تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد پانزدهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۱

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.3536.1872

مقاله پژوهشی

مقایسه پاسخ سه گونه کنجد، خرفه و شاهدانه در مراحل مختلف رشد به تنش کم‌آبی

مشیرالحق عابدی[۱]، محمدجواد ثقه‌الاسلامی[۲*]، سید غلامرضا موسوی[۲]، رضا برادران[۲]

۱. دانشجوی دکتری زراعت، گروه کشاورزی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند

۲. دانشیار زراعت، مرکز تحقیقات کشاورزی، گیاهان دارویی و علوم دامی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پرایمینگ بذر
درصد جوانه‌زنی
سیلیکات سدیم
شاخص بنیه گیاهچه
کلروفیل

تاریخ دریافت:
۱۳۹۹/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹/۰۵/۲۲

تاریخ انتشار:
بهار ۱۴۰۱

۹۲-۷۹ :(۱)۱۵

چکیده

این آزمایش با هدف بررسی مقایسه پاسخ سه گونه کنجد، خرفه و شاهدانه در مراحل مختلف رشد به کم‌آبی، در دو قسمت جوانه‌زنی و مزرعه‌ای انجام شد. آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت اسپلیت‌پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ در شهرستان سربیشه انجام شد. سطوح آبیاری بر اساس پتانسیل تبخیر و تعرق در سه سطح ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد به‌عنوان کرت‌های اصلی و سه گونه گیاهی کنجد، خرفه و شاهدانه در کرت‌های فرعی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش جوانه‌زنی به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی (در چهار سطح صفر، ۳-، ۶- و ۹- بار) و سیلیکات سدیم (در سه سطح صفر، ۱/۵ و ۳ میلی‌مولار) بر شاخص‌های جوانه‌زنی این سه گیاه انجام شد. صفات مهم اندازه‌گیری شده در آزمایش جوانه‌زنی درصد و سرعت جوانه‌زنی و میزان کلروفیل و پرولین گیاهچه و در آزمایش مزرعه‌ای عملکرد دانه و بیولوژیک، ارتفاع بوته، شاخص برداشت و همچنین میزان کلروفیل و پرولین برگ بود. بیشترین درصد جوانه‌زنی در پرایمینگ بذر با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم در گیاه خرفه بود. پرایمینگ بذور با سیلیکات سدیم در سطح ۱/۵ میلی‌مولار در سطوح خشکی باعث افزایش میانگین شاخص وزنی بنیه گیاهچه گردید. میزان کاهش عملکرد دانه بر اثر کم‌آبیاری (تیمار ۴۰ درصد) در سال اول در گیاهان کنجد، شاهدانه و خرفه به ترتیب ۱۸/۲، ۲۹/۲ و ۲۳/۳ درصد بود و این مقادیر برای سال دوم ۱۶/۳، ۲۷/۳ و ۲۵/۰ درصد محاسبه شد. در بین گیاهان مورد آزمایش، خرفه دارای بیشترین محتوی کلروفیل کل در مقایسه با کنجد و شاهدانه بود. به‌طورکلی اگرچه خرفه بیشترین عملکرد دانه را داشت، اما میزان کاهش عملکرد دانه تحت شرایط کم‌آبیاری در کنجد کمترین و در شاهدانه بیشترین مقدار بود. درمجموع، نتایج آزمایش جوانه‌زنی و مزرعه‌ای نشان داد خرفه با توجه به ویژگی‌های مورفو-فیزیولوژیکی، به کم‌آبی متحمل‌تر بود.

مقدمه

یکی از تنش‌های محیطی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنش کم‌آبی و خشکی است. از راهکارهای مهم مقابله با تنش خشکی، کاشت گیاهان بومی مقاوم به خشکی است. با توجه به اینکه از سالیان بسیار دور، در مقاطع مختلف زمانی منطقه شرق و جنوب شرق ایران دوره‌های خشک‌سالی متعددی را تجربه کرده است، کشاورزان جهت سازگاری از گیاهان متحمل به خشکی در تناوب‌های زراعی استفاده می‌کرده‌اند. کنجد، شاهدانه و خرفه ازجمله گیاهانی هستند که سابقه کاشت در استان خراسان جنوبی را داشته و در حال حاضر سطح زیر کشت ناچیزی دارند.

کنجد (*Sesamum indicum* L.) متعلق به خانواده Pedaliaceae بوده و به‌عنوان ملکه دانه‌های روغنی محسوب می‌شود. این گیاه به دلیل تحمل خشکی و گرما اهمیت بسیار زیادی در توسعه کشاورزی پایدار مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد (Moghanibashi Najafabadi et al., 2019). شاهدانه (*Cannabis sativa* L.) گیاهی دوپایه و یک‌ساله از خانواده Cannabinaceae است که بر اساس گزارش‌های

* نگارنده پاسخگو: محمد جواد ثقه الاسلامی. پست الکترونیک: mjseghat@iaubir.ac.ir

مختلف مقاوم به خشکی نیز است (Dadkhah, 2010). شاهدانه یک کارخانه واقعی تولیدکننده متابولیت‌های ثانویه است. آلکان‌ها، ترکیبات نیتروژن‌دار (آمین‌ها، نمک‌های آمونیوم، آلکالوئیدهای مشتق شده از اسپرمیدین) فلاونوئیدها، اسپیرواینداندان فنولیک‌ها و دی هیدرواستیلبن‌ها در گیاه شناسایی شده است (Makizadeh Tafti et al., 2012). خرفه (*Portulaca oleracea* L.) گیاه دارویی ارزشمند از تیره Portulacaceae یک‌ساله، بومی ایران و چهارکربنه با ساقه‌ای گوشتدار و برگ‌های متقابل و گل‌های کوچک زردرنگ است. خرفه اگرچه در حال حاضر به‌عنوان یک علف هرز مطرح است ولی با توجه به اهمیت دارویی فوق‌العاده‌ای که دارد اخیراً از جنبه زراعی موردتوجه قرار گرفته است (Rahimi and Kafi, 2010).

اگرچه گیاهان ذکرشده فوق در آزمایش‌های مختلف نشان داده‌اند از سازگاری نسبی خوبی به خشکی برخوردارند، اما درهرحال، تنش خشکی می‌تواند سبب کاهش عملکرد آن‌ها می‌شود. در این زمینه درگاهی و همکاران (Dargahi et al., 2014) در کنجد نشان داد بر اثر اعمال تنش کم‌آبی عملکرد دانه و بیولوژیک نسبت به آبیاری کامل به ترتیب حدود ۲۶ و ۵۰ درصد کاهش یافت. به‌طورکلی درک مکانیسم‌ها و تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌تواند کمک قابل‌توجهی به برنامه‌ریزی برای افزایش مقاومت به خشکی آن‌ها داشته باشد. در آزمایشی روی گاوزبان (Borago officinalis L.) تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل a، b و کل و کاروتنوئید شد (Gholinejad et al., 2014). کاهش میزان کلروفیل می‌تواند به‌واسطه کاهش سنتز کمپلکس پروتئین محافظت‌کننده دستگاه فتوسنتزی و صدمه اکسیداتیو لیپیدها، رنگ‌دانه و پروتئین‌های کلروپلاست به همراه افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز در شرایط تنش خشکی باشد (Din et al., 2011).

پاسخ گیاهان به تنش خشکی بستگی به نوع، شدت و مدت تنش و هم‌چنین گونه گیاهی و مرحله وقوع تنش دارد. برخی گیاهان از سازگاری نسبی خوبی به خشکی در حین رشد برخوردارند، اما در مرحله جوانه‌زنی ممکن است به خشکی حساس بوده و این امر سبب استقرار ضعیف آن‌ها در مزرعه و درنهایت کاهش عملکرد خواهد شد (Gerami et al., 2016). یک رهیافت پایدار برای بهبود جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی استفاده از ترکیبات خارجی است که در دسترس باشند. سیلیکون (Si) دومین عنصر فراوان پوسته زمین است که نشان داده‌شده در بهبود تحمل خشکی در برخی گیاهان تک‌لپه مؤثر است. نتایج آزمایش گانگ و همکاران (Gong et al., 2005) روی گندم تحت تنش خشکی نشان داد کاربرد Si باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های ضداکسنده می‌گردد. همچنین تنش خشکی منجر به افزایش H_2O_2 گردید، درحالی‌که کاربرد Si میزان H_2O_2، فعالیت اسید فسفولیپاز و خسارات ناشی از تنش اکسیدکننده را کاهش داد. از سوی دیگر پرایمینگ بذر با سیلیکون نیز به‌عنوان یکی از روش‌های بهبود تحمل خشکی در گیاهان معرفی‌شده است (Ahmed et al., 2016).

با توجه به مسائل فوق، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سیلیکون بر برخی مؤلفه‌های جوانه‌زنی بذر کنجد، شاهدانه و خرفه تحت شرایط تنش خشکی و همچنین بررسی تأثیر سطوح آبیاری بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این سه گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو بخش به‌صورت آزمایش مزرعه‌ای و جوانه‌زنی انجام شد.

آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای در مزرعه‌ای شخصی واقع در روستای مود از توابع شهرستان سربیشه، استان خراسان جنوبی در طی دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ و ۱۳۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. این منطقه دارای آب‌وهوای گرم و نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالیانه ۲۲۸ میلی‌متر است. آزمایش به‌صورت اسپلیت‌پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. سطوح آبیاری بر اساس پتانسیل تبخیر و تعرق در سه سطح ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد در کرت‌های اصلی و سه گونه گیاهی کنجد، خرفه و شاهدانه در کرت‌های فرعی مورد آزمایش قرار گرفتند. سیستم آبیاری به‌صورت قطره‌ای بود. پتانسیل تبخیر و تعرق با استفاده از تشتک تبخیر کلاس A به‌صورت حاصل‌ضرب میزان تبخیر از تشتک (میلی‌متر در روز) در ضریب تشتک محاسبه شد. مقدار ضریب تشتک بستگی به رطوبت نسبی، سرعت باد و شرایط محیطی محل اجرای آزمایش دارد که در این آزمایش، ۰/۷۵ در نظر گرفته شد (Ebrahimian et al., 2019).

قبل از کاشت، عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم و دیسک و تسطیح انجام شد. هر کرت فرعی شامل شش خط

کاشت پنج‌متری با فاصله ۵۰ سانتی‌متر بود. کودهای مصرفی (بر اساس آزمون خاک) شامل ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار، ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار و ۵۰ کیلوگرم گوگرد گرانوله به زمین اضافه شد. بذرهای کنجد، شاهدانه و خرفه به‌صورت دستی در تاریخ ۱۴ خرداد ۱۳۹۶ و ۱۷ خرداد ۱۳۹۷ با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از هم کاشته شدند. اکو تیپ‌های داراب ۱، سقز (تیپ دارویی) و اصفهان به ترتیب برای کنجد، شاهدانه و خرفه از موسسه تحقیقات نهال و بذر کرج تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. یک‌سوم کود نیتروژن (۵۰ کیلوگرم در هکتار) در هنگام کاشت استفاده شد و نیتروژن باقیمانده (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) در مراحل رویشی و گلدهی اولیه استفاده شد. کنترل علف‌های هرز در طول دوره رشد به‌صورت دستی صورت گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی، تعداد هفت عدد برگ از هر کرت آزمایشی به‌صورت تصادفی در مرحله گلدهی برداشت و در نیتروژن مایع قرار داده شد و برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به فریزر ۸۰- درجه سلسیوس انتقال داده شد. میزان کلروفیل کل به روش لیچنتالر (Lichenthaler, 1983) و پرولین به روش بیتز و همکاران (Bates et al., 1973) اندازه‌گیری شد. پس از رسیدن گیاهان، به‌منظور تعیین عملکرد در پایان دو سال زراعی نمونه‌گیری با رعایت اثرات حاشیه‌ای (از هر کرت ۱۰ بوته) انجام و ارتفاع بوته، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت اندازه‌گیری و محاسبه شد. عمل برداشت در سال اول و دوم به ترتیب برای کنجد ۵ و ۶ آبان، برای خرفه ۲۰ و ۲۵ شهریور و برای شاهدانه ۱۵ و ۱۸ آبان انجام شد.

آزمایش جوانه‌زنی

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی (در چهار سطح صفر، ۳-، ۶- و ۹- بار) و سیلیکات سدیم (در سه سطح صفر، ۱/۵ و ۳ میلی‌مولار) انجام شد. اکوتیپ‌های داراب ۱، سقز (تیپ دارویی) و اصفهان به ترتیب برای کنجد، شاهدانه و خرفه از موسسه تحقیقات نهال و بذر کرج تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. بذور با اتانول ۷۰ درصد برای یک دقیقه و محلول هیپوکلریت سدیم ۲۰ درصد برای ۱۵ دقیقه ضدعفونی و سپس ۳ بار با آب مقطر استریل شست‌وشو شد. هر واحد آزمایشی (پتری دیش به قطر ۱۰ سانتیمتر) حاوی ۵۰ عدد بذر از گونه مربوطه بود. بذور روی کاغذ وات من قرار داده شد. در تیمارهای سیلیکات سدیم، پرایمینگ بذور با استفاده از نتایج آزمایش‌های اولیه به مدت ۱۶ ساعت برای خرفه و ۲۴ ساعت برای شاهدانه و کنجد در شرایط تاریکی در نظر گرفته شد. پس‌ازآن به هر پتری دیش ۹ میلی‌لیتر آب مقطر (برای شاهد) و یا محلول پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ (Merk Millipore, Germany) اضافه گردید (Michel and Kaufmann, 1973). مقدار پلی‌اتیلن گلیکول اضافه‌شده برای تیمارهای ۳-، ۶- و ۹- بار به ترتیب ۱۵۱/۴، ۲۲۳/۶ و ۲۷۹/۲ گرم در لیتر از PEG6000 بود. پس از اعمال تیمارهای مربوطه پتری دیش‌ها در داخل ژرمیناتور (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷۵ درصد و دوره روشنایی ۱۶ ساعت) قرار گرفت (Aghighi Shahverdi et al., 2018). به‌منظور کاهش میزان تبخیر، درب پتری‌ها به‌وسیله پارافیلم بسته شد.

تعداد بذور جوانه‌زده به‌صورت روزانه شمارش و در آخر دوره آزمایش (۱۲ روز)، صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی و شاخص وزنی بنیه گیاهچه با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید (Silva and Matos, 2016).

$$GP\ (Germination\ percentage) = (N\times 100)/M \quad [۱]$$

$$GR\ (Germination\ rate) = \sum Ni\ /Ti \quad [۲]$$

$$SVI\ (Seedling\ vigor\ index) = GP\times Mean\ SDW \quad [۳]$$

N: مجموع بذرهای جوانه‌زده در انتهای دوره، M: تعداد کل بذرهای کشت‌شده (۵۰ عدد)، Ti: تعداد روزهای بعد از کشت، SDW: وزن خشک گیاهچه.

تعیین میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوی پرولین به روش‌های ارائه‌شده در بخش آزمایش مزرعه‌ای انجام شد (Lichenthaler, 1983; Bates et al., 1973)؛ با این تفاوت که در این بخش از گیاهچه به‌جای نمونه برگ استفاده گردید. برای آزمایش مزرعه‌ای تجزیه مرکب و آزمون بارتلت انجام شد. در مورد داده‌های آزمایش جوانه‌زنی که به‌صورت درصد بودند از تبدیل زاویه‌ای استفاده شد (Janalizadeh Ghazvini et al., 2017). از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۱، برای آنالیز داده‌ها استفاده شد و مقایسات میانگین با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

آزمایش جوانه‌زنی

نتایج نشان داد که اثر گونه گیاهی، خشکی، سیلیکات سدیم و اثرات متقابل گونه در خشکی و گونه در سیلیکات سدیم بر درصد جوانه‌زنی معنی‌دار بودند (جدول ۱).

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در گونه گیاهی نشان داد، بیشترین درصد جوانه‌زنی مربوط به سطوح تنش خشکی صفر و ۳- بار در گیاه خرفه بود. از طرف دیگر، کمترین درصد جوانه‌زنی در بالاترین سطح تنش خشکی (۹- بار) در گیاه شاهدانه به دست آمد (شکل ۱، چپ). میزان کاهش درصد جوانه‌زنی در بذرهای کنجد، شاهدانه و خرفه تحت شرایط تنش خشکی شدید نسبت به شاهد به ترتیب ۲۵/۲۳، ۲۰/۷۴ و ۳۶/۸۲ درصد بود. همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل گونه گیاهی در سیلیکات سدیم نشان داد، بیشترین میانگین این صفت در تیمار پرایمینگ بذر با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم در گیاه خرفه بود که افزایش ۱۶/۳۳ درصدی در مقایسه با شاهد داشت. کمترین میانگین نیز در پرایمینگ بذر با غلظت ۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم در شاهدانه مشاهده شد (شکل ۱، راست).

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر گونه گیاهی، خشکی، سیلیکات سدیم و اثرات متقابل گونه در خشکی و گونه در سیلیکات سدیم بر سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار بودند (جدول ۱). بیشترین سرعت جوانه‌زنی در سطوح خشکی صفر و ۳- بار مشاهده شد. کمترین میانگین سرعت جوانه‌زنی نیز در گیاه شاهدانه در سطح خشکی ۹-بار بود (شکل ۲، راست). میزان کاهش سرعت جوانه‌زنی در بذرهای کنجد، شاهدانه و خرفه تحت شرایط تنش خشکی شدید نسبت به شاهد به ترتیب ۴۰/۳۱، ۲۱/۸۲ و ۵۳/۳۴ درصد بود. در مقایسه میانگین اثر سیلیکات سدیم در گونه گیاهی، بیشترین سرعت جوانه‌زنی در پرایمینگ با ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم در گیاه خرفه بود و کمترین سرعت جوانه‌زنی در گیاه شاهدانه تحت شرایط عدم پرایمینگ و پرایمینگ با غلظت ۳ میلی-مولار سیلیکات سدیم مشاهده شد (شکل ۲، راست). تنش خشکی شدید (۹- بار) به‌طور معنی‌داری میانگین شاخص وزنی بنیه گیاهچه را ۳۴/۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد.

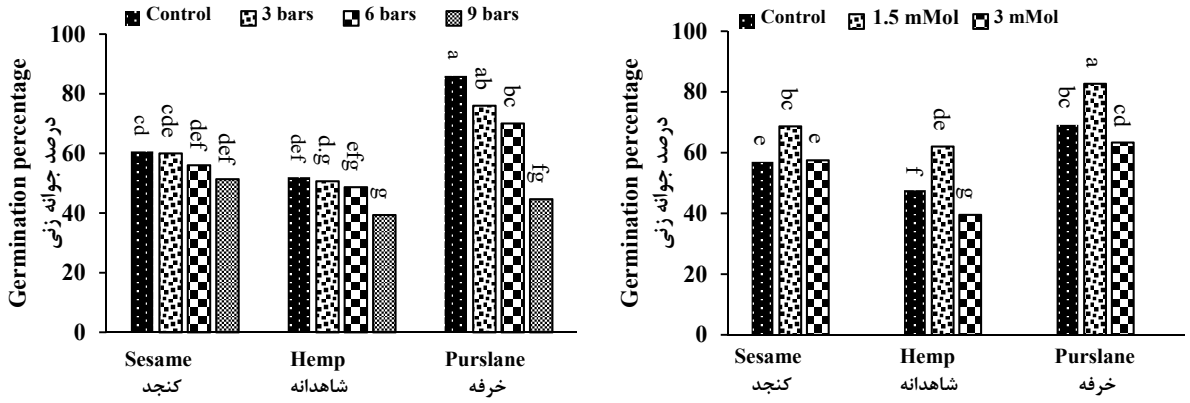
جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی گیاهچه‌های کنجد، شاهدانه و خرفه تحت تأثیر پرایمینگ با سیلیکات سدیم و تنش خشکی

Table 1. Analysis of variance (Mean of square) for the effect of seeds priming with sodium silicate and drought stress on germination indices and seedling physiological traits of sesame, hemp and purslane

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling vigor index (weight)	کلروفیل کل Total chlorophyll	پرولین Proline
گونه Plant species (C)	2	4377.3**	2087.6**	184421719.9**	1728.3**	6.24**
خشکی Drought (D)	3	2177.4**	379.3**	5536999.3**	498.0**	0.10**
سیلیکات سدیم Sodium silicate (S)	2	3034.3**	191.1**	7258986.9**	29.7*	0.0002^{ns}
C × D	6	210.4**	110.4**	687309.1^{ns}	70.0**	0.32**
C × S	4	112.3*	7.44*	6609461.2**	14.9^{ns}	0.01^{ns}
D × S	6	49.9^{ns}	3.18^{ns}	1363788.9*	139.4**	0.04**
C × D × S	12	59.9^{ns}	3.08^{ns}	573099.4^{ns}	3.52**	0.02**
خطا Error	72	48.3	2.81	622565.1	6.84	0.005
CV (%)	-	*11.43*	*11.26*	*22.78*	*8.27*	*16.7*

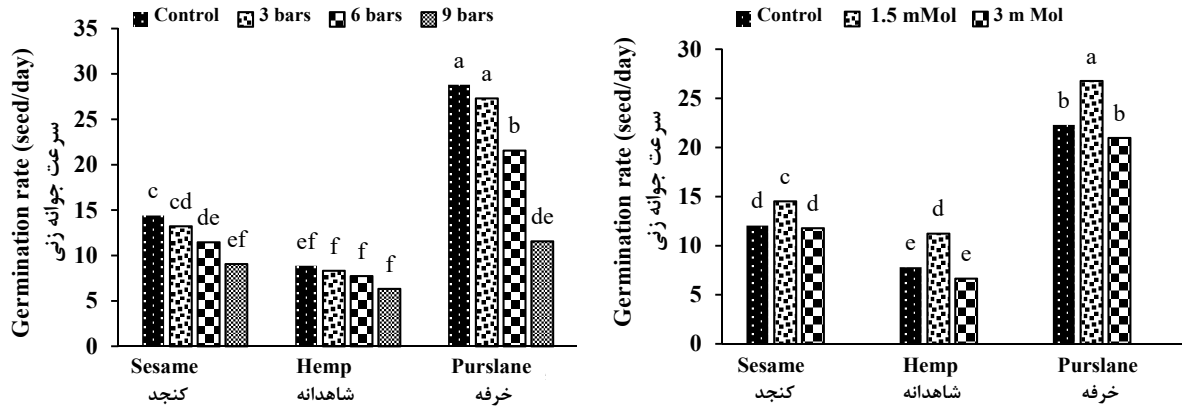
ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** are non-significant, and significant at 5 and 1 percent of probability level, respectively



شکل ۱. درصد جوانه‌زنی بذر سه گیاه کنجد، شاهدانه و خرفه در سطوح تنش خشکی (سمت چپ) و سیلیکات سدیم (سمت راست)

Fig. 1. Germination percentage of sesame, hemp and purslane under different levels of drought stress (left) and sodium silicate (right)



شکل ۲. سرعت جوانه‌زنی بذر سه گیاه کنجد، شاهدانه و خرفه در سطوح تنش خشکی (سمت چپ) و سیلیکات سدیم (سمت راست)

Fig. 2. Germination rate of sesame, hemp and purslane under different levels of drought stress (left) and sodium silicate (right)

نتایج نشان داد که اثر گونه گیاهی، تنش خشکی، سیلیکات سدیم و اثرات متقابل گونه گیاهی در سیلیکات سدیم و تنش خشکی در سیلیکات سدیم بر شاخص وزنی بنیه گیاهچه معنی‌دار بودند (جدول ۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل گونه گیاهی در سیلیکات سدیم، بیشترین شاخص وزنی بنیه در گیاهچه شاهدانه تحت شرایط پرایمینگ با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار سیلیکات سدیم بود و کمترین میانگین این صفت مربوط به گیاهچه خرفه در هر سه سطوح تیمار سیلیکات سدیم بود (شکل ۳، چپ). نتایج نشان داد پرایمینگ بذور با سیلیکات سدیم در سطح ۱/۵ میلی‌مولار در سطوح خشکی باعث افزایش میانگین شاخص وزنی بنیه گیاهچه گردید به‌طوری‌که بیشترین میانگین این شاخص در سطح خشکی ۳- بار در پرایمینگ ۱/۵ میلی‌مولار مشاهده شد که افزایش ۹/۶۳ درصدی در مقایسه با شاهد داشت. کمترین میانگین نیز مربوط به تیمار خشکی ۹- بار و عدم پرایمینگ بذر بود (شکل ۳، راست).

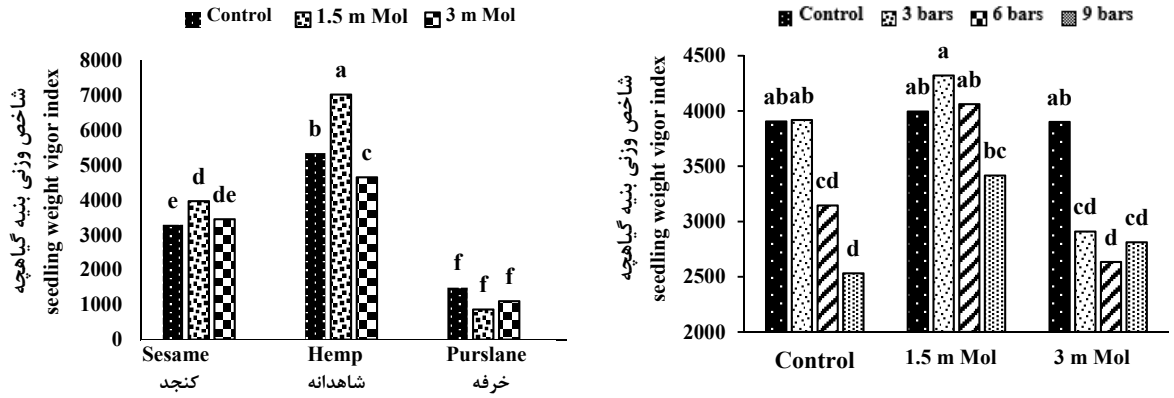
کلروفیل کل

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) اثر گونه گیاهی، تنش خشکی و اثرات متقابل گونه گیاهی در تنش خشکی، تنش خشکی در سیلیکات سدیم و اثر متقابل سه‌گانه گونه گیاهی در تنش خشکی در سیلیکات سدیم بر میزان کلروفیل کل معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه نشان داد کلروفیل کل در گیاهچه کنجد تحت شرایط تنش ۳- و ۶- بار و پرایمینگ با غلظت-های ۱/۵ و ۳ میلی-مولار سیلیکات سدیم بیشترین میانگین را داشتند و گیاهچه

شاهدانه تحت شرایط تنش خشکی ۹- بار و تیمار عدم پرایمینگ و پرایمینگ با ۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم کمترین محتوی کلروفیل را داشت (شکل ۴).

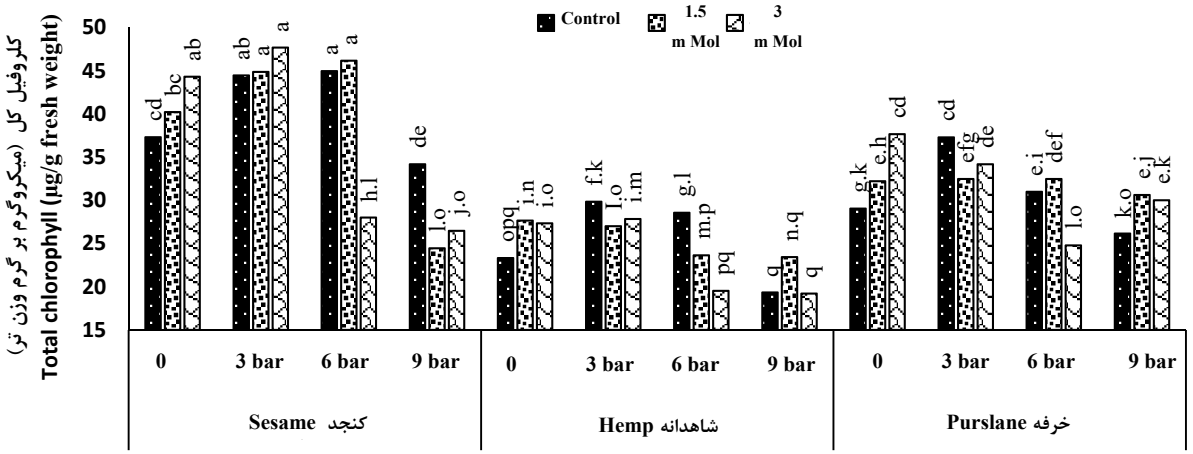
پرولین

نتایج حاکی از اثر معنی‌دار گونه گیاهی، تنش خشکی، گونه گیاهی در تنش خشکی، تنش خشکی در سیلیکات و اثر متقابل گونه گیاهی در تنش خشکی در سیلیکات بر محتوی پرولین آزاد بود (جدول ۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه، بیشترین محتوی پرولین در گیاهچه شاهدانه تحت شرایط تنش ۶-بار و پرایمینگ با ۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم به دست آمد و کمترین محتوی پرولین در گیاهچه کنجد تحت شرایط عدم تنش خشکی و پرایمینگ بذر با ۳ میلی‌مولار سیلیکات سدیم مشاهده شد (شکل ۵).



شکل ۳. شاخص وزنی بنیه گیاهچه تحت تأثیر اثرات متقابل گیاه و سیلیکات سدیم (چپ)، تنش خشکی و سیلیکات سدیم (راست)

Fig. 3. Interaction of plant species and sodium silicate (left) and drought stress and sodium silicate (right) on seedling weight vigor index



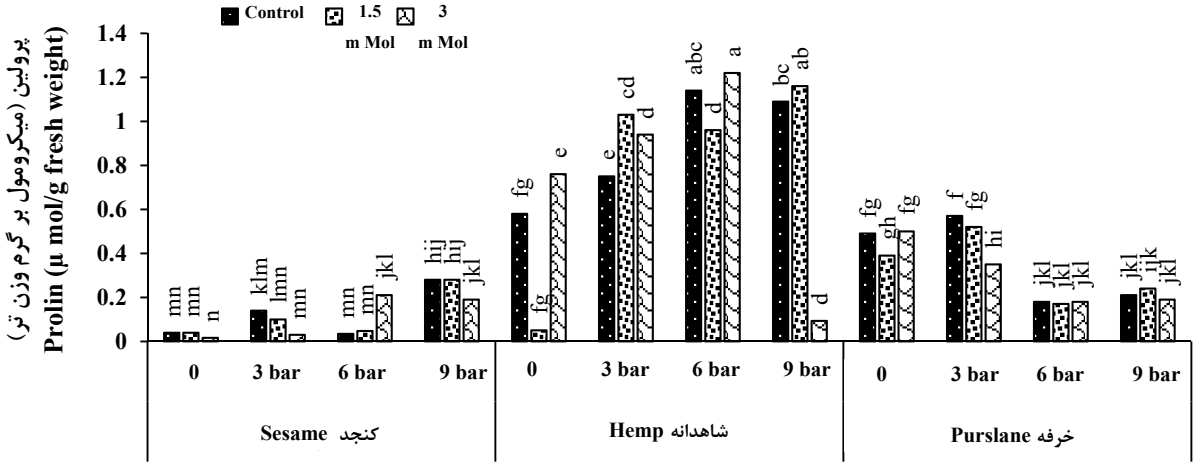
شکل ۴. برهم‌کنش سطوح تنش خشکی و سیلیکات سدیم بر محتوای کلروفیل کل گیاهچه در سه گونه کنجد، شاهدانه و خرفه

Fig. 4. Interaction of drought stress and sodium silicate on total chlorophyll content of sesame, hemp and purslane seedlings

آزمایش مزرعه‌ای

نتایج تجزیه مرکب در سال نشان داد، اثر سال، کم‌آبیاری، گونه گیاهی و اثر متقابل تنش کم‌آبیاری در گونه گیاهی بر ارتفاع بوته معنی‌دار بودند (جدول ۲). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری در گونه گیاهی، بیشترین ارتفاع بوته در گیاه کنجد تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و ۷۰ درصد

پتانسیل تبخیر و تعرق بود. کمترین ارتفاع بوته در گیاه خرفه تحت هر سه تیماری آبیاری مشاهده شد. نتایج نشان داد که آبیاری معادل ۴۰ درصد تبخیر و تعرق در گیاهان شاهدانه و کنجد منجر به کاهش ۳۱/۲۲ و ۱۹/۲ درصدی میانگین این صفت در مقایسه با تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق گردید (شکل ۶، چپ).



شکل ۵. برهم‌کنش سطوح تنش خشکی و سیلیکات سدیم بر پرولین گیاهچه در سه گونه کنجد، شاهدانه و خرفه

Fig. 5. Interaction of drought stress and sodium silicate on seedling proline content of sesame, hemp and purslane

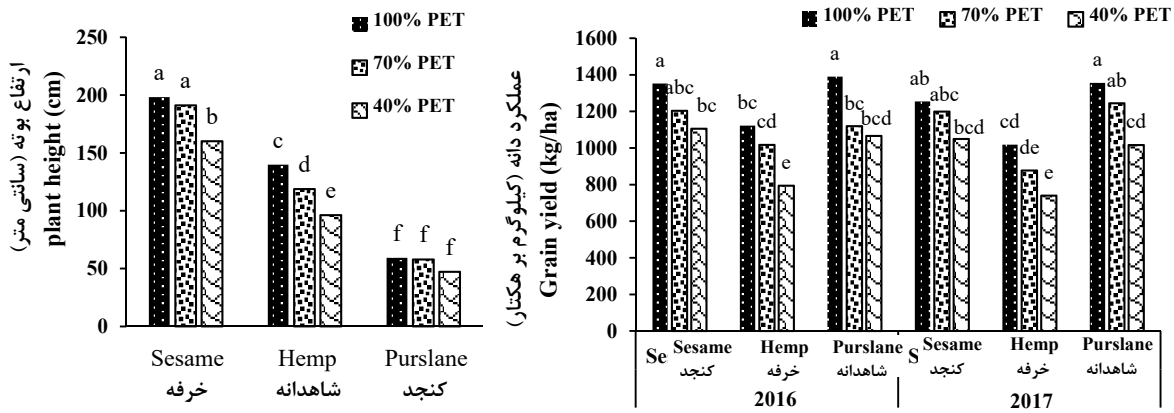
جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش کم‌آبیاری بر برخی صفات مورفو-فیزیولوژیکی سه گونه گیاهی کنجد، شاهدانه و خرفه در طی دو سال زراعی

Table 2. Analysis of variance (Mean of square) for the effect of deficit irrigation stress on some morpho- physiological traits of sesame, hemp and purslane in two years

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد بیولوژیک Biomass yield	شاخص برداشت Harvest index	کلروفیل کل Total chlorophyll	پرولین Proline
سال Year (Y)	1	1055.1*	285614ns	6284017.1*	10.9ns	6392.5**	0.11**
خطای a Error a	4	39.41	15404.9	1512367.4	3.35	4.98	0.005
کم‌آبیاری Deficit irrigation(D)	2	4624.7**	371184.8**	32485436.7**	7.07ns	274.4**	0.38**
Y × D	2	61.9ns	5993.8ns	935480.6ns	2.11ns	86.4**	0.12**
خطای b Error b	8	143.4	16467.3	923060.7	6.72	9.44	0.0009
گونه گیاهی Plant species (C)	2	74058.0**	431168.0**	26126963.7**	155.5**	63.5*	0.007**
Y × C	2	80.8ns	14501.8ns	2139525.5ns	26.9**	2.62ns	0.003*
D × C	4	487.7*	5980.1ns	4938670.9**	3.99ns	25.9ns	0.001ns
Y × D × C	4	45.6ns	19686.6*	770657.7ns	2.20ns	16.7ns	0.004**
خطا c Error c	24	142.1	9978.7	1054726.9	4.33	11.7	0.0009
CV (%)	-	*10.03*	*11.41*	*12.08*	*15.42*	*13.91*	*16.94*

بدون علامت غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, * and ** are non-significant, and significant at 5 and 1 percent of probability level, respectively



شکل ۶. اثر سطوح مختلف آبیاری بر ارتفاع بوته سه گونه کنجد، شاهدانه و خرفه (راست) و عملکرد دانه در دو سال آزمایش (چپ)

Fig. 6. Effect of different irrigation levels on plant height of sesame, hemp and purslane (right) and on their seed yield in two years experiment (left)

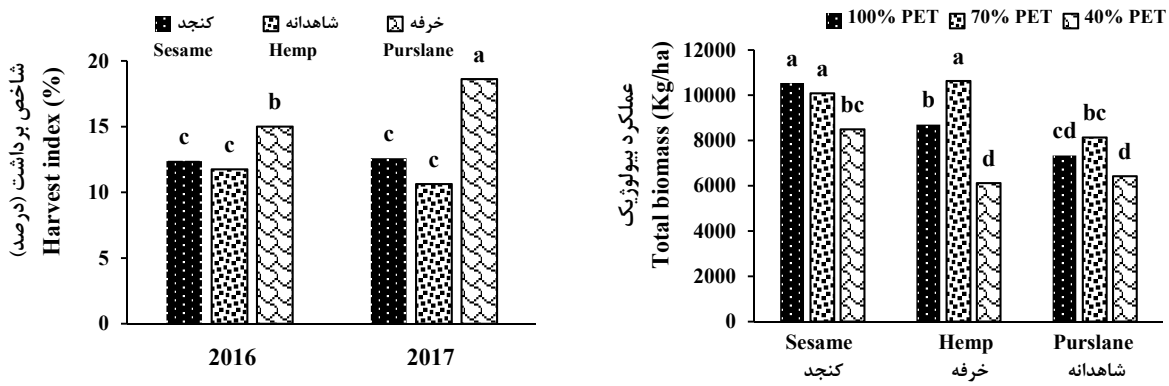
بر اساس نتایج تجزیه مرکب سال، اثر کم‌آبیاری و گونه گیاهی و اثر متقابل سال در کم‌آبیاری در گونه گیاهی بر عملکرد دانه معنی‌دار بودند (جدول ۲). بیشترین عملکرد دانه در گیاه خرفه در هر دو سال آزمایش تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و همچنین در گیاه کنجد در سال اول تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد مشاهده شد. کمترین عملکرد دانه نیز در گیاه شاهدانه در هر دو سال آزمایش تحت شرایط آبیاری ۴۰ درصد به دست آمد (شکل ۶، راست). میزان کاهش عملکرد دانه تحت شرایط کم‌آبیاری ۴۰ درصد در سال اول در گیاهان کنجد، شاهدانه و خرفه به ترتیب ۱۸/۲، ۲۹/۲ و ۲۳/۳ درصد بود و این مقادیر برای سال دوم ۱۶/۳، ۲۷/۳ و ۲۵/۰ درصد محاسبه شد.

اثر سال، کم‌آبیاری، گونه گیاهی و اثر متقابل کم‌آبیاری در گونه گیاهی بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بودند (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر متقابل کم‌آبیاری در گونه گیاهی نشان داد که عملکرد بیولوژیک در گیاه کنجد تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد و ۷۰ درصد و در گیاه شاهدانه تحت شرایط آبیاری ۷۰ درصد از بالاترین میانگین برخوردار بودند. کمترین عملکرد بیولوژیک در دو گیاه شاهدانه و خرفه تحت شرایط آبیاری ۴۰ درصد به ترتیب با میانگین ۶۱۱۹/۹ و ۶۴۱۸/۸ کیلوگرم در هکتار به دست آمد (شکل ۷، چپ).

نتایج تجزیه‌وتحلیل داده‌ها نشان داد که اثر گونه گیاهی و اثر متقابل سال در گونه گیاهی در سطح احتمال ۱ درصد بر شاخص برداشت معنی‌دار بودند و اثر سایر تیمارهای مورد آزمایش بر شاخص برداشت غیر معنی‌دار شد (جدول ۲). در مقایسه میانگین اثر سال در گونه گیاهی، بیشترین شاخص برداشت در سال دوم آزمایش و در گیاه خرفه با میانگین ۱۸/۶ درصد بود و کمترین شاخص برداشت در گیاهان شاهدانه و کنجد در هر دو سال آزمایش مشاهده شد (شکل ۷، راست).

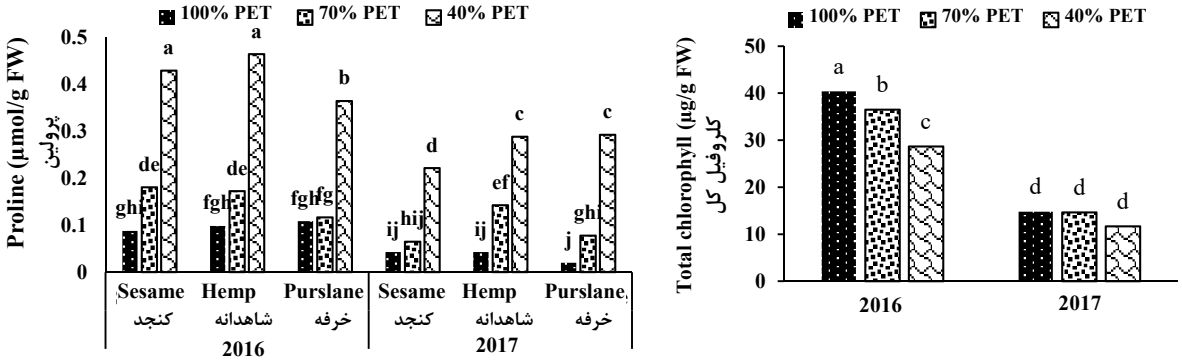
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه‌وتحلیل داده‌های حاصل، اثر سال، گونه گیاهی، کم‌آبیاری و سال در کم‌آبیاری بر میزان کلروفیل کل معنی‌دار بودند. میزان کلروفیل a تحت تأثیر اثر متقابل سه‌گانه سال در تنش کم‌آبیاری در گونه گیاهی تفاوت معنی‌دار نشان داد (جدول ۲). بیشترین محتوی کلروفیل کل در مقایسه میانگین اثر سال در تنش کم‌آبیاری، در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد در سال اول آزمایش بود و کمترین محتوی کلروفیل کل برگ در سال دوم آزمایش در هر سه سطح تیمار آبیاری مشاهده شد (شکل ۸، راست). در بین گیاهان مورد آزمایش، نیز خرفه دارای بیشترین محتوی کلروفیل کل در مقایسه با گیاهان کنجد و شاهدانه بود (نتایج نشان داده نشده است).

نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌های به‌دست‌آمده نشان داد که اثر سال، کم‌آبیاری، سال در کم‌آبیاری، گونه گیاهی، سال در گونه گیاهی و اثر متقابل سه‌گانه سال در کم‌آبیاری در گونه گیاهی بر محتوی پرولین معنی‌دار بودند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه، بیشترین محتوی پرولین برگ در دو گیاه کنجد و شاهدانه در سال اول آزمایش تحت شرایط آبیاری ۴۰ درصد به ترتیب با میانگین ۰/۴۳ و ۰/۴۶ میکرومول برگرم وزن تر مشاهده شد و کمترین میانگین این صفت در سال دوم آزمایش در گیاه خرفه تحت شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد با میانگین ۰/۰۲ میکرومول برگرم وزن تر بود (شکل ۸، چپ).



شکل ۷. عملکرد بیولوژیک سه گونه کنجد، شاهدانه و خرفه در سطوح مختلف آبیاری (سمت راست) و شاخص برداشت آن‌ها در دو سال آزمایش (سمت چپ)

Fig. 7. Total biomass of sesame, hemp and purslane under different irrigation levels (right) and their harvest index in two years experiment (left)



شکل ۸. اثر متقابل سال در گیاه در سطوح آبیاری بر میزان پرولین (چپ) و سال در سطوح آبیاری بر میزان کلروفیل کل برگ (راست)

Fig. 8. Interaction of year, plant species and irrigation levels on leaf proline (left) and year and irrigation levels on total leaf chlorophyll (right)

بحث

اثر تنش خشکی بر شاخص‌های جوانه‌زنی

شرایط محیطی و خصوصیات ژنتیکی از عوامل مهم جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه است. پتانسیل آب یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر است (Toscano et al., 2017). با کاهش پتانسیل آب، شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که در هر سه محصول مورد آزمایش (کنجد، شاهدانه و خرفه)، درصد و سرعت جوانه‌زنی تحت شرایط تنش نسبت به شرایط غیر تنش کاهش چشمگیری نشان دادند. قبلاً گزارش شده است که تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذر در آفتابگردان (Toscano et al., 2017)، کنجد (Hussein et al., 2015) و خرفه (Ekinci et al., 2018) تأثیر منفی می‌گذارد. این کاهش جوانه‌زنی را می‌توان به افزایش غلظت محلول پلی‌اتیلن گلیکول و همچنین افزایش فشار اسمزی و پتانسیل اسمزی محیط نسبت داد که منجر به کاهش تداوم جذب آب توسط دانه‌ها می‌شود و همچنین مانع از فعالیت‌های طبیعی گیاهچه می‌شود. (Al-Shamsi et al., 2018). در این آزمایش یک روند متداول جوانه‌زنی در پاسخ به تنش خشکی در سه محصول کنجد، شاهدانه و خرفه به دست آمد، گرچه ازنظر تحمل به تنش تفاوت معنی‌داری را نشان دادند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بذر خرفه تحت شرایط تنش خشکی نسبت به دو دانه دیگر در مرحله جوانه‌زنی تحمل بیشتری داشت. برناسی و همکاران (Bornasi et al., 2017) نیز گزارش داد بذر خرفه تحمل بیشتری نسبت به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی دارد که نتایج تحقیقات فعلی را تأیید می‌کند.

اثر سیلیکات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی

نتایج یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که پرایمینگ بذر به‌خصوص با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار منجر به افزایش میانگین شاخص‌های جوانه‌زنی و بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاهچه کنجد، شاهدانه و خرفه گردید. پژوهشگران بیان داشتند که در برهمکنش تنش شوری و سیلیکات سدیم، کاربرد سیلیکون باعث افزایش محتوی کلروفیل و بهبود فتوسنتز گیاه تحت شرایط تنش در گیاه سویا گردید (Lee et al., 2010). تأثیر مثبت سیلیکات‌ها به دلیل افزایش استحکام برگ‌ها و نیز افزایش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی به‌خصوص کلروفیل‌ها است که منجر به افزایش کارایی مصرف نور در گیاه می‌شود (Nabati et al., 2013). در پژوهشی بیان شد که تیمار سیلیکات سدیم منجر به ایجاد حالت مقاوم‌سازی (Hardening) در گیاه شده و اثرات منفی ناشی از تنش بر میزان کارتنوئید را کاهش می‌دهد. این گروه از ماکروپروتئین‌ها به‌عنوان حفاظت کننده فتوسیستم‌های نوری علیه اکسیژن یکتایی می‌باشند که انرژی زیادی را از فتوسیستم‌ها به‌صورت واکنش‌های شیمیایی بی‌ضرر یا گرما دفع کرده و محافظت از غشای کلروپلاستی را انجام می‌دهند (Koyro, 2006).

بر اساس نتایج سایر پژوهشگران، کاربرد سیلیکات سدیم به‌طور غیرمستقیم یا مستقیم منجر به افزایش القای ژن‌های مسیر سنتز اسیدآمینه پرولین شده و یا اینکه فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز این ترکیب را افزایش می‌دهند. پژوهشگران بیان داشتند که کاربرد سیلیکات تحت شرایط تنش شوری منجر به افزایش محتوی پرولین آزاد در گیاه گوجه‌فرنگی شد (Al-Aghabary et al., 2004). رحیمی و کافی (Rahimi and Kafi, 2010) افزایش محتوی پرولین گیاه خرفه تحت شرایط کاربرد سیلیکات و تنش شوری را گزارش کردند.

اثر تنش خشکی بر صفات مورفو-فیزیولوژیکی

طیف گسترده‌ای از اختلالات مولکولی که باعث ایجاد آسیب فیزیولوژیکی در گیاهان تحت شرایط تنش خشکی می‌شوند، می‌تواند به تولید گونه‌های اکسیژن واکنشی و مخرب واکنش‌دهنده (ROS) نسبت داده شود. این رادیکال‌ها واکنش مستقیم دارند که باعث از بین بردن DNA، پراکسیداسیون لیپیدها، تخریب پروتئین‌های غشایی و ماکرو پروتئین‌های در سلول ازجمله رنگ‌دانه‌های کلروفیل و آنزیم‌ها می‌شوند (Jin et al., 2016). رنگیزه‌های فتوسنتزی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر تنش خشکی در آزمایش‌های جوانه‌زنی و مزرعه‌ای قرار گرفت. میزان کاهش کلروفیل کل در آزمایش جوانه‌زنی ۱۱/۰۷ درصد تحت تیمار خشکی ۹- بار در مقایسه با تیمار شاهد بود و در آزمایش مزرعه‌ای ۲۹/۰ و ۲۱/۰۸ درصد به ترتیب در سال اول و دوم تحت شرایط آبیاری در ۴۰ درصد تبخیر و تعرق در مقایسه با تیمار آبیاری معادل ۱۰۰ درصد به دست آمد. فتوسنتز، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه است که به‌شدت تحت شرایط تنش کم‌آبیاری و خشکی کاهش می‌یابد. زنده ماندن فتوسنتزی و حفظ کلروفیل برگ در شرایط تنش از شاخص‌های فیزیولوژیکی مقاومت به تنش است (Petcu et al., 2014). بر اساس نتایج برخی محققان، کاهش میزان کلروفیل تحت تنش کم‌آبی به دلیل افزایش ROS مانند H_2O_2 و O^{2-} است که منجر به پراکسیداسیون لیپیدها و درنتیجه تخریب رنگ‌دانه‌ها می‌شود (Nxele et al., 2017). جالب‌توجه است که کلروفیل کل گیاه خرفه در آزمایش مزرعه‌ای نسبت به گیاهان کنجد و شاهدانه بالاتر بود. توانایی سنتز رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی بیشتر تحت شرایط تنش خشکی از اصلی‌ترین اصول تحمل گیاهان به تنش است (Wang et al., 2018).

پرولین یک اسیدآمینه است که در سیتوپلاسم ذخیره می‌شود و احتمالاً در هنگام تنش از ساختار ماکرومولکول‌های داخل سلول محافظت می‌کند. غلظت پرولین در شرایط تنش ممکن است نسبت به شرایط عادی تا ۱۰۰ درصد افزایش یابد. این اسموپروتئین نقش مهمی در تنظیم فشار اسمزی سلولی تحت فشارهایی مانند خشک‌سالی و شوری ایفا می‌کند (Slama et al., 2015). در مرحله جوانه‌زنی، گیاهچه خرفه نتایج متفاوتی با یافته‌های قبلی نشان داد. میزان پرولین در شرایط تنش در مقایسه با تیمار شاهد کاهش معنی‌داری داشت. اگرچه نتایج آزمایش مزرعه‌ای مطابق با یافته‌های محققان قبلی بود، یعنی با افزایش تنش خشکی، میزان پرولین گیاه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. صالحی و همکاران (Salehi et al., 2016) گزارش داد محتوای پرولین بالا می‌تواند گیاهان را در برابر تنش خشکی شدید محافظت کند و تحمل به تنش کم‌آبیاری را تقویت کند.

تنش خشکی با اختلال در عمل روزنه‌ها و سیستم فتوسنتزی، تخریب پروتئین‌ها و آنزیم‌ها، کاهش سطح برگ

و ریزش گل و میوه موجب کاهش عملکرد گیاهان می‌شود (Doupis et al., 2013). نتایج به‌دست‌آمده از دو آزمایش (جوانه‌زنی و مزرعه) دارای دو نکته جالب بود. نخست، گیاه خرفه متحمل‌ترین گیاه به تنش خشکی بود. به نظر می‌رسد یکی از دلایل مهم تحمل زیاد خرفه به تنش کم‌آبیاری یا خشکی، میزان بالاتر رنگیزه‌های فتوسنتزی این گیاه در شرایط عادی و تنش است.

در آزمایشی روی بابونه آلمانی تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته شد (Razmjoo et al., 2008). ارتفاع بیشتر، می‌تواند دلیلی بر وجود تعداد برگ و طول ساقه و درنتیجه سطح فتوسنتز کننده بالاتر باشد که این عوامل منجر به افزایش تولید مواد فتوسنتزی و رشد گیاه می‌شوند. همچنین ازآنجایی‌که سوخت‌وساز گیاه در شرایط تنش خشکی به میزان زیادی توسط دو عامل اصلی سطح برگ و فتوسنتز در هر واحد سطح برگ کنترل می‌شود، در شرایط کمبود آب، افزایش میزان اسید آبسیزیک از طریق کاهش میزان تکثیر سلول در مریستم برگ و کاهش فعالیت‌های حل‌کنندگی دیواره سلولی که لازمه‌ی طویل شدن برگ است، از توسعه سطح برگ جلوگیری می‌کند.

طبق نتایج به‌دست‌آمده، اگر شدت تنش کم‌آبیاری زیاد باشد، باعث کاهش شدید فتوسنتز و اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی، متوقف کردن رشد، کاهش عملکرد و درنهایت خشک شدن و مرگ گیاه می‌شود. میزان کاهش عملکرد دانه به ترتیب در کنجد ۱۸/۲۷ و ۱۶/۳۶ درصد، در شاهدانه ۲۹/۲ و ۲۷/۳ درصد و در خرفه ۲۳/۳ و ۲۵/۲ درصد به ترتیب در سال‌های اول و دوم آزمایش بود. گزارش شده که علت کاهش عملکرد دانه می‌تواند ناشی از سطح تنش موردمطالعه و تأثیر آن بر برخی از اجزای عملکرد مانند تعداد دانه، وزن دانه و تعداد اندام‌های تولیدمثل در بوته باشد. علاوه بر این، کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی می‌تواند نتیجه کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی باشد (Hassan and Ali, 2014). در بررسی تأثیر مقادیر آبیاری بر خصوصیات رشدی و عملکرد چهار اکوتیپ کنجد گزارش گردید که افزایش مقدار آبیاری موجب افزایش تعداد شاخه جانبی، تعداد کپسول، تعداد دانه و وزن ۱۰۰۰ دانه کنجد شد (Koocheki et al., 2016). در بررسی خصوصیات عملکردی چهار رقم کنجد تحت تنش کم‌آبی، تنش سبب کاهش تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک شد (Mehrabi and Ehsan Zadeh, 2011). کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش کم‌آبی نسبت به آبیاری مطلوب را می‌توان به کاهش فتوسنتز و ماده سازی در گیاه تحت شرایط تنش نسبت داد، چراکه کاهش فتوسنتز خالص و کاهش مواد غذایی انتقال‌یافته از برگ به دانه از پیامدهای تنش کمبود آب است که باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود. پژوهشگران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که در گیاه کنجد تیمار آبیاری در مقایسه با تیمار کم‌آبی باعث افزایش شاخص سطح برگ گردید (Pereira et al., 2017; Harikumar, 2017).

میانگین عملکرد دانه در دو سال آزمایش در گیاه خرفه بیشترین مقدار بود، اما میانگین کاهش عملکرد دانه تحت شرایط کم‌آبیاری تیمار ۴۰ درصد در کنجد کمترین و در شاهدانه بیشترین بود. این نتایج حاکی از برتری دو محصول خرفه و کنجد در مقایسه با شاهدانه تحت شرایط کم‌آبیاری است. ترتیب تحمل گیاهان مورد آزمایش به تنش خشکی عبارت‌اند از: شاهدانه> کنجد> خرفه. از دلایل تحمل زیاد گیاه خرفه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. این گیاه یکی از گیاهان C_4 است که ساختار آناتومی Kranz و دولپه‌ای را به نمایش می‌گذارد. اصطلاح "CAM-like" برای اشاره به خرفه مورداستفاده قرار گرفته است. علاوه بر سلول‌های مزوفیلی و غلاف آوندی، برگ‌های خرفه از سلول‌های بزرگ و خالی ذخیره‌شده آب استفاده می‌کنند که به رشد و نمو برگ‌ها کمک می‌کند (Jin et al., 2016). بالا بودن میزان کلروفیل یکی از دلایل برتری عملکرد دانه در سال اول نسبت به سال دوم بود. علاوه بر این، شرایط آب و هوایی مطلوب سال اول آزمایش منجر به رشد و عملکرد بیشتر گیاه در مقایسه با سال دوم آزمایش شد. نتایج تأثیر شرایط محیطی بر صفات فیزیولوژیکی، پارامترهای عملکرد و رشد گیاهان را تأیید می‌کند. نتایج مشابهی توسط عقیقی شاهوردی و همکاران (Aghighi Shahverdi et al., 2018) گزارش شده است.

نتیجه‌گیری نهایی

در واکنش سه گونه گیاهی مورد آزمایش به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی، نتایج نشان داد که تنش خشکی اثر منفی و کاهنده بر شاخص‌های جوانه‌زنی ازجمله درصد و سرعت جوانه‌زنی داشته ولی این کاهش در سطوح خشکی بالاتر (۶- و ۹- بار) مشهودتر بود. تغییرات بیوشیمیایی سه گونه در واکنش به تنش خشکی در مرحله جوانه‌زنی نیز نشان داد که خشکی اثر معنی‌داری بر شاخص‌هایی ازجمله میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و پرولین داشت. به بیان بهتر، تنش خشکی

باعث کاهش میزان کلروفیل کل و افزایش محتوی پرولین گردید. تغییرات عملکرد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی سه گونه کنجد، شاهدانه و خرفه در پاسخ به کم‌آبیاری نشان داد که تنش خشکی از طریق اثراتی مثل کاهش میزان رنگیزه-های فتوسنتزی و افزایش سنتز متابولیت‌های ثانویه منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود. واکنش گونه‌های مختلف مورد آزمایش نیز به کم‌آبیاری متفاوت بود. اگرچه در آزمایش مزرعه‌ای تفاوت معنی‌داری بین عملکرد دانه خرفه و کنجد در شرایط کم‌آبیاری مشاهده نشد، اما در آزمایش جوانه‌زنی، در شرایط تنش خشکی خرفه سازگاری بیشتری از خود نشان داد.

منابع

Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H., Tabatabaei, S.J., 2018. Plant growth and steviol glycosides as affected by foliar application of selenium, boron, and iron under NaCl stress in *Stevia rebaudiana* Bertoni. Industrial Crops and Products. 125, 408–415

Ahmed, M., Qadeer, U., Ahmed, Z.I., Hassan, F.U., 2016. Improvement of wheat (*Triticum aestivum*) drought tolerance by seed priming with silicon. Archive of Agronomy, Soil Science. 62, 299-315.

Akhkha, A., Boutra, T., Alhejely, A., 2011. The rate of photosynthesis, chlorophyll content, dark respiration, proline, and abscisic acid (ABA) in wheat under water deficit conditions. International Journal of Agriculture and Biology. 13, 215-221.

Al-Aghabary, K., Zhu, Z., Shi, Q., 2004. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. Journal of Plant Nutrition. 27, 2101-2115.

Ansari, O., Sharif-Zadeh, F., 2012. Osmo and hydro priming improvement germination characteristics and enzyme activity of Mountain Rye (*Secale montanum*) seeds under drought stress. Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 8, 253-261.

Bates, L., Waldren, R., Teare, I., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207.

Bornasi, O., Al-Hassan, M., Boscaiu, M., Sestras, R.E., Vicente, O., 2017. Effects of salt and drought stress on seed germination and seedling growth in Portulaca. Romanian Biotechnological Letters. Nx 1-11.

Coskun, D., Britto, D.T., Huynh, W.Q., Kronzucker, H.J., 2016. The role of Silicon in higher plants under salinity and drought stress. Frontier in Plant Science. 7, 1-10.

Dadkhah, A., 2010. Salinity effect on germination and seedling growth of four medicinal plants. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 26, 358-369. [In Persian with English Summary].

Darghahi, Y., Asghari, A., Rasoolzadeh, A., Aghaiee Fard, K., Ahmadian, M., 2014. Effect of water deficit stress on yield, water use efficiency and harvest index of sesame (*Sesamum indicum*) varieties. Journal of Applied Crop Breeding. 2, 171-183. [In Persian with English Summary].

Din, J., Khan, S.U., Ali, I., Gurmani, A.R., 2011. Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. Journal of Animal and Plant Sciences. 21, 78-82.

Doupis, G., Bertaki, M., Psarras, G., Kasapakis, I., Chartzoulakis, K., 2013. Water relations, physiological behavior and antioxidant defense mechanism of olive plants subjected to different irrigation regimes. Scientia Horticulturae. 153, 150-156.

Ebrahimian, E., Seyyedi, S.M., Bybordi, A., Damalas, C.A., 2019. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. Agricultural Water Management. 218, 149-157.

Ekinci, M., Ors, S., Turan, M., Kul, R., Yildirim, E., 2018. Ameliorative effects of exogenously applied nitric oxide on seed germination and seedling growth of purslane under drought and salinity. Acta Scientific Agriculture. 12, 16-22.

Gerami, F., Moghaddam, P.R., Ghorbani, R., Hassani, A., 2016. Effects of irrigation intervals and organic manure on morphological traits, essential oil content and yield of oregano

(*Origanum vulgare* L.). Annals of the Brazilian Academy of Sciences. 88, 2375-2385.

Gholinejhad, R., Sirous Mehr, A.R., Fakheri, B., 2014. Effect of drought stress and organic fertilizers on the activity of some antioxidant enzymes, photosynthetic pigments, prolin and Borago yield. Journal of Horticultural Science. 28(3), 338-346. [In Persian with English Summary].

Gong, H.Z., Chen, K., Wang, S., Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. Plant Science. 169, 313-321.

Hajiboland, R., Cheraghvareh, L., 2014. Influence of Si supplementation on growth and some physiological and biochemical parameters in salt-stressed tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants. Journal of Sciences. 25, 205-217.

Harikumar, V.S., 2017. Biometric parameters of field grown sesame influenced by Arbuscular Mycorrhizal inoculation, rock phosphate fertilization and irrigation. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 20, 197-202.

Hassan, F.A.S., Ali, E.F., 2014. Impact of different water regimes based on class-a pan on growth, yield and oil content of Coriandrum sativum L. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 13, 155–161.

He, F., Mu, L., Yan, G.L., Liang, N., Pan, Q., Wang, J., Reeves, M., Duan, C., 2010. Biosynthesis of anthocyanins and their regulation in colored grapes. Molecules. 15, 9057-9091.

Hussein, Y., Amin, G., Azab, A., Gahin, H., 2015. Induction of drought stress resistance in sesame (Sesamum *indicum* L.) plant by salicylic acid and kinetin. Journal of Plant Science. 10, 128-141.

Janalizadeh Ghazvini, M., Nezami, A., Khazaie, H.R., Goldani, M., Feizi, H. 2017. Effect of Magneto priming on seed germination of sesame (*Sesamun indicum*) seed under water stress conditions. Iranian Journal of Seed Science and Technology. 6, 165-176.

Jin, R., Wang, Y., Liu, R., Gou, J., Chan, Z., 2016. Physiological and metabolic changes of purslane (*Portulaca oleracea* L.) in response to drought, heat, and combined stresses. Frontiers in Plant Science. 6, 1123-1130.

Koocheki, A., Mokhtari, V., Khorramdel, S., Taherabadi, S., 2016. Evaluation effect of irrigation on growth traits and yield of four sesame ecotype. Iranian Journal of Field Crops Research. 13, 239-247. [In Persian with English Summary].

Koyro, H.W., 2006. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of potential cash crop halophyte (*Plantago voronopus* L.). Environmental and Exprimental Botany. 56, 136-146.

Lee, S.K., Yoon, J.Y., Sohn, E.Y., Lee, I.J., Hamayun, M., 2010. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. Agroforestry Systems. 80, 333- 340.

Lichtenthaler, H.K, 1987. Chlorophylls and carotenoids. Pigments of photosynthetic membranes. Method Enzyme. 148, 350-382.

Makkizadeh Tafti, M., Farhoudi, R., Rabii, M., Rastifar, M., 2011. Evaluation allelopathic effect of Hemp (*Cannabis sativa* L.) on germination and vegetative growth of three weeds species. Crop Physiology Journal. 3, 79-88. [In Persian with English Summary].

Mehrabi Zadeh, Z., Ehsan Zadeh, P., 2011. A study on physiological attributes and grain yield of sesame cultivars under different soil moisture regimes. Journal of Crops Improvement. 13, 75-88. [In Persian with English Summary].

Michel, B.E., Kaufmann, M.R., 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiology. 51, 914–916.

Moghanibashi Najafabadi, M., Khazaie, H.R., Nezami, A., Eshghizadeh, H.R., 2019. The effect of different irrigation levels on some physiological characteristic and grain yield of sesame genotypes. Scientific Journal of Crop Physiology. 11:81-93. [In Persian with English Summary].

Nabati, J., Kafi, M., Masoumi, A., Zare Mehrjerdi, M., 2013. Effect of salinity and silicon application on photosynthetic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). International Journal of Agricultural Sciences. 3, 483-492.

Nexele, X., Klein, A., Ndimba, B.K., 2017. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. South African Journal of Botany. 108, 261-266.

Patade, V.Y., Maya, K., Zakwan, A., 2011. Seed priming mediated germination improvement and tolerance to subsequent exposure to cold and salt stress in capsicum. Research Journal of Seed Science. 4, 125 -136.

Petcu, E., Schitea, M., Dragan, L., 2014. The effect of water stress on stomatal resistance and chlorophyll fluorescence and their association with alfalfa yield. Romanian Agricultural Research. 31, 113-119.

Rahimi1, Z., Kafi, M., 2010. Effects of Salinity and Silicon Application on Biomass Accumulation, Sodium and Potassium Content of Leaves and Roots of Purslane (*Portulaca oleracea* L.). Journal of Water and Soil. 24, 367-374. [In Persian with English Summary].

Ravelombola, W.S., Shi, A., Weng, Y., Clark, J., Motes, D., Chen, P., Srivastava, V., 2017. Evaluation of salt tolerance at germination stage in cowpea (*Vigna unguiculata* L.). Horticultural Science. 52, 1168–1176.

Razmjoo, K., Heydarizadeh, P., Sabzalian, M.R., 2008. Effect of salinity and drought stress on growth parameters and essential oil content of Matricaria chamomile. International Journal of Agriculture and Biology. 10, 451-454.

Salehi, A., Tasdighi, H., Gholmhoseini, M., 2016. Evaluation of proline, chlorophyll, soluble sugar content and uptake of nutrients in the German chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) under drought stress and organic fertilizer treatments. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine. 6, 886-891.

Shamsi, K., 2010. The effect of drought stress on yield, relative water content, proline, soluble carbohydrate, and chlorophyll of bread wheat cultivars. Journal of Animal and Plant Sciences. 3, 1051-1060.

Silva, P., Matos, M., 2016. Assessment of the impact of Aluminum on germination, early growth and free proline content in Lactuca sativa L. Ecotoxicology and Environmental Safety. 131, 151–156.

Slama, I., Abdelly, C., Bouchereau, A., Flowers, T., Savoure, A., 2015. Diversity, distribution and roles of osmoprotective compounds accumulated in halophytes under abiotic stress. Annals of Botany. 115, 433-447.

Toscano, S., Romano, D., Tribulato, A., Patane, C., 2017. Effects of drought stress on seed germination of ornamental sunflowers. Acta Physiology Plantarium 39, 184-192.

Vermeiren, I., Jobling, G.A., 1980. Localized irrigation: design, installation, operation, and evaluation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Wang, F., Liu, P., Zhu, J., 2018. Effect of magnesium (Mg) on contents of free proline, soluble sugar and protein in soybean leaves. Henan Agricultural Sciences. 6, 35-38.