2019). Evaluation of auxin priming and plant growth promoting Rhizobacteria on yield and yield components of wheat under drought stress. *EurAsian Journal of BioSciences*, *13*(2), 711-716.

Bhatta, M., Sandro, P., Smith, M.R., Delaney, O., Voss-Fels, K.P., Gutierrez, L., & Hickey, L.T. (2021). Need for speed: manipulating plant growth to accelerate breeding cycles. *Current Opinion* in *Plant Biology*, *60*, 101986.

Bijalwan, P., Sharma, M., and Kaushik, P. (2022). Review of the Effects of Drought Stress on Plants: A Systematic Approach.

Biglouei, M.H., Ghasemi, A.K., Dashti, M.J., & Esfahani, M. (2013). Effect of irrigation regimes on yield and quality of forage maize (KSC 704) in Rasht region in Iran. *Iranian Journal of Crop Science*, *15*(3),196-206.

Boroujeni, Y.K., Boroujeni, V.N., Rastegari, A.A., Yadav, N., and Yadav, A.N. (2021). Soil microbes with multifarious plant growth promoting attributes for enhanced production of food crops. In Soil Microbiomes for Sustainable Agriculture. 55-83.

Caser, M., Chitarra, W., D'Angiolillo, F., Perrone, I., Demasi, S., Lovisolo, C., Pistelli, L., Pistelli, L., & Scariot, V. (2019). Drought stress adaptation modulates plant secondary metabolite production in *Salvia dolomitica* Codd. Ind. *Crops Production*, *129*, 85-96

Chen, Y., Li, S., Liu, N., He, H., Cao, X., Lv, C., Zhang, K., & Dai, J. (2021). Effects of different types of microbial inoculants on available nitrogen and phosphorus, soil microbial community, and wheat growth in high-P soil. *Environmental Science* and *Pollution Research*, *28*(18), 23036-23047.

Choudhary, S., Zehra, A., Mukarram, M., Naeem, M., Khan, M., Hakeem, K.R., & Aftab, T. (2021). An insight into the role of plant growth regulators in stimulating abiotic stress tolerance in some medicinally important plants. *Plant Growth Regulation*, 75-100.

Ghassemi, S., Zehtab-Salmasi, S., Ghassemi-Golezani K., & Alizadeh-Salteh, S. (2019). Morphological traits and yield of ajowan affected by different irrigation levels and growth regulators. *Advances in Horticultural Science*, *33*, 97-104.

Ghassemi-Golezani, K., & Solhi-Khajemarjan, R. (2021). Changes in growth and essential oil content of dill (*Anethum graveolens*) organs under drought stress in response to salicylic acid. *Journal of Plant Physiology*, *11*(1), 33-47.

Ghodrat, V., & Bahrani, A. (2022). Drought Tolerance Indices in Cotton Genotypes as Affected by Different Irrigation Regimes. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, *100*(2), 204-213.

Ghojavand, M., Kasraie, P., Tohidimoghadam, H., Naseri, M., & Larigani, H. (2023). The Effect of Biofertilizer and Salicylic Acid on Quantitative and Qualitative Traits of *Satureja hortensis* L. under Drought Stress Conditions. *Journal of Horticultural Sciences*, *37*(1), 277-291.

Gontia-Mishra, I., Sapre, S., Sharma, A., & Tiwari, S. (2016). Amelioration of drought tolerance in wheat by the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria. *Plant Biology*, *18*(6), 992-1000.

Hafez, E., Omara, A.E.D., & Ahmed, A. (2019). The coupling effects of plant growth promoting rhizobacteria and salicylic acid on physiological modifications, yield traits, and productivity of wheat under water deficient conditions. *Agronomy*, *9*(9), 524.

Hayati, A., Rahimi, M.M., Kledari, A., & Hosseini, S.M. (2022). Impact of humic acid and nano-Fe chelate on improving vegetative traits, yield and essential oil content of black cumin (*Nigella sativa*) under drought stress. *Iranian Journal of Horticulture Science and Technology*, *23* (1), 179-190.

Haiati, P., & Rowshan, V. (2014). Effects of exogenous salicylic acid on growth factors and quality and quantity of essential oil in *Satureja hortensis* L. *Iranian Journal of Applied Research and Medicinal Aromatic Plants*, *29*(4), 808-817.

Iqbal, M.A., Rahim, J., Naeem, W., Hassan, S., Khattab, Y., & Sabagh, A. (2021). Rainfed winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars respond differently to integrated fertilization in Pakistan. *Fresenius Environ. Bulletin, 30* (4), 3115-3121.

Jalalvand, A., Andalibi, B., Tavakoli, A., & Moradi, P. (2019). Effects of salicylic acid and cycocel on percentage and yield of essential oil and physiological characteristics on Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) under drought stress conditions. *Environmental Stresses* in *Crop Sciences*, *12*(3), 865-876.

Johnson, R., Vishwakarma, K., Hossen, M.S., Kumar, V., Shackira, A.M., Puthur, J.T., Abdi, G., Sarraf, M., & Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology* and *Biochemistry*, *172*, 56-69.

Kaya, C., Ugurlar, F., Ashraf, M., & Ahmad, P. (2023). Salicylic acid interacts with other plant growth regulators and signal molecules in response to stressful environments in plants. *Plant Physiology* and *Biochemistry*,*131*, 431-443.

Khan, M.I.R., Fatma, M., Per, T.S., Anjum, N.A., & Khan, N.A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 1-17.

Khan, N., Bano, A., & Curá, J.A. (2020). Role of beneficial microorganisms and salicylic acid in improving rainfed agriculture and future food safety. *Microorganisms*, *8*(7), 1018.

Khan, N., Zandi, P., Ali, S., Mehmood, A., Adnan Shahid, M., & Yang, J. (2018). Impact of salicylic acid and PGPR on the drought tolerance and phytoremediation potential of Helianthus annus. *Frontiers in Microbiology*, *9*, 2507.

Khodary, S.F.A. (2004). Effect of salicylic acid on the growth. Photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plant. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *6*, 5-8.

Kishor, P.B.K., Tiozon, R.N., Fernie, A.R., & Sreenivasulu, N. (2022). Abscisic acid and its role in the modulation of plant growth, development, and yield stability. *Trends in Plant Science*, *27*(12):1283-1295. doi: 10.1016/j.tplants.2022.08.013.

Koo, Y.M., Heo, A.Y., & Choi, H.W. (2020). Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. *Plant Pathology Journal*, *36*(1), 1.

Li, N., Euring, D., Cha, J.Y., Lin, Z., Lu, M., Huang, L.J., & Kim, W.Y. (2021). Plant hormone-mediated regulation of heat tolerance in response to global climate change. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 627969.

Liu, X.M., & Zhang, H. (2015). The effects of bacterial volatile emissions on plant abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 774.

Maroufi, A., Lotfi, M., Esmaeli, A., & Dastan, D. (2023). Relative expression of the key genes of Diosegnin biosynthesis in fenugreek (*Trigonella foenum-graesum*) in response to salicylic acid and methyl jasmonat. *Journal of Cell and Molecular Research*, *34*(3), 440-454.

Mehalaine, S. & Chenchouni, H. (2021). Quantifying how climatic factors influence essential oil yield in wild-growing plants. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(13), 1-12.

Mirjalili, A., Pazoki, A., & Rashidi, A. (2016). Effects of PGPR application methods on essential oil yield and ABA phytohormone of Yarrow (*Achilea millefolium* L.) under drought stress conditions. 4th International conference on research in engineering, science and technology, 6th September, Athens, Greece.

Mirzaie, M., Ladan Moghadam, A., Hakimi, L., & Danaee, E. (2020). The Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) improve plant growth, antioxidant capacity, and essential oil properties of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) under water stress. *Iranian Journal of Plant Physiology, 10* (2), 3155-3166.

Moaveni, P., Habibi, D., & Abaszade, B. (2009). Effect of drought stress on yield and yield components of four wheat cultivars in Shahre-Gods. *Journal of Crop Improvement*, *5*, 69-85.

Moradzadeh, S., Siavash Moghaddam, S., Rahimi, A., Pourakbar, L., & Sayyed, R.Z. (2021). Combined bio-chemical fertilizers ameliorate agro-biochemical attributes of black cumin *(Nigella sativa* L.). *Scientific Reports, 11*(1),1-16.

Mozafari, A., Daneshian, J., Habibi, D., Asgharzadeh, A., & Rad, A. (2015). Investigation the effect of plant growth promoting rhizobactria on some morphophysiological traits of bread wheat under terminal drought stress conditions. Iran. *Journal* of *Plant Physiology, 7*(26), 21-36.

Mozaffarian, V. (2008). Flora of Iran (Compositae: Anthemideae & Echinopeae). Publication of Research Institute of Forest and Rangelands, Tehran.

Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Sher, A., Ma, C., Wang, X., & Qiu, L. (2019). Research progress and perspective on drought stress in legumes: A review. *International Journal of Molecular Sciences, 20* (10), 2541.

Naeem, A.H., & Otroshy, M. (2015). Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Yield Increment and Some Growth Parameters of Potato (*Solanum tuberosum*) Genotypes. *Journal of Crop Production and Processing*, *4* (13), 37-49.

Naseem, H., & Bano, A. (2014). Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their exopolysaccharide in drought tolerance of maize. *Journal* of *Plant Interactions*, *9*(1), 689-701.

Nivetha, N., Lavanya, A.K., Vikram, K.V., Asha, A.D., Sruthi, K.S., Bandeppa, S., Annapurna, K., & Paul, S. (2021). PGPR-mediated regulation of antioxidants: Prospects for abiotic stress management in plants. Antioxidants in Plant-Microbe Interaction. pp. 471-497. Springer, Singapore.

Omara, A.E.D., & Elbagory, M. (2018). Enhancement of plant growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought conditions using plant-growth-promoting bacteria. *Annual Research & Review in Biology*, 1-18.

Piri, R., Moradi, A., Balouchi, H., & Salehi, A. (2019). Improvement of cumin (*Cuminum cyminum*) seed performance under drought stress by seed coating and biopriming. *Scientia Horticulturae, 257*, 108667.

Salarpour Ghoraba, F., & Farahbakhsh, H. (2014). Effects of drought stress and salicylic acid on morphological and physiological traits of (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Journal of Crop Improvement, 16*(3), 765-778.

Saleem, M., Fariduddin, Q., & Janda, T. (2021). Multifaceted role of salicylic acid in combating cold stress in plants: a review. *Journal* of *Plant Growth Regulation, 40*(2), 464-485.

SAS Institute, C., NC. (2017). Base SAS 9.4 Procedures Guide: Statistical Procedures. SAS Institute.

Sati, D., Veni, P., Satish, C. P., & Mukesh, S. (2023). Recent advances in PGPR and molecular mechanisms involved in drought stress resistance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23*(1), 106-124.

Sedaghati, E., Shirinzadeh, K., Mohammadi Mirik, A.A., Karimi, H., & Nadi, M. (2021). Investigation the efficiency of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological indices of micropropagated pear rootstock (Pyrodwarf) under drought stress. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology, 22* (4), 519-534.

Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H., & Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants, 10*(2), 259.

Shahbazi, H., Arzani, A., & Esmalizadeh, M.M. (2016). Effects of drought stress on physiological characteristics in wheat recombinant inbred lines. *Journal of Plant Process Function, 5*(15), 123-131.

Sharifi Ashorabadi, E., Lebaschi, M.H., Naderi, B., & Allahverdi Mamaghani, B. (2009). Effect of Water Deficit on Yield and Essential Oil in (*Achillea millefolium* L.). *Environmental Science* & *Technology, 7*(1).

Sharma, A., & Zheng, B. (2019). Melatonin mediated regulation of drought stress: Physiological and molecular aspects. *Plants, 8*(7): 190.

Shaykh Samani, Ụ.A., Ghasemi Pirbalouti, P., Yadegari, M., & Rajabzadeh, F. (2023). Evaluation of the foliar application effect of salicylic acid on the morpho-physiological and phytochemical traits of the essential oil from Satureja bachtiarica Bunge. under deficit irrigation conditions. *Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants, 10*(4), 93-106.

Yeganehpoor F., Zehtab-Salmasi, S., Ghassemi-Golezani, K., Shafagh-Kolvanagh, J., & Dastborhan, S. (2017). The effect of water stress, salicylic acid and biofertilizer on quality of leaf and seed essential oil, and oil components of coriander. *Net Journal of Agricultural Science, 5*, 38-47.

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 25 (1): 1-24 (2024)
Research article

Effect of Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Salicylic acid on Agronomic Properties and Essential Oil Content of Yarrow (*Achillea millefolium* L.) under Drought Stress Conditions

Mohsen Zarehpour[1]. Mohammad Mehdi Rahimi[1*], Moslem Abdipour*[2] and Abdulsamad Kelidari[1]

1. Department of Agriculture, Yasouj Branch, Islamic Azad University, Yasouj, Iran.
2. Kohgiluyeh and Boyerahmad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gachsaran, Iran.
*Corresponding Authors, Email: (abdipur.m@gmail.com and mm.rahimi1351@gmail.com)

To observe the effect of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and salicylic acid under drought stress conditions on yarrow, an experiment was arranged as split-plot factorial based on a randomized complete block design with three replications in a research farm in Basht, Kohgiluyeh and Boyer-ahmad provice, during two years (2018 and 2019). Drought stress as the main factor in two levels (drought and non-drought stress), and secondary factors include foliar spraying with salicylic acid in two levels: control (no foliar spraying) and foliar spraying with salicylic acid (400 mg/L), and PGPR at four levels: control (no inoculation with bacteria), inoculation with Pseudomonas, inoculation with Azotobacterial and inoculation with both bacteria were assigned to the main and sub-plots, respectively. The results of a two-year combined variance analysis showed that effects of year, drought stress, bacteria, salicylic acid and drought stress × salicylic acid × bacteria on plant height, thousand seed weight, flower yield, biological yield, essential oil content, and essential oil yield were significant. The average flower yield in the first year was 731.45 kg/ha, which had a significant difference compared to the second year. The highest plant height (65.94 cm) was obtained from azotobacterial and salicylic acid treatment under non-drought stress conditions. Meanwhile, in both conditions (non-drought stress and drought stress), the maximum thousand seed weight (0.29 and 0.23 g), flower yield (1389 and 492 kg/ha), biological yield (8634 and 4106 kg/ha), harvest index (16.09 and 11.99 %), essential oil content (1.41 and 0.80 %) and essential oil yield (1.77 and 19.54 kg/ha) were obtained for bacteria and salicylic acid treatment. Although drought stress caused a significant decrease in all traits, especially flower yield, essential oil content and yield, the use of growth-promoting bacteria or salicylic acid, especially in the treatment of simultaneous application of two bacteria and salicylic acid, significantly reduced the damage of drought stress on flower yield, essential oil content and yield compared to the control.

Keywords: Salicylic acid, Plant growth-promoting rhizobacteria, Essential oil content, Flower yield, Harvest index.