مقاله پژوهشی

Research Article

نشریه علمی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران
جلد ۳۹، شماره ۲، صفحه ۲۵۴-۲۳۷ (۱۴۰۲)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijmapr.2023.360004.3235
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350905.1402.39.2.7.4

اثر تنش خشکی، اسید سالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها، بر عملکرد رشدی و میزان روغن و اسانس سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.)

محبوبه عدالتیان خرازی[1] و احمد اصغرزاده[2*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته علوم و مهندسی باغبانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیروان، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیروان، ایران، پست الکترونیک: asg.ahmad@yahoo.com

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۱ تاریخ اصلاح نهایی: دی ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: اسفند ۱۴۰۱

چکیده

به منظور بررسی اثرهای تنش خشکی، اسید سالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر عملکرد رشدی گیاه و میزان روغن و اسانس بذر سیاه‌دانه (*Nigella sativa* L.)، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه آزاد شیروان اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل تنش خشکی در چهار سطح (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (شاهد)) به‌عنوان عامل اول و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک، پوترسین و اسپرمیدین هر یک در دو سطح (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) به‌عنوان عامل دوم بودند. نتایج نشان داد، بیشترین تعداد کپسول بارور در بوته (۱۲/۶۶)، تعداد دانه در کپسول (۹۶/۲۴) و شاخص برداشت (۵۸/۶۹٪) در تیمار ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی بدست آمد. همچنین، بیشترین عملکرد دانه در گلدان در تیمار ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی (۱۶/۰۵ گرم) و اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار (۱۱/۴۶ گرم) حاصل شد. از طرف دیگر، بیشترین ارتفاع بوته (۶۲/۵ سانتی‌متر)، وزن خشک تک بوته (۶/۴۴ گرم)، زیست‌توده در گلدان (۳۲/۲ گرم)، درصد روغن (۳۱/۲۱٪) و عملکرد روغن (۵/۷۱ گرم در گلدان) در اثر متقابل تیمار ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی و اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار و همچنین، بیشترین درصد اسانس (۰/۰۹٪) در اثر متقابل تیمار ۲۵٪ ظرفیت زراعی و اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار حاصل شد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که بهترین تیمار برای سیاه‌دانه در شرایط گلخانه، آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار بود. در کل، با افزایش شدت تنش، خصوصیات رشدی گیاه کاهش یافت، ولی با اعمال محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک اثرات منفی تنش خشکی تعدیل یافت.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، اسید سالیسیلیک، درصد اسانس، عملکرد روغن، شاخص برداشت.

مقدمه

انسان در طول تاریخ وابسته به گیاهان دارویی بوده و در عصر حاضر نیز با وجود پیشرفت‌های وسیع و فراگیری علمی و صنعتی، تمایل انسان برای استفاده از این گیاهان نه تنها کاهش نیافته بلکه در مواردی نیز افزایش داشته است (Mardanlou, 2016). توسعه روزافزون مصرف گیاهان دارویی نیاز به توسعه کشت، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح آن دارد. سیاه‌دانه از خانواده Ranunculaceae، دو لپه، علفی و یک‌ساله می‌باشد. در ایران حدود ۸ گونه دارد که *Nigella sativa* یکی از این گونه‌هاست و به‌طور طبیعی در نقاط مختلف ایران رشد می‌کند، به علاوه در بعضی نقاط نیز کشت می‌شود. دانه‌های گیاه سیاه‌دانه در طب سنتی ایران استفاده و از اسانس آن ترکیبی به نام نیژلون استخراج می‌شود که قادر است اثرهایی مانند شیرآوری، ضد نفخ،

Copyright: © 2023 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijmapr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

مسهل و ضدانگل داشته باشد (Rezvan Bidakhti *et al*., 2012). ایران دارای منابع غنی گیاهان دارویی بوده و از لحاظ آب و هوایی، موقعیت جغرافیایی و زمینه رشد این گیاهان یکی از مهمترین مناطق جهان محسوب می‌شود، ولی متأسفانه با وجود دارا بودن این قابلیت‌ها، بهره‌برداری و استفاده از این گیاهان به صورت خودرو و زراعی بوده و برنامه اصلاحی درخور توجهی ارائه نشده است (Mardanlou, 2016).

از سوی دیگر، در طول دوره رشد، گیاهان مختلف با انواع مختلفی از تنش‌های غیر زیستی مواجه هستند (Singla & Krattinger, 2016). خشکی یکی از مشکلات عمده کشاورزان است که هر ساله با آن مواجه می‌شوند. این یک پدیده طبیعی است که در یک دوره طولانی با دسترسی ناکافی آب شیرین برای نیازهای انسان و اکوسیستم ایجاد شده و ادامه می‌یابد (Balint *et al*., 2013). خشکی مهمترین محدودیت محیطی در تولید محصولات زراعی در سراسر جهان است (Chai *et al*., 2016). مطالعه پاسخ گیاهان به کم آبیاری به منظور کاهش مصرف آب در کشاورزی به‌ویژه در مناطقی که آب یک عامل محدود کننده در تولید است، بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اینکه در بسیاری از گیاهان دارویی و معطر، شدت اثرهای نامطلوب خشکی در مراحل مختلف رشد متفاوت می‌باشد، بنابراین شناسایی مراحل بحرانی یا زمانی که گیاه بیشترین حساسیت را نسبت به تنش خشکی دارد، مهم است. همچنین، تغییر روش به سمت کشاورزی پایدار و یافتن راه‌حل‌هایی برای مسائل مربوط به کمبود آب و تأثیر آن بر امنیت غذایی ضروریست (Bhat *et al*., 2020).

اسید سالیسیلیک (SA) یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی مهم است که در پاسخ به تنش‌های زیستی نقش دارد (Roumani *et al*., 2019). جدای از این نقش، مطالعات اخیر نشان داده است که SA در سیگنال‌دهی پاسخ‌های تنش غیرزیستی، مانند خشکی، دمای بالا و پایین، شوری، ازن، اشعه UV و فلزات سنگین شرکت می‌کند (Hara *et al*., 2012). علاوه بر این، تنش‌های غیرزیستی نیز باعث تجمع SA درون‌زا می‌شود (Roumani *et al*., 2019). براساس گزارش‌های متعدد، اسید سالیسیلیک نقش به‌سزایی در کاهش آسیب‌های ناشی از تنش‌های غیرزیستی در گیاهان دارد. علاوه بر این، اسید سالیسیلیک نقش حیاتی در فرایندهای فیزیولوژیکی مختلف مانند رشد و نمو گیاه، جذب یون، فتوسنتز و جوانه‌زنی ایفاء می‌کند (Shekofteh *et al*., 2015). محققان نشان داده‌اند که SA نشت یونی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و یون‌های سمّی را در گیاه سیاه‌دانه انباشته می‌کند (Movahhedi-Dehnavi *et al*., 2019). همچنین کاربرد اسید سالیسیلیک باعث افزایش ظرفیت فتوسنتزی در سیاه‌دانه تحت تنش خشکی شد (Arfan *et al*., 2007). گزارش شده است که SA به تجمع ABA کمک می‌کند، بنابراین به بهبود تنظیم اسمزی و رشد گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum*) کمک می‌نماید (Szepesi *et al*., 2009). از سوی دیگر، نتایج نشان داد که استفاده از اسید سالیسیلیک روی بخش‌های هوایی گیاهان ریحان و مرزنجوش باعث افزایش ارتفاع، تعداد گره‌ها و برگ‌ها در هر گیاه، وزن تر و خشک، پلی‌آمین‌ها (پوتریسین، اسپرمیدین)، قندها و درصد و عملکرد اسانس می‌شود (Gharib, 2006). پلی‌آمین‌ها (PA) گروهی از ترکیب‌های طبیعی آلیفاتیک آمین فیتوهورمون مانند با ساختار نیتروژن آلیفاتیک هستند و تقریباً در همه موجودات زنده ازجمله گیاهان وجود دارند. آنها در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی، مانند رشد و تکامل سلولی و پاسخ به تحمل تنش در برابر عوامل مختلف محیطی، نقش دارند (Roumani *et al*., 2019). ازجمله تنظیم کننده‌های دیگر رشد پلی‌آمین‌ها (پوتریسین، اسپرمین و اسپرمیدین) هستند که ترکیب‌های چند منظوره پلی‌کاتیونیک هستند و در گروه کربوهیدرات‌های آلیفاتیک با وزن مولکولی کم و ساختار زنجیره‌ای قرار دارند (Darabi *et al*., 2021). این ترکیب‌ها باعث تنظیم بعضی از فرایندهای بنیادین سلول ازجمله تقسیم سلولی، تنظیم فعالیت آنزیم‌ها، حفظ پایداری غشاءها، جاروب کردن رادیکال‌های فعال و تحمل تنش‌های مختلف می‌شوند (Liu *et al*., 2016). پوتریسین به‌عنوان یکی از

پلی‌آمین‌های فعال که بعضی از متابولیسم‌های ترکیب‌های نیتروژنی را انجام می‌دهد منجر به افزایش خصوصیات رشدی گیاه می‌گردد (Farsarai & Moghadam, 2019). در شرایط تنش در بسیاری از موارد پلی‌آمین‌های آزاد در گیاه انباشته می‌شوند و با مولکول‌های آلی دیگر ترکیب می‌گردند که نشان می‌دهد یکی از مهمترین واکنش‌های بیوشیمیایی گیاهان در شرایط تنش ساخت پلی‌آمین‌هاست (Alizadeh *et al*., 2017). پوترسین از طریق آنزیم اسپرمیدین سنتاز (SPDS) و با افزودن یک نیمه آمینو پروپیل که از دکربوکسیلاسیون S-آدنوزیل متیونین (SAM) توسط آنزیم S-آدنوزیل متیونین دکربوکسیلاز فراهم می‌شود، به اسپرمیدین تبدیل می‌شود. این ترکیب‌ها در محدوده وسیعی از فرایندهای بیولوژیکی ازجمله رشد گیاهی، نمو و پاسخ به تنش نقش دارند و در پاسخ‌های متعدد به سیگنال‌های هورمونی به‌عنوان پیامبرهای ثانویه یا تنظیم کننده‌های رشد عمل می‌کنند (Noah Peseh & Manouchehri Kalantari, 2018). اسپرمیدین یک پلی‌آمین است که به‌عنوان یک حذف کننده رادیکال‌های آزاد عمل می‌کند و از غشاءها در برابر آسیب‌های اکسیداتیو محافظت می‌کند (Tao *et al*., 2018). اسپرمیدین در پاسخ به تنش غیرزیستی دخیل است و یک فرایند پیچیده است که چندین فرایند متابولیک را متحد می‌کند (Satish *et al*., 2018). مطالعات اخیر نشان داد که کاربرد خارجی اسپرمیدین برای تحمل به تنش خشکی در گیاهان نیز مفید است (Zheng *et al*., 2016). گزارش شده است پوترسین و اسپرمیدین منجر به کاهش اثرهای تنش خشکی در سویا گردید، همچنین تحت تنش خشکی منجر به افزایش طول ریشه و ساقه شد (Nayyar *et al*., 2005). در بررسی دیگری که بر روی ریحان انجام شد، با افزایش غلظت پوتریسین (۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) ارتفاع، وزن خشک و تر، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، تعداد شاخه‌های جانبی، قندها، درصد و عملکرد اسانس در هر دو چین بهبود یافت (Talaat & Balbaa, 2010). در بررسی دیگری بیان شد که محلول پاشی ۱ میلی‌مولار پوتریسین روی گل پروانش باعث افزایش معنی‌دار و متوالی رشد در مرحله نمو شده است (Talaat *et al*., 2005).

به دلیل اهمیت ظرفیت تولید کشت‌وکار گیاهان دارویی و بهبود عملکرد کمّی و کیفی گیاه سیاه‌دانه، به‌عنوان گیاهی ارزشمند، این آزمایش با هدف بررسی اثر تنش خشکی، اسید سالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر عملکرد و میزان روغن و اسانس گیاه سیاه‌دانه انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر تنش خشکی و اثر تنظیم کننده‌ها ازجمله پوترسین، اسپرمیدین و اسیدسالیسیلیک بر بیوماس و عملکرد و درصد اسانس گیاه سیاه‌دانه، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه آزاد شیروان اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۸ تیمار شامل اسید سالیسیلیک (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار)، پوترسین (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) و اسپرمیدین هر یک در دو سطح (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) و تنش خشکی در چهار سطح (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آبیاری) در سه تکرار بر روی گیاه سیاه‌دانه انجام شد.

کشت بذرهای سیاه‌دانه در داخل گلدان‌ها انجام شد. خاک گلدان‌ها مخلوطی از خاک، ماسه و کود دامی به نسبت (۱:۱:۲) در نظر گرفته شد. گلدان‌های مورد استفاده از نوع پلاستیکی، با قطر دهانه ۱۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و گنجایش ۵ کیلوگرم بود. در کف گلدان‌ها برای زهکش از گراویه استفاده شد. سپس از مخلوط خاک آماده شده گلدان‌ها را پر کرده و در داخل هر گلدان ۱۰ عدد بذر کشت و بلافاصله آبیاری انجام شد. پس از سبز شدن تعداد ۵ بوته حفظ و بقیه حذف شد. پس از سبز شدن در مرحله ۴ برگی (حدود دو هفته بعد از کشت) تیمار تنش خشکی اعمال گردید. همچنین پس از دو هفته از اعمال تنش خشکی، تیمارهای تنظیم‌کننده‌ها (محلول‌پاشی) در ۳ مرحله در فواصل زمانی هر ۱۰ روز انجام شد. پلی‌آمین‌های (پوترسین و اسپرمیدین) بکار برده شده به صورت پودری، خالص و ساخت شرکت سیگما بودند که از شرکت زیست‌آزما واقع در دانشگاه فردوسی مشهد تهیه شدند.

اعمال تنش خشکی ۲ هفته بعد از رشد گیاهچه‌ها انجام شد. برای اعمال سطوح تنش خشکی از روش وزنی استفاده شد (Parsa *et al*., 2019).

در پایان فصل رشد پارامترهای رشدی شامل ارتفاع بوته، وزن خشک گیاه، تعداد کپسول بارور در هر گیاه، تعداد دانه در کپسول، وزن هزاردانه و عملکرد دانه در هر بوته، بیوماس، درصد روغن، عملکرد روغن، درصد اسانس و شاخص برداشت تعیین شد. برای اندازه‌گیری درصد روغن از روش سوکسله با حلال هگزان (C_6H_{14}) استفاده شد (AOAC, 2002)؛ به این صورت که مقدار سه گرم بذر سیاه‌دانه از هر واحد آزمایشی آسیاب شد و در کاغذ صافی بسته‌بندی و وزن گردید؛ سپس بذرها به همراه ۳۳۰ میلی‌لیتر C_6H_{14} در دستگاه سوکسله مدل پوال گذاشته شد و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم گردید. هگزان پس از جوشیدن، وارد مخزن سوکلسله می‌شود و با پر شدن مخزن، از سیفون نازک شیشه‌ای به بالن برمی‌گردد؛ این چرخه به مدت شش ساعت ادامه پیدا کرد و پس از آنکه سیستم خنک شد، بذرها در آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و در پایان وزن گردید. درصد روغن براساس معادله ذکرشده محاسبه شد.

$$\text{درصد روغن (\%)} = \left(\frac{\text{وزن ثانویه} - \text{وزن اولیه}}{\text{وزن اولیه}}\right) - \text{درصد رطوبت محتوای توده بذر}$$

برای اندازه‌گیری عملکرد روغن دانه از رابطه زیر استفاده شد.

درصد روغن × عملکرد بذر = عملکرد روغن

برای اسانس‌گیری نمونه‌ها، مقدار ۳۰ گرم از نمونه خشک شده و پودر شده همراه با ۲۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر درون بالن دستگاه کلونجر ریخته و اسانس‌گیری انجام شد و در نهایت برای جداسازی آب از اسانس از NA_2SO_4 استفاده شد (Samsam Shariat, 2007).

اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌ها با نرم‌افزار SAS ver. 9.1 تجزیه‌وتحلیل گردید و رسم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Execl انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون LSD در سطح ۵٪ انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی بر روی ارتفاع بوته معنی‌دار بودند (جدول ۱). نتایج نشان داد بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبی ۱۰۰٪ و محلول اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار به میزان ۶۲/۵ سانتی‌متر گزارش شد و کمترین میزان این شاخص نیز در تنش خشکی ۲۵٪ و محلول‌پاشی پوترسین ۰/۵ میلی‌مولار به میزان ۳۸/۴۲ سانتی‌متر حاصل شد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۶۳٪ بود (شکل ۱).

وزن خشک تک بوته تحت تأثیر اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین صفات نشان داد، بیشترین وزن خشک تک بوته به میزان ۶/۴۴ گرم در بوته در تیمار آبی ۱۰۰٪ و محلول سالیسیلیک اسید ۱ میلی‌مولار گزارش شد که نسبت به تیمار تنش خشکی ۲۵٪ و شاهد بدون محلول‌پاشی (۲/۰۱ گرم در بوته)، به میزان ۲۲۱٪ وزن خشک تک بوته بیشتری داشتند (شکل ۲).

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مختلف سیاه‌دانه تحت تاثیر تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها

Table 1. ANOVA of different *Nigella sativa* traits affected by drought stress and foliar application of salicylic acid and polyamines

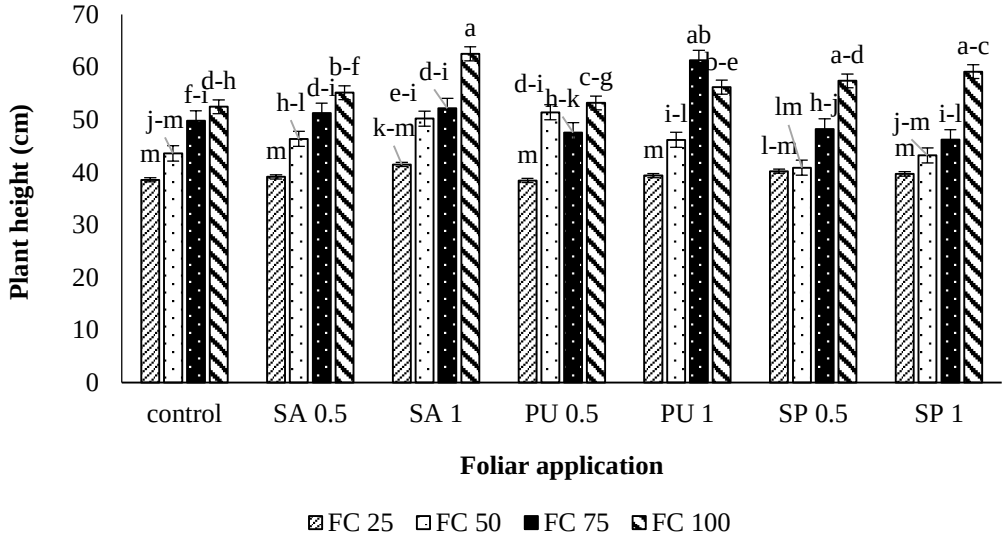
S.O.V.	d.f.	Plant height	Aerial parts dry weight	Number of fertile capsules per plant	Number of seeds per capsule	1000-seeds weight
drought stress (A)	3	1100**	42.6**	67.4**	1894**	6.62**
foliar application (B)	6	52.9**	1.13**	0.88 ns	70.01 ns	0.39**
A × B	18	35.3**	0.55**	0.06 ns	9.03 ns	0.06**
Experimental error	56	14.4	0.23	2.21	120	0.01
C.V. (%)		7.88	12.05	14.47	14.46	6.61

ادامه جدول ۱- ...

Continued table 1. …

S.O.V.	d.f.	Seed yield per pot	Biomass per pot	Oil percentage	Oil yield	Essential oil percentage	Harvest index
drought stress (A)	3	541**	1155**	351**	45.6**	0.004**	1330**
foliar application (B)	6	10.5**	28.3**	16.08**	1.61**	0.0008**	181 ns
A × B	18	0.45 ns	13.9**	10.4*	0.53**	0.0001**	107 ns
Experimental error	56	1.92	5.93	4.7	0.22	0.00004	122
C.V. (%)		13.9	12.05	11.3	22.7	15.1	22.9

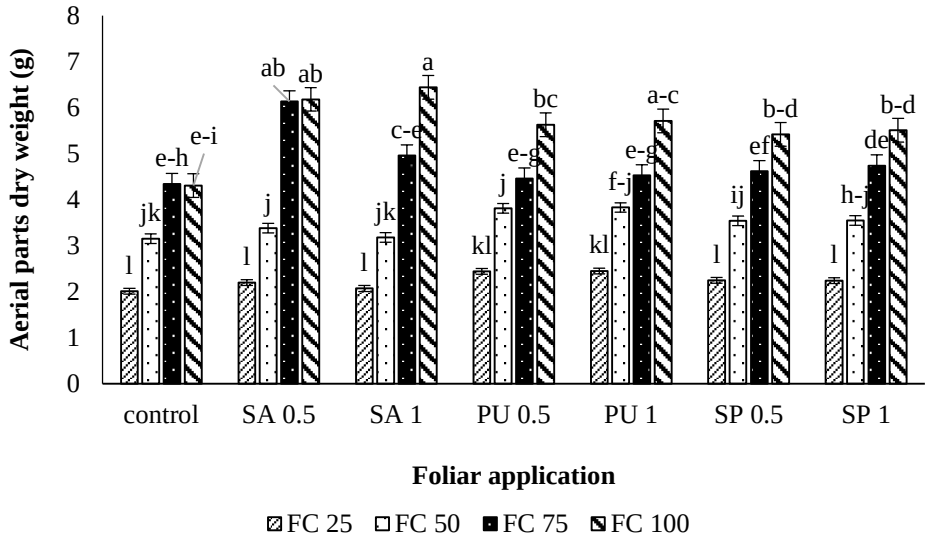
n.s. and **: non-significant and significant at 1% probability level, respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر ارتفاع بوته سیاه‌دانه

Figure 1. Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* plant height

Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1)
Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر وزن خشک بوته سیاه‌دانه

Figure 2. Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* plant dry weight

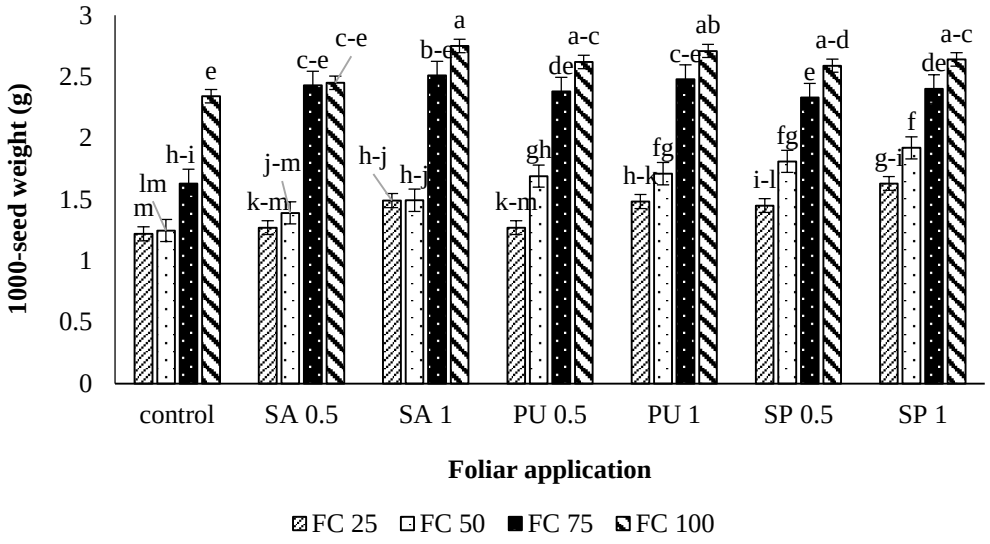
Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1). Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

تعداد کپسول بارور در بوته نیز تحت تأثیر اثر اصلی تنش خشکی ($p\leq 0.01$) قرار گرفت و دیگر اثرها بر روی این شاخص تأثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۱). مقایسه میانگین صفات نشان داد بیشترین میزان این شاخص در تیمار آبی ۱۰۰٪ (۱۲/۶۶) گزارش شد و کمترین میزان در تنش خشکی ۲۵٪ (۸/۴۶) حاصل شد که تفاوت بیشترین و کمترین تعداد کپسول بارور ۵۰٪ است (جدول ۱).

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد تعداد دانه در کپسول تحت تأثیر اثر اصلی تنش خشکی ($p\leq 0.01$) قرار گرفت و دیگر اثرهای اصلی محلول‌پاشی و اثر متقابل آنها بر روی این شاخص تأثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۱). مقایسه میانگین صفات نشان داد هر چند تیمار ۱۰۰ و ۷۵٪ تنش خشکی از لحاظ تعداد دانه در کپسول تفاوتی نداشتند ولی بیشترین میزان این شاخص در تیمار آبی ۱۰۰٪ (۹۶/۲۴) بدست آمد و کمترین میزان این شاخص در تنش خشکی ۲۵٪ (۷۵/۵۱) گزارش شد که تفاوت بیشترین و کمترین تعداد دانه در کپسول ۲۷٪ بود (جدول ۱).

وزن هزاردانه تحت تأثیر اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین صفات نشان داد، بیشترین وزن هزاردانه به میزان ۲/۷۵ گرم در تیمار آبی ۱۰۰٪ و محلول سالیسیلیک اسید ۱ میلی‌مولار گزارش شد که نسبت به تیمار تنش خشکی ۲۵٪ و شاهد بدون محلول‌پاشی (۱/۲۲ گرم)، به میزان ۱۲۵٪ وزن هزاردانه بیشتری داشتند (شکل ۳).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) بر روی شاخص عملکرد دانه در گلدان معنی‌دار بودند ولی اثر متقابل آنها معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین صفات برای تنش خشکی نشان داد با اعمال تنش از میزان عملکرد دانه کاسته شد. بیشترین میزان این صفت در تیمار آبی ۱۰۰٪ (۱۶/۰۵ گرم در گلدان) گزارش شد که نسبت به تیمار ۲۵٪ آبیاری (۴/۵۹ گرم در گلدان) به میزان ۲/۵ برابر بیشتر بود (شکل ۴). همچنین، بیشترین عملکرد دانه در محلول‌پاشی سالیسیلیک اسید ۱ میلی‌مولار (۱۱/۴۶ گرم در گلدان) بدست آمد که به‌میزان ۲۹٪ نسبت به تیمار شاهد بدون محلول‌پاشی عملکرد دانه بیشتری داشت (جدول ۲).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر وزن هزاردانه سیاه‌دانه

Figure 3. Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* 1000-seed weight

Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1). Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها روی صفات مختلف سیاه‌دانه

Table 2. Means comparison of single effects of drought stress and foliar application of salicylic acid and polyamines on different *Nigella sativa* traits

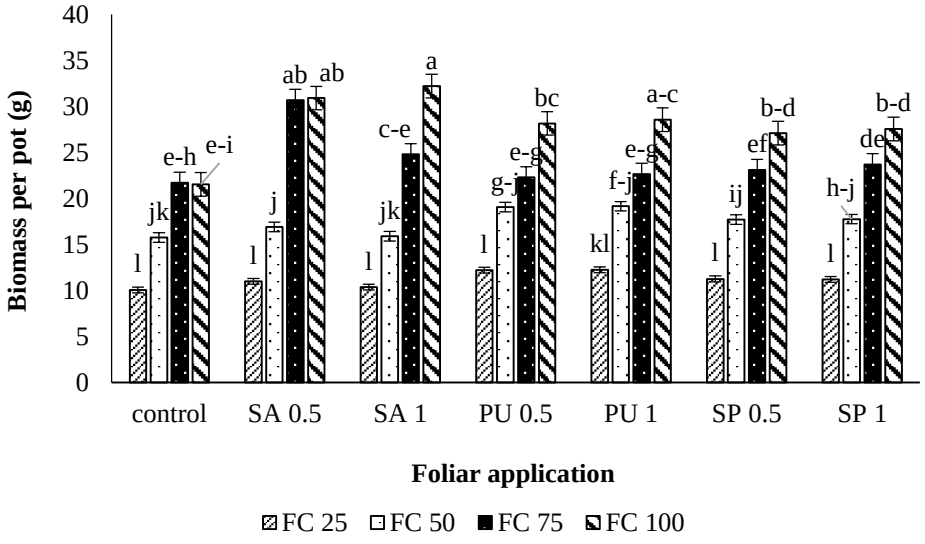
	Plant height (cm)	Aerial parts dry weight (g)	Number of seeds per capsule	Number of fertile capsules per plant	1000-seeds weight (g)
Drought stress (% of field capacity)					
25	39.5d	2.24d	8.46d	75.5c	1.40d
50	46.0c	3.49c	9.50c	85.4b	1.61c
75	50.9b	4.83b	10.53b	94.3a	2.31b
100	56.6a	5.60a	12.66a	96.2a	2.59a
Foliar application					
control	46.08c	3.45c	9.96a	86.04a	1.61d
alicylic acid 0.5 mM	47.9bc	4.47a	10.4a	89.9a	1.89c
salicylic acid 1 mM	51.6a	4.16ab	10.7a	91.9a	2.06ab
putrescine 0.5 mM	47.6c	4.08ab	10.1a	87.05a	1.99bc
putrescine 1 mM	50.7ab	4.13ab	10.5a	88.6a	2.10ab
spermidine 0.5 mM	46.7c	3.95b	10.02a	84.8a	2.05ab
spermidine 1 mM	47.04c	4.01b	10.3a	86.8a	2.14a

ادامه جدول ۲- ...

Continued table 2. …

	Seed yield per pot (g)	Biomass per pot (g)	Oil percentage	Oil yield (g.pot-1)	Essential oil percentage	Harvest index
Drought stress (% of field capacity)						
25	4.59d	11.2d	15.8c	0.74d	0.062d	41.8c
50	7.19c	17.5c	17.6b	1.28c	0.046c	42.2c
75	11.88b	24.1b	18.5b	2.22b	0.035b	50.1b
100	16.05a	28.0a	25.2a	4.10a	0.030a	58.7a
Foliar application						
control	8.92d	17.3c	17.9c	1.50e	0.036de	50.4ab
salicylic acid 0.5 mM	10.27bc	22.4a	19.5a-c	1.84bc	0.041cd	45.9b
salicylic acid 1 mM	11.47a	20.8ab	21.1a	2.17a	0.058a	55.0a
putrescine 0.5 mM	9.35cd	20.4ab	18.7bc	1.63de	0.037de	44.5b
putrescine 1 mM	10.65ab	20.7ab	20.4ab	1.96b	0.050b	49.9ab
spermidine 0.5 mM	8.98d	19.8b	18.1c	1.53e	0.035e	43.9b
spermidine 1 mM	9.86b-d	20.05b	19.09bc	1.75cd	0.045bc	47.9ab

In each column, means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).



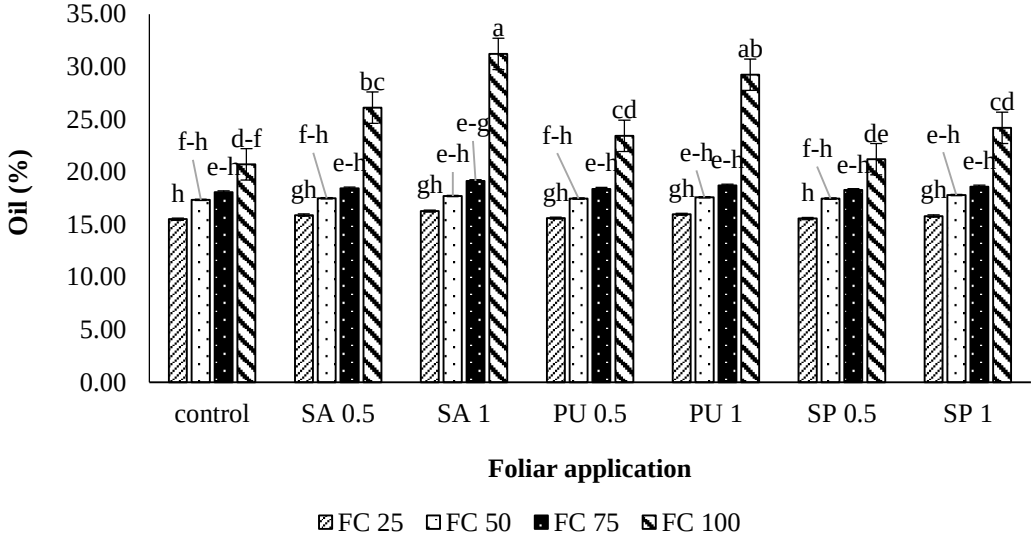
شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر زیست‌توده سیاه‌دانه

Figure 4. Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* biomass

Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1). Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی ($p\leq 0.05$) بر روی زیست‌توده معنی‌دار بودند (جدول ۳). نتایج نشان داد وزن زیست‌توده در تیمار آبی ۱۰۰٪ و محلول اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار به میزان ۳۲/۲ گرم گزارش شد و کمترین میزان این شاخص نیز در تنش خشکی ۲۵٪ و شاهد بدون محلول‌پاشی به میزان ۱۰/۰۵ گرم بدست آمد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان این شاخص برابر با ۲۲۰٪ بود (شکل ۴).

درصد روغن تحت تأثیر اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی ($p\leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین صفات نشان داد، هرچند محلول پوترسین و اسید سالیسیلیک تفاوتی از لحاظ درصد روغن نداشتند ولی بیشترین درصد روغن به میزان ۳۱/۲۱٪ در تیمار آبی ۱۰۰٪ و محلول سالیسیلیک اسید ۱ میلی‌مولار گزارش شد که نسبت به تیمار تنش خشکی ۲۵٪ و شاهد بدون محلول‌پاشی (۱۵/۵۰٪)، به میزان ۱۰۱٪ روغن بیشتری تولید کرد (شکل ۵).

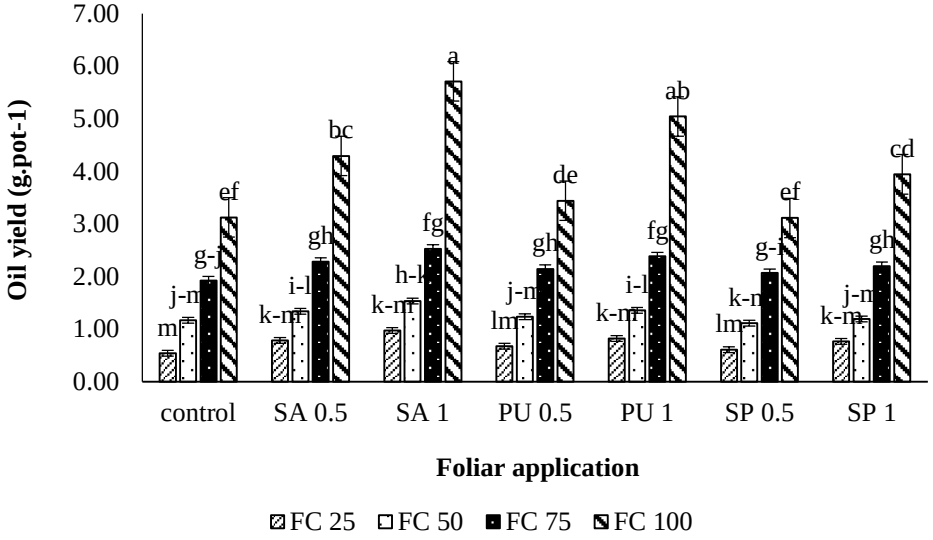


شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر درصد روغن بذر سیاه‌دانه

Figure 5. Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* seeds oil content

Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1). Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

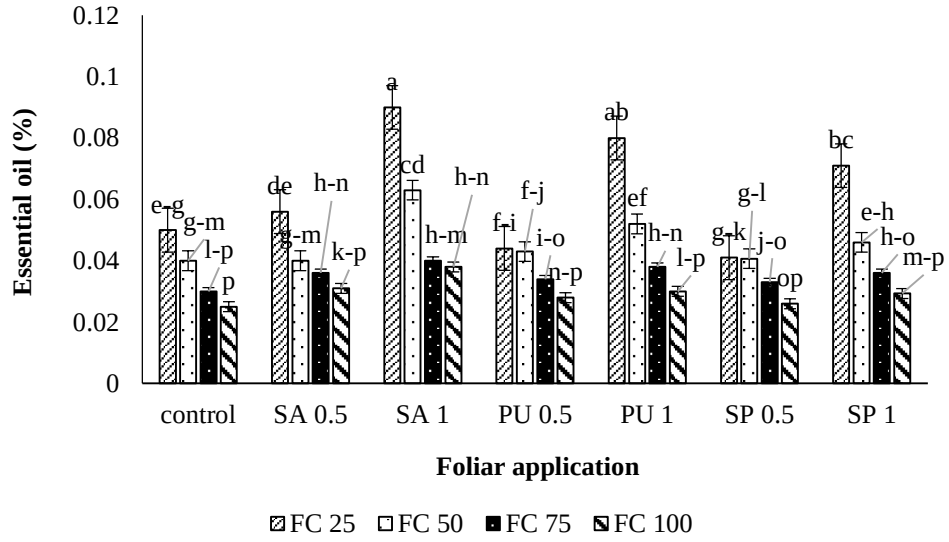
نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی ($p\leq 0.05$) بر روی شاخص عملکرد روغن در گلدان معنی‌دار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین صفات نشان داد، بیشترین عملکرد به میزان ۵/۷۱ گرم در تیمار آبی ۱۰۰٪ و محلول اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار گزارش شد که نسبت به تیمار تنش خشکی ۲۵٪ و شاهد بدون محلول‌پاشی (۰/۵۴ گرم در گلدان)، بیش از ۹ برابر درصد عملکرد روغن در گلدان بیشتری داشتند (شکل ۶).



شکل ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر عملکرد روغن بذر سیاه‌دانه

Figure 6 Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* seeds oil yield

Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1). Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسیدسالیسیلیک و پلی‌آمین‌ها بر درصد اسانس سیاه‌دانه

Figure 7. Means comparison of drought stress × foliar application of salicylic acid and polyamines effects on *Nigella sativa* essential oil content

Drought stress (% of field capacity): FC25, FC50, FC75, and FC100; Foliar application: control, alicylic acid 0.5 mM (SA0.5), salicylic acid 1 mM (SA1), putrescine 0.5 mM (PU0.5), putrescine 1 mM (PU1), spermidine 0.5 mM (SP0.5), spermidine 1 mM (SP1). Means with common letters are in the same statistical group at 5% probability level (LSD test).

درصد اسانس تحت تأثیر اثرهای اصلی تنش خشکی و محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) و اثرهای متقابل تنش خشکی×محلول‌پاشی ($p\leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین صفات نشان داد، بیشترین درصد اسانس به میزان ۰/۰۹٪ در تیمار تنش خشکی ۲۵٪ و محلول اسید سالیسیلیک ۱ میلی‌مولار گزارش شد که نسبت به تیمار آبی ۱۰۰٪ و شاهد بدون محلول‌پاشی (۰/۰۲۵٪)، بیش از ۲/۵ برابر درصد اسانس بیشتری داشتند (شکل ۷).

نتایج تجزیه واریانس صفات نشان داد شاخص برداشت تحت تأثیر اثر اصلی تنش خشکی ($p\leq 0.01$) قرار گرفت و دیگر اثرهای اصلی محلول‌پاشی و اثر متقابل آنها بر روی این شاخص تأثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین صفات نشان داد هر چند تیمار ۵۰٪ و ۲۵٪ تنش خشکی از لحاظ شاخص برداشت تفاوتی نداشتند ولی بیشترین میزان این شاخص در تیمار آبی ۱۰۰٪ (۵۸/۶۹٪) بدست آمد و کمترین میزان این شاخص در تنش خشکی ۲۵٪ (۴۱/۸۱٪) گزارش شد که تفاوت بیشترین و کمترین میزان شاخص برداشت ۴۰٪ بود (جدول ۴).

بحث

شاخص‌های رویشی یا زایشی به‌شدت تحت تأثیر عناصر غذایی و آب قرار می‌گیرد. اثر رطوبت بر کاهش ارتفاع و ماده خشک را می‌توان به کاهش طول دوره رشد به‌ویژه گرده‌افشانی تا رسیدگی و نیز اثر آن بر کاهش سرعت رشد محصول نسبت داد (Nehbandani *et al*., 2014). از دلایل کاهش ارتفاع و وزن خشک گیاه، ریزش سریع‌تر برگ‌ها به علت کمبود آب را می‌توان نام برد (Ghafari & Tadayon, 2018). Diallo و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند که در شرایط فراهمی رطوبت گیاهان سطح فتوسنتز کننده و ارتفاع خود را افزایش داده و سبب تولید زیست‌توده بیشتر می‌شوند. Li و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که کاهش مداوم آب در خاک به کاهش سطح برگ و ارتفاع و در نتیجه کاهش ماده خشک اندام هوایی منجر می‌گردد. با افزایش تنش خشکی از رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی کاسته می‌شود، اما رشد اندام‌های زیرزمینی کمتر از رشد اندام‌های هوایی کاهش می‌یابد. گیاه در شرایط تنش سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی را به ریشه اختصاص می‌دهد و این ویژگی باعث می‌گردد که گیاه بتواند در شرایط خشکی آب مورد نیاز سایر قسمت‌های خود را فراهم نماید (Mehdinejad & Shahi, 2018).

با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک، میزان رنگیزه‌های فتوسنتز و به‌ویژه کلروفیل و تقسیمات سلولی در گیاه لوبیا افزایش یافته و سبب افزایش ارتفاع و وزن خشک بوته در لوبیا می‌شود (Shoghian & Rozbahani, 2017) که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد. Aqlamand و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که اسید سالیسیلیک از طریق افزایش تقسیم سلولی درون مریستم گیاهچه گندم سبب افزایش رشد و وزن خشک گیاه شده است؛ احتمالاً در این آزمایش نیز افزایش وزن خشک در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک را در شرایط بدون تنش می‌توان با افزایش تقسیم سلولی مرتبط دانست. افزایش شاخص‌های رشدی مختلف ازجمله وزن تر و خشک اندام هوایی در گیاهان ریحان رشد کرده تحت تنش کم آبی از طریق تیمار با اسید سالیسیلیک گزارش شده است (Mohammadi Babazidi *et al*., 2013) که با نتایج این آزمایش مطابقت دارد. تنش کم آبی از طریق افزایش میزان اکسیژن فعال، کاهش عملکرد و تعداد آنزیم روبیسکو در گیاه، کاهش تشکیل پروتئین‌ها و پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء به‌ویژه در کلروپلاست و میتوکندری سبب کاهش رشد گیاه می‌شود. اسید سالیسیلیک از طریق فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانتی سبب جلوگیری از افزایش اکسیژن‌های فعال شده و مقاومت غشاء را افزایش می‌دهد و از این طریق سبب مقاومت گیاه به تنش و افزایش رشد می‌گردد (Delavari Parizi *et al*., 2012).

تعداد کپسول بارور و تعداد دانه در کپسول در بوته را می‌توان نموداری از تعداد گل‌های تلقیح شده در بوته تلقی کرد. البته کاهش دیده شده در تعداد کپسول بارور در اثر بروز تنش با یافته‌های Hassanzadeh و Ebadi (۲۰۰۹) مطابقت داشت. Sadeghian Dehkordi و Tadayon

(۲۰۱۶) گزارش کردند با افزایش میزان آبیاری تعداد کپسول بارور در گیاه کتان روغنی افزایش می‌یابد. محدودیت آبی در طول مراحل زایشی از طریق اختلال در عمل گرده‌افشانی و کاهش طول دوره آن موجب کاهش تعداد دانه در کپسول می‌شود (Patra *et al*., 2009). نتایج مطالعه Kochaki و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داد که تیمارهای مختلف آبیاری بر تعداد دانه در سنبله در هر دو گونه تأثیر معنی‌داری داشتند. از سوی دیگر، در بسیاری از گونه‌های زراعی، تنش آب در طی دوره پرشدن دانه‌ها را تحت تأثیر قرار داده و سبب چروکیده شدن دانه‌ها می‌گردد (Kochaki *et al*., 2011)؛ علت این موضوع را می‌توان ناشی از بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش سطح برگ و کاهش فعالیت فتوسنتزی در واکنش کمبود آب و کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه‌ها در تیمارهای تحت تنش آبی دانست (Kochaki *et al*., 2011). طبق نتایج این آزمایش نیز با کاهش میزان آب آبیاری، وزن هزاردانه کاهش یافت. Ramroudi و همکاران (۲۰۱۱) نیز که در مطالعه‌ای تأثیر رژیم آبیاری را بر گیاه سیاه‌دانه بررسی کردند، اظهار داشتند که با کاهش تعداد آبیاری، وزن هزاردانه به‌تدریج کاهش یافت. به نظر می‌رسد که پایین بودن وزن هزاردانه در رژیم کم آبیاری می‌تواند محدودیت آبی ناشی از قطع آبیاری در مراحل بعد از گلدهی باشد که به‌شدت قدرت منبع و توان ساخت یا انتقال مواد فتوسنتزی را کاهش می‌دهد.

Farooq و همکاران (۲۰۰۹) و Beigzadeh و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک اثر تنش خشکی را بر وزن هزاردانه کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با افزایش جذب عناصر و افزایش سرعت فتوسنتزی اثرهای منفی تنش خشکی را بر روی گیاه سیاه‌دانه کاهش می‌دهد. Sharafizad و همکاران (۲۰۱۳) به‌طور مشابه گزارش کردند که کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک اثر نامطلوب تنش خشکی بر گیاهان گندم را کاهش داد. Maleki و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک می‌تواند اثرهای منفی تنش خشکی را بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه ذرت کاهش دهد.

بروز تنش کم آبی در مراحل مختلف نموی به‌ویژه مرحله زایشی به علت کاهش طول دوره فتوسنتزی و انتقال مواد حاصل از فتوسنتز جاری به دانه است که این موضوع ناشی از پیری زودرس برگ‌ها و کاهش سطح برگ و نیز کاهش سهم انتقال دوباره مواد ذخیره‌شده در ساقه به دانه بوده و موجب کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده می‌شود (Bannayan *et al*., 2008). براساس نتایج تحقیق Kochaki و همکاران (۲۰۱۱) تیمارهای مختلف آبیاری بر عملکرد دانه و بیولوژیک سیاه‌دانه تأثیر معنی‌داری داشتند. اثرهای منفی بر کاهش میزان آب آبیاری بر روی اجزای تشکیل دهنده عملکرد دانه را می‌توان به رشد رویشی کمتر و به‌تبع آن، سطح فتوسنتزکننده محدودتر و تولید ماده خشک کمتر در گیاه در شرایط خشکی نسبت داد. از سویی کوتاه‌شدن طول دوره پر شدن دانه و رسیدگی زودتر تیمارهای تحت تنش خشکی، می‌تواند در کاهش عملکرد دانه مؤثر باشد. Wang و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که خشکی از طریق هدایت الکتریکی، فتوسنتز، توسعه سطح برگ و فرایند چرخه گیاه می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد ذرت و سویا داشته باشد.

از سوی دیگر، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک می‌تواند فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنزیمی (CAT، POX و PPO) و غیر آنزیمی را بهبود ببخشد و نقش اصلی را در افزایش تحمل به تنش گیاه و کاهش تنش اکسیداتیو ایفاء می‌کند (Beigzadeh *et al*., 2013)، در نتیجه رشد گیاهان تحت تنش خشکی را بهبود می‌بخشد. اسید سالیسیلیک به دلیل نقش آن در بهبود تشکیل گل و عملکرد دانه به‌طور قابل توجهی صفات عملکرد را افزایش داد. مطابق با یافته‌های ما، کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی باعث افزایش اجزای عملکرد سیاه‌دانه و عملکرد بیولوژیک از طریق کاهش اثرهای منفی تنش شد (Abdelaal, 2015). این اثرهای اسید سالیسیلیک می‌تواند به دلیل نقش بیشتر اسید سالیسیلیک برای ذخیره آب در سلول‌های گیاهی و افزایش فعالیت آنزیم در شرایط تنش باشد

(Pirasteh-Anosheh *et al*., 2015)، در نتیجه ویژگی‌های عملکرد دانه و بیولوژیک را افزایش می‌دهد.

در این مطالعه، کاهش درصد روغن و در ادامه عملکرد آن در اثر تنش خشکی می‌تواند به علت اختلال در فرایندهای متابولیسمی بذر و اختلال در انتقال آسیمیلات‌ها به دانه باشد (Rahmani *et al*., 2020). نتایج نشان داد تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه‌ها درصد روغن را کاهش داد و به نظر می‌رسد علت آن تسریع در رسیدگی گیاه می‌باشد که در این حالت فرصت کافی برای سنتز روغن از پروتئین‌های ذخیره شده در دانه وجود نداشته، بنابراین درصد روغن کاهش یافته است. گزارش شده است که تنش خشکی باعث تغییر در توسعه جنین و پریکارپ شده که در نتیجه آن کاهش محتوای روغن دانه رخ می‌دهد (Rondanini *et al*., 2003). از سوی دیگر، با توجه به وابستگی شدید عملکرد روغن سیاه‌دانه به عملکرد دانه، چنین نتیجه‌ای قابل پیش‌بینی بود. در این زمینه Pasandi و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کرده‌اند که در تعیین عملکرد روغن کلزا، تأثیر عملکرد دانه در مقایسه با درصد روغن بسیار بیشتر می‌باشد. واضح است که آبیاری کامل و به‌موقع موجب افزایش عملکرد دانه و افزایش عملکرد روغن شده است.

تجمع روغن در دانه‌ها با سنتز اسیدهای چرب در پلاستید همراه است و بسیاری از آنزیم‌های کلیدی در این فرایند دخیل هستند. ازجمله این آنزیم‌ها می‌توان به استیل کوآ کربوکسیلاز استیل اشاره کرد که ترکیب اسید سالیسیلیک بر روی عملکرد این آنزیم ضروریست (Li *et al*., 2017). تأمین عناصر مورد نیاز گیاه به همراه آبیاری بهینه و به‌موقع می‌تواند به میزان قابل توجهی کارایی سیستم‌های تولید سیاه‌دانه را افزایش داده و تولید روغن را بهبود بخشد (Pasandi *et al*., 2018). همچنین، در بررسی اثر محلول‌پاشی روی بر گیاه گلرنگ در شرایط آبیاری مطلوب و آبیاری محدود گزارش شده است که بیشترین مقدار درصد روغن با کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل حاصل شد (Manoelian *et al*., 2022). از سوی دیگر، گزارش شده است که افزایش عملکرد دانه و اجزای عملکرد سیاه‌دانه در اثر مصرف اسید سالیسیلیک به دلیل تأثیر آن بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه، بهبود رشد و انتقال مواد پرورده از منبع به مخزن بود (Grown, 2012).

تشکیل و تجمع اسانس در گیاهان تحت شرایط محیطی خشک تمایل به افزایش نشان می‌دهد. امروزه فرضیه‌ای با عنوان فرضیه موازنه رشد- تمایز مطرح شده که بیان می‌کند هر کمبودی که رشد را بیش از فتوسنتز محدود کند، تولید و تجمع متابولیت‌های ثانویه را در گیاهان افزایش می‌دهد (Parsa *et al*., 2019). در این مطالعه تنش خشکی و کاربرد اسید سالیسیلیک به طور معنی‌داری باعث افزایش محتوا و عملکرد اسانس سیاه‌دانه شد. به نظر می‌رسد آبیاری در هر دو ظرفیت زراعی پایین منجر به دستیابی به بالاترین میزان درصد اسانس شد. Abbaszadeh و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند که در شرایط تنش، تراکم بیشتری از غدد اسانس به دلیل انقباض سطح برگ مشاهده شد که منجر به افزایش تجمع اسانس در واحد سطح گردید که با نتایج بدست آمده در این مورد مطابقت دارد.

همچنین نتایج این بخش نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک باعث افزایش درصد اسانس شده است. این موضوع در مورد ترکیب اسید سالیسیلیک با سایر سطوح تنش خشکی صدق می‌کند. سازوکارهای بالقوه‌ای که نقش اساسی در تحمل خشکی ناشی از اسید سالیسیلیک دارند شامل برهم‌کنش بین اسید سالیسیلیک و اسمولیت‌ها، برهم‌کنش بین اسید سالیسیلیک و عناصر غذایی، دخالت اسید سالیسیلیک در پیام‌رسانی ROS و تنظیم آنتی‌اکسیدان‌ها، تعامل بین اسید سالیسیلیک و متابولیت‌های ثانویه اصلی و تعامل بین اسید سالیسیلیک و سایر هورمون‌هاست (Khan *et al*., 2015). توجه داشته باشید که نقش واقعی اسید سالیسیلیک در تنش‌ها هنوز به وضوح شناسایی نشده است، به‌همین دلیل تحقیقات بیشتری را ایجاب می‌کند.

نتایج Ramroudi و همکاران (۲۰۱۱) حکایت از آن

داشت که بیشترین شاخص برداشت از رژیم آبیاری کامل و کمترین آن از رژیم قطع یک نوبت آبیاری قبل از گلدهی بدست آمد. این موضوع ممکن است به این دلیل باشد که هر چند در اثر محدودیت آبی عملکرد بیولوژیک و دانه هر دو کاهش می‌یابد، اما کاهش عملکرد بیولوژیک در شرایط کم آبیاری کمتر از کاهش عملکرد دانه بود. کاهش ۱۱/۵ درصدی عملکرد بیولوژیک در مقایسه با کاهش ۱۴/۵۸ درصدی عملکرد دانه تحت تأثیر تیمار قطع یک نوبت آبیاری قبل از گلدهی نیز مؤید این مطلب است. Patra و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که با کاهش تعداد آبیاری بدلیل اُفت شدید عملکرد دانه، شاخص برداشت کاهش پیدا کرد.

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی باید گفت نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که اثر تیمارهای تنش خشکی بر تمام خصوصیات اندازه‌گیری شده بر روی گیاه سیاه‌دانه معنی‌دار بود. همچنین اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بجز تعداد کپسول بارور و تعداد دانه در کپسول، بر روی دیگر صفات دارای تأثیر معنی‌داری بود. از سوی دیگر، اثرهای متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک یک میلی‌مولار بر شاخص‌های ارتفاع بوته و وزن خشک تک بوته، وزن هزاردانه، زیست‌توده، درصد روغن، عملکرد روغن، اسانس و شاخص برداشت معنی‌دار بود. بیشترین میزان این شاخص‌ها در آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک یک میلی‌مولار بدست آمد. همانطور که این نتایج نشان می‌دهد تنش خشکی تأثیر کاهشی بر روی خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه سیاه‌دانه دارد. از سوی دیگر، استفاده از محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک باعث افزایش خصوصیات رشدی و عملکردی گیاه سیاه‌دانه شد و اثرهای منفی تنش خشکی را تعدیل کردند که این نتایج بیانگر تأثیر سودمند کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی است و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد در تولید محصولات کشاورزی در شرایط تنش‌های محیطی به‌ویژه در شرایط تنش خشکی باشد.

References

- Abbaszadeh, B., Layeghhaghighi, M., Azimi, R. and Hadi, N., 2020. Improving water use efficiency through drought stress and using salicylic acid for proper production of *Rosmarinus officinalis* L. Industrial Crops & Products. 144: 111893.
- Abdelaal, K.A.A., 2015. Effect of Salicylic acid and Abscisic acid on morpho-physiological and anatomical characters of faba bean plants (*Vicia faba* L.) under drought stress. Journal of Plant Production, Mansoura Univercity, 6: 1771-1788.
- Alizadeh, B., Ghahrani, Z., Barzegar, T. and Nikbakht, C., 2017. The effect of putresin foliar application on the growth, yield and fruit quality of sweet pepper under water stress. Agricultural agriculture, 19(2): 431-444.
- AOAC. 2002. Official method of analysis of AOAC international, 17th edition, Maryland.
- Aqlamand, S., Ismailpour, B., Jalil Vand, P., Heydari, H.R. and Tavakoli Hasanklou, N., 2017. The effect of salicylic acid and paclobutrazol on the growth and physiological traits of basil under water stress conditions. Journal of plant process and function, 6(19): 35-46.
- Arfan, M., Athar, H.R. and Ashraf, M., 2007. Does exogenous application of salicylic acid through the rooting medium modulate growth and photosynthetic capacity in two differently adapted spring wheat cultivars under salt stress. Journal of Plant Physiology, 164: 685-694.
- Balint, Z., Mutua, F., Muchiri, P. and Omuto, C.T., 2013. Monitoring drought with the combined drought index in Kenya. Developments in Earth Surface Processes, 16: 341-356.
- Bannayan, M., Nadjafi, F., Azizi, M., Tabrizi L. and Rastgoo, M., 2008. Yield and seed quality of *Plantago ovata* and *Nigella sativa* under different irrigation treatments. Industrial crops and products, 27: 11-16.
- Beigzadeh, S., Fatahi, K., Sayedi, A. and Fatahi, F., 2013. Study of the effects of late-season drought stress on yield and yield components of irrigated barley lines within Kermanshah Province Temperate Regions. World Applied Programming, 3(6): 226-231.
- Bhat, M.A., Kumar, V., Ahmad Bhat, M., Ahmad Wani, I., Latief Dar, F., Farooq, I., Bhatti, F., Koser, R., Rahman, S. and Tasleem Jan, A., 2020. Mechanistic insights of the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) with plant roots toward enhancing plant productivity by alleviating salinity stress. Frontiers Microbiology, 11: 1952.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H.-L., Waskom,

Research journal of environmental science, 3(2): 239-244.
- Khan, M.I.R., Fatma, M., Per, T.S., Anjum, N.A. and Khan, N.A., 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. Frontiers in Plant Science, 6: 1-17.
- Kochaki, A., Mokhtari, V., Taherabadi, Sh. and Kalantari, S., 2011. Evaluation of yield, yield components and quality characteristics of *plantago ovate* and psyllium under moisture stress conditions. Water and Soil Journal, 25(3): 656-664.
- Li, Q.T., Lu, X., Song, Q.X., Chen, H.W., Wei, W., Tao, J.J. and Bi, Y.D., 2017. Selection for a zinc - finger protein contributes to seed oil increase during soybean domestication. Plant Physiology, 173: 2208-2224.
- Li, R., Baum, M., Grando, M. and Ceccarelli, S., 2008. Evaluation of Chlorophyll Content and Fluorescence Parameters as Indicators of Drought Tolerance in Barley. Agriculture Science in China, 5: 751-757.
- Liu, E.K., Mei, X.R., Yan, C.R., Gong, D.Z. and Zhang, Y.Q., 2016. Effects of water stress on photosynthetic brassinosteroid in response to stress: a review. Biological Research, 51: 46.
- Maleki, A., Fazel, S., Naseri, R., Rezaei, K. and Heydari, M., 2014. The effect of potassium and zinc sulfate application on grain yield of maize under drought stress conditions. Advances in Environmental Biology, 8(4): 890-893.
- Manoelian, J., Weisany, W., Jabari, H. and Diyanat, M., 2022. Zinc foliar application on alleviating effects of irrigation cut-off in grain filling stage of safflower genotypes (*Carthamus tinctorius* L.). Journal of Water and Soil Resources Conservation, 11(3): 111-125.
- Mardanlou, A., 2016. Investigation of drought tolerance in different genotypes of black seed (*Nigella sativa* L.). Master's thesis in the field of agriculture, plant breeding. Yasouj University, 56p.
- Mehdinejad, N. and Shahi, H., 2018. Investigating the effect of drought stress on the growth and physiological characteristics of wild and cultivated wheat species. Scientific Journal of Agriculture and Plant Breeding of Iran, 15(5): 63-83.
- Mohammadi Babazidi, H., Falknaz, M., Heydari, P., Hemti, M. and Farkhian, Sh., 2013. The effect of Azospirillium bacteria and salicylic acid on the physiological and morphological traits of basil under water stress. New Journal of Cell-Molecular Biotechnology, 3: 31-36.
- Movahhedi-Dehnavi, M., Behzadi, Y., Niknam, N. and Mohtashami, R., 2019. Salicylic acid mitigates the effects of drought and salinity on nutrient and dry matter accumulation of Linseed. Journal of Plant R.M., Niu, Y. and Siddique, K.H., 2016. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. Agronomy for Sustainable Development, 36: 3.
- Darabi, F., Abbasi, N. and Zare, M.J., 2021. Evaluation of morphophysiological traits of basil (*Ocimum basilicum* L.). In response to foliar application of putricin and 24-epibrassinolide under water stress. Iranian Medicinal and Aromatic Plants Research Journal, 37(2): 329-349.
- Delavari Parizi, M., Baghizadeh, A., Enteshari, Sh. and Manochehri Kalantari, Kh., 2012. Studying the effect of salicylic acid on resistance and induction of oxidative stress in green basil plant (*Ocimum basilicum* L.) under salt stress. Plant biology of Iran. 4(12): 25-36.
- Diallo, A.T., Samb, P.I. and RoyMacauley, H., 2001. Water status and stomatal benavioxr of cowpea, *Vigna unguiclata* (L.) Walp, plauts inoculated with two Glomus species at low soil moisture levels. Europian Journal of Soil Biology, 37: 187-196.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. and Basra, S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development, 29: 185-212.
- Farsarai, S. and Moghadam, M., 2019. The effect of mycorrhizal fungi and putrescine foliar application on biochemical traits and shoot biomass of green basil (*Ocimum ciliatum* L.) in two different harvest times. Journal of Plant Environmental Physiology, 14(53): 47-58.
- Ghafari, H. and Tadayon, M.R., 2018. The effect of jasmonic acid foliar application on the efficiency of light use and dry matter accumulation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under water deficit conditions. Plant products (Scientific journal of agriculture), 41(4): 111-124.
- Gharib, F.A.L., 2006. Effect of salicylic acid on the growth, metabolic activites and oil content of basil and majoram. International Journal of Agriculture and Biology, 4: 485-492.
- Grown, B.A., 2012. Physiological role of salicylic acid in improving performance, yield and some biochemical aspects of sunflower plant grown under newly reclaimed sandy soil. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6: 82-89.
- Hara, M., Furukawa, J., Sato, A., Mizoguchi, T. and Miura, K., 2012. Abiotic stress and role of salicylic acid in plants: abiotic stress responses in plants. In: Parvaiza, A., Prasad, M.N.V (eds) New York, NY: Springer, pp. 235-251.
- Hassanzadeh, M. and Ebadi, A., 2009. Investigation of water stress on yield and yield components of Sesame (*Sesame Indicum* L.) in moghan region.

medicinal plant (*Nigella sativa* L.) in different plant densities under low irrigation conditions. Journal of Agricultural Research of Iran, 10(2): 382-391.
- Rondanini, D., Savin, R. and Hall, A.J., 2003. Dynamics of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief intervals of high temperature during grain filling. Field Crops Research, 83: 79-90.
- Roumani, A., Biabani, A., Karizaki, A.R., Alamdari, E.G. and Gholizadeh, A., 2019. Effects of salicylic acid and spermine foliar application on some morphological and physiological characteristics of isabgol (*Plantago ovata* Forsk.) under water stress. Agronomy Research, 17(4): 1735-1749.
- Sadeghian Dehkordi, S.A. and Tadayon, A., 2016. The reaction of linseed (*Linum usitatissimum* L.) to biological, chemical, nitrogen and phosphorus fertilizers under drought stress conditions. Scientific-research journal of plant ecophysiology, 8(27): 72-89.
- Samsam Shariat, S., 2007. Extraction, Identification and Analysis of Active Components of Medical Herbs. Iran, Mani Publication, 266p.
- Satish, L., Rency, A.C. and Ramesh, M., 2018, Spermidine sprays alleviate the water deficit-induced oxidative stress in finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertn.) plants. Biotechnology, 8: 63.
- Sharafizad, M., Naderi, A., Siadat, S.A., Sakinejad, T. and Lak, S., 2013. Effect of drought stress and salicylic acid treatment on grain yield, process of grain growth, and some of chemical and morphological traits of Chamran cultivar wheat (*Triticum aestivum*). Advanced Environmental Biology, 7(11): 3234-3240.
- Shekofteh, H., Shahrokhi, H. and Solimani, E., 2015. Effect of drought stress and salicylic acid on yield and mucilage content of the medicinal herb *Plantago ovata* Forssk. Desert, 20(2): 245-252.
- Shoghian, M. and Rozbahani, A., 2017. Effect of salicylic acid foliar application on morphophysiological traits, yield and yield components of red bean under drought stress conditions. Scientific Journal of Plant Physiology, 9(34): 131-147.
- Singla, J. and Krattinger, S.G., 2016. Biotic stress resistance genes in wheat. In: Wrigley, C., Corke, H., Seetharaman, K., Faubion, J. (Eds.), Encyclopedia of Food Grains. Oxford Elsevier, 2: 388-392.
- Szepesi, ´A., Csisz´ar, J., G´emes, K., Horv´ath, E., Horv´ath, F., Simon, M.L. and Tari, I., 2009. Salicylic acid improves acclimation to salt stress by stimulating abscisic aldehyde oxidase activity and abscisic acid accumulation, and increases Na+ Process and Function, 8(31): 31-43.
- Nayyar, H., Satwinder, K.A.U.R., Kumar, S., Singh, K.J. and Dhir, K., 2005. Involvement of polyamines in the contrasting sensitivity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) to water deficit stress. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 46: 333-338.
- Nehbandani, A.R., Soltani, A. and Darvishi Rad, P., 2014. The effect of drought stress at the end of the season on water consumption, growth and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant ecophysiology, 7(23): 18-27.
- Noah Peseh, b. and Manouchehri Kalantari, K., 2018. Effects of mutual application of spermidine and salinity stress in pepper plant. Iranian Journal of Biology, 24(6): 848-857.
- Parsa, M., Kamaei, R. and Yousefi, B., 2019. Effects of different biofertilizers on elements, essential oil and yield of Peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress conditions. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 35(5): 860-875.
- Pasandi, M., Janmohammadi, M., Abasi, A. and Sabaghnia, N., 2018. Oil characteristics of safflower seeds under different nutrient and moisture management. Nova Biotechnologica et Chimica, 17(1): 86-94.
- Patra, D.D., Anwar, M., Singh, S., Prasad, A. and Singh, D.V., 2009. Aromatic and medicinal plants for salt and moisture stress conditions. Recent advances in management of arid ecosystem. Proceeding of a Symposium Held in India, 26-28 March: 347-350.
- Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y. and Sepaskhah, A.R., 2015. Improving barley performance by proper foliar applied salicylic-acid under saline conditions. International Journal of Plant Production, 9: 467-486.
- Rahmani, F., Saifzadeh, S., Jabari, H., Voladabadi, A.R. and Hadidi Masuleh, A., 2020. Effect of drought stress and zinc foliar application on some physiological and agronomic traits of safflower cultivars. Scientific Journal of Plant Physiology, 12(47): 27-43.
- Ramroudi, M., Kikhajaleh, M., Galavi, M., Tagh al-Islami, M.J. and brothers, R., 2011. The effect of micronutrients solution spraying and irrigation regimes on the quantitative and qualitative performance of the medicinal plant saffron (*Plantago ovata* Forsk). Journal of Agricultural Ecology, 3(2): 219-226.
- Rezvan Bidakhti, S., Sanjani, S., Dashtban, A. and Hossam Arefi, A., 2012. Evaluation of performance and performance components of black seed

content in leaves without toxicity symptoms in Solanum lycopersicum L. Journal of Plant Physiology. 166: 914-925.
- Talaat, I.M. and Balbaa, L.K., 2010. Physiological response of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) to putrescine and trans-cinnamic acid. American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Science, 8(40): 438-445.
- Talaat, I.M., Bekheta, M.A. and Mahgoub, M.H., 2005. Physiological response of periwinkle plants (*Catharanthus roseus* L.) to tryptophan and putrescine. International Journal of Agricultural and Biological, 7: 210-213.
- Tao, Q., Lv, Y., Mo, Q., Bai, M., Han, Y. and Wang, Y., 2018. Impacts of priming on seed germination and seedling emergence of Cleistogenes songorica under drought stress. Seed Science and Technology, 46(2): 239-258.
- Wang, C., Linderholm, H., Song, S., Wang, F., Liu, Y., Tian, J., Xu, J., Song, Y. and Ren, G., 2020. Impacts of Drought on Maize and Soybean Production in Northeast China During the Past Five Decades. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17: 1-10.
- Zheng, M.M., Tao, Y., Hussain, S., Jiang, Q.W., Peng, S.B., Huang, J.L., Cui, K.H. and Nie, L.X., 2016. Seed priming in dry direct-seeded rice: consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress. Plant Growth Regulation, 78: 167-178.

Effects of drought stress, salicylic acid, and polyamines on plant growth yield and oil and essential oil content of *Nigella sativa* L.

M. Edalateyan Kharazi[1] and A. Asgharzadeh[2*]

1- M.Sc. student of Horticultural Science and Engineering, Islamic Azad University, Shirvan branch, Iran
2*- Corresponding author, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Shirvan branch, Iran, E-mail: asg.ahmad@yahoo.com

Received: September 2022 Revised: January 2022 Accepted: February 2023

Abstract

To investigate the effects of drought stress, salicylic acid, and polyamines on plant growth yield and oil and seeds essential oil content in *Nigella sativa* L., a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in the research greenhouse of Shirvan Azad University in 2020-21 cropping year. The experimental treatments included drought stress at four levels (25, 50, 75, and 100% of field capacity) as the first factor and foliar application of salicylic acid, putrescine, and spermidine each at two levels (0.5 and 1 mM) as the second factor. The results showed that the highest number of fertile capsules per plant (12.66), number of seeds per capsule (96.24), and harvest index (58.69%) were obtained in the 100% of field capacity treatment. Also, the highest seed yield per pot was obtained in the 100% of field capacity treatment (16.05 g) and 1 mM salicylic acid (11.46 g). On the other hand, the highest plant height (62.5 cm), dry weight of single plant (6.44 g), biomass in pot (32.2 g), oil content (31.21%), and oil yield (5.71 g.pot^{-1}) were obtained in the treatment of 100% of field capacity + 1 mM salicylic acid and also, the highest essential oil content (0.09%) was obtained in the treatment of 25% of field capacity + 1 mM salicylic acid. Overall, the results showed that full irrigation (100% of field capacity) + 1 mM salicylic acid foliar application was the best treatment for *N. sativa* under greenhouse conditions. In general, the plant growth characteristics decreased with increasing stress severity, but the negative effects of drought stress were moderated with increasing the salicylic acid foliar application.

Keywords: Drought stress, salicylic acid, essential oil percentage, oil yield, harvest index.