"نشریه علوم و فناوری بذر ایران"
جلد دوازدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲
(ص ۷۸-۶۵)
مقاله پژوهشی

Iranian Journal of Seed Science and Technology
Vol.: 12, No.: 3, Autumn 2023
(pp: 65-78)
DOI: 10.22092/ijsst.2023.362032.1482
Research Article

کاربرد سیلیکون در کنترل تنش اسمزی و تأثیر آن بر خصوصیات جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه کاملینا

نسرین تیموری[۱]، مختار قبادی[۲*]، دانیال کهریزی[۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۲. دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
۳. استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳)

چکیده

زراعت دانه روغنی کاملینا قابلیت فراوانی برای قرار گرفتن در الگوی کشت دیمزارهای ایران را دارد. در زراعت دیم، مرحله جوانه‌زنی و استقرار بذر معمولاً با خشکی مواجه است. هدف این تحقیق، بررسی اهمیت کاربرد غلظت‌های مختلف سیلیکون بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه کاملینا در شرایط تنش خشکی است. آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه بذر دانشگاه رازی اجرا شد. فاکتورها شامل دو ژنوتیپ کاملینا (رقم سهیل و لاین-۸۴)، چهار سطح تنش خشکی (صفر، ۳-، ۶-، ۹- بار با استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰) و پنج سطح سیلیکون (صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌مولار با استفاده از سیلیکات سدیم) بودند. بر اساس نتایج، افزایش تنش خشکی سبب کاهش ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گردید. اما با استفاده از سیلیکون، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول گیاهچه، وزن خشک گیاهچه، شاخص‌های طولی و وزنی بنیه گیاهچه و ضریب آلومتریک وزن خشک ساقه‌چه به ریشه‌چه افزایش یافتند. برای افزایش صفات اندازه‌گیری شده، غلظت‌های سیلیکون ۶ و ۸ میلی‌مولار بهتر از سایر غلظت‌ها عمل کردند. به طور کلی، سیلیکون با ارتقاء خصوصیات جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه در شرایط تنش، در تخفیف اثر تنش خشکی در مرحله رشد گیاهچه‌ای کاملینا مؤثر بود. بنابراین، به نظر می‌رسد سیلیکون عامل موثری در این گونه بررسی‌ها و بررسی قابلیت استفاده از آن در تکنولوژی بذر کاملینا و پوشش‌دار کردن بذر برای مناطق دیم داشته باشد.

کلمات کلیدی: تنش اسمزی، سرعت جوانه‌زنی، سیلیکات سدیم، شاخص بنیه گیاهچه.

The use of silicon in controlling osmotic stress and its effect on seed germination characteristics and seedling growth of Camelina

N. Teimoori[1], M. Ghobadi[2*], D. Kahrizi[3]

1. Ph.D. student, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.
3. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran.
(Received: Apr. 15, 2023 – Accepted: Jul. 04, 2023)

Abstract

Camelina oilseed has a lot of ability to be placed in the cultivation pattern of Iran's drylands. The seed germination and seedling establishment in dryland agriculture are usually exposed to drought stress. The aim of this study is to investigate the application effect of silicon concentrations in improving the seed germination characteristics and seedling growth of camelina under drought-stress conditions. The experiment was conducted as a factorial based on CRD with three replications at the seed laboratory of Razi University. The factors include camelina genotypes (Sohail and Line-84), drought stress (0, -3, -6, -9 bar using PEG-6000) and silicon (0, 2, 4, 6 and 8 mM using sodium silicate). According to the results, increasing the drought stress decreased the seed germination characteristics and the seedling growth. However, germination percentage, germination rate, seedling length, seedling dry weight, seedling vigor indices and allometric coefficient of plumule to radicle weight were increased by silicon. To increase the measured traits, silicon 6 and 8 mM were better than other concentrations. In general, silicon was effective in mitigating the effects of drought stress on the seedling growth of camelina by improving the seed germination characteristics and seedling growth. Therefore, it seems that the silicon is an effective factor in such studies and its usability in camelina seed technology and seed coating for dryland areas.

Key words: Germination rate, osmotic stress, sodium silicate, seedling vigor index.

* Email: ghobadi.m@razi.ac.ir

مقدمه

گیاهان دانه روغنی در بین محصولات زراعی جایگاه ویژه‌ای دارند. دانه های روغنی یکی از منابع مهم تامین انرژی مورد نیاز بدن انسان است، که منبع غنی از اسیدهای چرب و حاوی پروتئین نیز می باشند (Gharib Eshghi and Nemati, 2012). گیاه دانه روغنی کاملینا با نام علمی *Camelina sativa* L. به خانواده چلیپائیان (*Brassicaceae*) تعلق دارد (Ghidoli et al., 2023).

در بین تنش‌های محیطی، خشکی شایع‌ترین آن در سطح کره زمین است (Chaudhry and Sidhu, 2022). پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که پدیده تغییر اقلیم، وضعیت بارندگی را در آینده از شرایط فعلی بدتر خواهد نمود (Malhi *et al*., 2021). ایران با میانگین بارندگی سالیانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر، جزء مناطق خشک و نیمه خشک قرار می‌گیرد و به جزء نوار شمالی کشور، بقیه مناطق ایران با خشکی مواجه هستند (Nikkhah *et al*., 2022).

جوانه‌زنی بذر، اولین مرحله از رشد و نمو گیاه است. اختلال در جوانه‌زنی بذر و استقرار ناکافی گیاهچه از معضل‌هایی است که گیاهان زراعی در مناطق مختلف با آن مواجه هستند. این مشکلات تحت تاثیر کیفیت بذر و همچنین شرایط محیطی مورد نیاز برای جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه است. خلوص فیزیکی، اندازه بذر، درصد و سرعت جوانه‌زنی بذر، سلامت بذر، سن بذر، و ... از شاخص‌های مهم و مؤثر بر کیفیت بذر می‌باشند (Kameswara Rao *et al*., 2017). بذرهای با کیفیت بالا قادر هستند که در مواجهه با تنش‌های محیطی، درصد و سرعت جوانه‌زنی بالاتری داشته، گیاهچه‌های نیرومندتری تولید کرده و در نهایت در مقابل شرایط نامساعد محیطی موفق‌تر عمل نمایند (Srivastava *et al*., 2021).

سیلیکون (Si) بعد از اکسیژن دومین عنصر فراوان در روی زمین است که میزان آن بین ۴۵-۱ درصد می‌باشد، هر چند بخش اعظم آن به شکل سیلیکات‌ها تثبیت شده و در دسترس گیاهان نیست (Sakihama *et al*., 2002). به دلیل این که سیلیکون به عنوان یک عنصر ضروری در گیاهان ذکر نگردیده، توجه زیادی به نقش بیولوژیکی آن در گیاه نیز نشده است (Guo *et al*., 2013). اگر چه سیلیکون غالباً برای رشد و نمو گیاه غیرضروری است، اما جذب سیلیکون می‌تواند رشد گیاه را در مواجهه با برخی تنش‌های زیستی و غیرزیستی تسهیل کند (Zhang *et al*., 2017). شواهد نشان می‌دهد که سیلیکون در القاء رشد گیاهان و کاهش اثر تنش‌های زیستی مانند بیماری‌ها و آفات گیاهی، تنش‌های غیرزیستی مانند شوری، خشکی، سمیت فلزات، و ... مفید بوده است (Parande *et al*., 2013). سیلیکون در بسیاری از موارد، با تحریک رشد و افزایش در فعالیت برخی آنزیم‌ها، موجب حفاظت گیاه در برابر تنش‌های محیطی شده است (Balakhnina and Borkowska, 2013).

در یک مطالعه، بذرهای گوجه فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) در معرض تنش خشکی (توسط پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰) قرار گرفتند. نتایج نشان داد که درصد جوانه‌زنی بذر در اثر تنش خشکی کاهش یافت اما در چنین شرایطی، مصرف سیلیکون به‌طور معنی‌داری این صفت را افزایش داد (Shi et al., 2014). در مطالعه‌ای دیگر که بذرهای عدس در مرحله جوانه‌زنی در معرض تنش خشکی (۳، ۵ و ۸ بار توسط پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰) قرار گرفتند استفاده از سیلیکون با غلظت سه میلی‌مولار سبب افزایش خصوصیات جوانه‌زنی و افزایش غلظت اسمولیت‌های گیاهچه (مثل پرولین، گلیسین بتائین و قندهای محلول) گردید (Biju *et al*., 2017). در یک تحقیق، استفاده از سیلیکون در پوشش‌دار کردن بذر ریگراس (*Lolium multiflorum*) در افزایش مقاومت گیاه به بیماری لکه خاکستری برگ (*Pyricularia oryzae*) مؤثر بود (Arellano *et al*., 2021). در تحقیقی دیگر که برای پوشش‌دار کردن بذر ذرت از سیلیکون استفاده شد، نتایج نشان داد که سیلیکون سبب افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گردید (Rodrigues *et al*., 2019).

با توجه به آنکه از معرفی گیاه کاملینا برای کاشت در مناطق مختلف ایران به ویژه در دیمزارها کم‌تر از یک دهه نمی‌گذرد، لذا تحقیقات اندکی بر روی این گیاه در ایران انجام گرفته است. بنابراین، هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف سیلیکون بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه کاملینا در شدت‌های مختلف تنش خشکی در شرایط آزمایشگاهی بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۴۰۰ در آزمایشگاه بذر در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی واقع در شهر کرمانشاه به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل دو ژنوتیپ کاملینا (رقم سهیل و لاین-۸۴)، سطوح خشکی چهار سطح پتانسیل اسمزی (۰، ۳-، ۶- و ۹- بار) و پنج سطح غلظت‌های سیلیکون (صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌مولار) بودند. بنابراین، آزمایش شامل ۱۲۰ واحد آزمایشی (۱۲۰ پتری‌دیش ۹ سانتی‌متری) بود. قبل از انجام آزمایش تمام ظروف، کاغذ صافی‌ها و همچنین بذرها توسط هیپوکلریت سدیم به مدت ۶۰ ثانیه ضدعفونی شده (Edalatifard *et al*., 2014) و سپس سه مرتبه با آب مقطر آبکشی شدند. کف هر پتری‌دیش ابتدا یک کاغذ صافی قرار گرفت سپس ۵۰ عدد بذر روی کاغذ صافی توزیع گردید. سپس ۱۰ میلی‌لیتر محلول مربوطه ریخته شد (Khaeim *et al*., 2022). هر محلول دارای پتانسیل اسمزی مشخص و غلظت سیلیکون مشخصی بود. برای تأمین پتانسیل اسمزی از پلی اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (PEG 6000) استفاده شد. غلظت‌های مورد نظر برای تأمین پتانسیل اسمزی طبق روش میشل و کافمن (Michel and Kaufmann,. 1973) تهیه شدند (معادله ۱). Ψs: پتانسیل اسمزی بر حسب بار، C: غلظت پلی اتیلن گلایکول بر حسب گرم در کیلوگرم آب، T: درجه حرارت محیط بر حسب سیلسیوس.

$$\Psi s_{(bar)} = -(1.18 \times 10^{-2})\, C - (1.18 \times 10^{-4})\, C2 + (2.67 \times 10^{-4})\, CT + (8.39 \times 10^{-7})\, C^2T \quad (۱)$$

برای سیلیکون از سیلیکات سدیم (ساخت شرکت سیگما) استفاده گردید. با توجه به جرم مولی آن (۱۲۲/۰۶ گرم بر مول)، غلظت‌های مورد نظر سلیکون بدست آمدند. بدین صورت که برای بدست آوردن محلول سیلیکون ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌مولار به ترتیب مقدار ۲۴۴، ۴۸۸، ۷۳۲ و ۹۷۶ میلی‌گرم سیلیکات سدیم در یک لیتر آب مقطر حل شد. برای تیمار سیلیکون صفر (شاهد) نیز از آب مقطر استفاده شد. پتری‌دیش‌ها به ژرمیناتور منتقل شده و با دمای ۱±۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد به مدت ده روز نگه‌داری شدند (ISTA, 2003). روزانه و در یک ساعت مشخص (ساعت ۱۷)، پتری‌دیش‌ها از ژرمیناتور بیرون آورده شده و سریعاً تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر پتری‌دیش در آن روز شمارش شدند. ظهور ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر به عنوان معیاری برای جوانه‌زنی بذر در نظر گرفته شد (Alen *et al*., 1985). بعد از ده روز، پتری‌دیش‌ها از ژرمیناتور خارج شده و ویژگی‌های مورد نظر به شرح زیر اندازه‌گیری شدند:

طول گیاهچه: بر حسب میلی‌متر طول ساقه‌چه و ریشه‌چه اندازه گیری شد. سپس مجموع طول ریشه‌چه و ساقه‌چه به عنوان طول گیاهچه در نظر گرفته شد.

وزن خشک گیاهچه: گیاهچه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۲±۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس با ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شدند (AOSA, 1993).

درصد جوانه‌زنی نهایی: درصد جوانه‌زنی از طریق تعداد بذرهای جوانه‌زده در روز آخر آزمایش (روز دهم) و مطابق رابطه (۲) محاسبه گردید (ISTA, 2006).

$$\text{درصد جوانه‌زنی نهایی} = \text{(تعداد کل بذرها / تعداد بذرهای جوانه‌زده)} \times ۱۰۰ \quad (۲)$$

سرعت جوانه‌زنی: شمارش بذرهای جوانه‌زده به صورت روزانه در ده روز انجام گرفت. با استفاده از معادله (۳) سرعت جوانه‌زنی بر حسب تعداد بذر جوانه زده در روز محاسبه شد (Maguire, 1962). در این رابطه GR سرعت جوانه‌زنی، N_i تعداد بذور جوانه زده در هر روز، T_i تعداد روزهای سپری شده از شروع آزمایش بود.

$$GR = \sum (N_i / T_i) \qquad (۳)$$

متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی: شمارش بذرهای جوانه‌زده به صورت روزانه در ده روز انجام گرفت. برای تعیین متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی از معادله (۴) استفاده شد (Ellis and Roberts, 1981). در این معادله، MTG متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی، N تعداد بذوری که در D روز جوانه زده‌اند، D تعداد روزهای پس از شروع جوانه‌زنی، ∑N تعداد کل بذرهای جوانه‌زده می‌باشد.

$$MTG = [\sum(D \times N)] / \sum N \qquad (۴)$$

شاخص طولی بنیه گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه: به ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه گردید (Rahnama-Ghahfarokhi et al., 2007).

(۵) شاخص طولی بنیه گیاهچه = درصد جوانه‌زنی نهایی × طول گیاهچه

(۶) شاخص وزنی بنیه گیاهچه = درصد جوانه‌زنی نهایی × وزن گیاهچه

ضریب آلومتریک وزن خشک ساقه‌چه به ریشه‌چه: این ضریب رابطه بین قسمت‌های هوایی و ریشه گیاهچه بر اساس وزن خشک آن‌ها را نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه (۷) بدست آمد (Gardner et al., 1999).

(۷) ضریب آلومتریک = وزن خشک ساقه‌چه / وزن خشک ریشه‌چه

داده‌های بدست آمده، ابتدا توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون کولموگروف – اسمیرنوف از نظر نرمال بودن، مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین اثرهای ساده با کمک نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین اثرهای متقابل با نرم‌افزار آماری MSTATC انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($P\leq0.05$) انجام گرفت. برای رسم نمودارها نیز از نرم افزار Excel استفاده گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی بذر: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان دهنده تأثیر خشکی، ژنوتیپ، سیلیکون و اثر متقابل ژنوتیپ× خشکی بر درصد جوانه‌زنی بذر کاملینا معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود (جدول ۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین صفات اثر متقابل تنش خشکی × ژنوتیپ کاملینا (شکل A ۱)، با افزایش شدت تنش خشکی، درصد جوانه‌زنی بذر در هر دو ژنوتیپ کاهش پیدا کرد به طوری که در سطوح ۳-، ۶- و ۹- بار به طور میانگین به ترتیب ۵ ، ۱۶ و ۳۶ درصد نسبت به تیمار شاهد، درصد جوانه‌زنی بذر کاهش یافت. مرحله جوانه‌زنی بذر، مرحله حساس و مهمی است که می‌تواند با استقرار مطلوب گیاهچه‌ها، در فرآیند تولید محصول زراعی نقش مهمی ایفا نماید (Rahimi, *et al*., 2018). کاهش مولفه های جوانه‌زنی (درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی و...) در محیط‌های اسمزی را می‌توان به کاهش سرعت و میزان جذب اولیه آب و نیز اثر منفی پتانسیل‌های اسمزی پایین بر فرآیندهای بیوشیمیایی و متابولیسم جوانه‌زنی بذر نسبت داد (Poudineh *et al*., 2018). نتایج حاصل با نتایج تأثیر تنش خشکی در گیاه سوروف مطابقت دارد (Wu *et al*., 2019).

جدول۱- میانگین مربعات اثرهای ژنوتیپ، خشکی و سیلیکون روی خصوصیات جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه کاملینا

Table 1- Mean squares of the effects of genotype, drought and silicon on seed germination characteristics and seedling growth of camelina

منابع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی mean time to germination	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	طول گیاهچه Seedling length	شاخص طولی بنیه گیاهچه seedling vigor length index	وزن خشک گیاهچه Seedling dry weight	شاخص وزنی بنیه گیاهچه seedling vigor weight index	ضریب آلومتری وزن ساقه‌چه به ریشه‌چه Allometric coefficient of plumule to radicle weight
ژنوتیپ (G)	1	208^{**}	0.039^{ns}	11.37^{**}	0.132^{ns}	3641^{*}	0.023^{ns}	0.059^{**}	0.113^{ns}
خشکی (D)	3	7720^{**}	11.27^{**}	2199^{**}	37.178^{**}	468131^{**}	3.25^{**}	5.162^{**}	6.859^{**}
G×D	3	127^{**}	0.023^{ns}	6.72^{**}	0.071^{ns}	1989^{ns}	0.024^{*}	0.021^{*}	0.079^{ns}
سیلیکون (Si)	4	106^{**}	0.104^{**}	20.61^{**}	6.284^{**}	65549^{**}	0.925^{**}	0.974^{**}	2.261^{**}
Si×G	4	3.11^{ns}	0.005^{ns}	0.206^{ns}	0.060^{ns}	721^{ns}	0.017^{ns}	0.014^{ns}	0.079^{*}
Si×D	12	13.15^{ns}	0.008^{ns}	0.561^{ns}	1.030^{**}	11029^{**}	0.132^{**}	0.135^{**}	0.434^{**}
G×D×Si	12	4.87^{ns}	0.008^{ns}	0.399^{ns}	0.040^{ns}	313^{ns}	0.007^{ns}	0.007^{ns}	0.039^{ns}
خطا (Error)	80	14.2	0.011	0.721	0.090	907	0.008	0.007	0.030
CV (%)		4.43	3.92	3.48	13.37	14.68	9.16	9.78	4.98

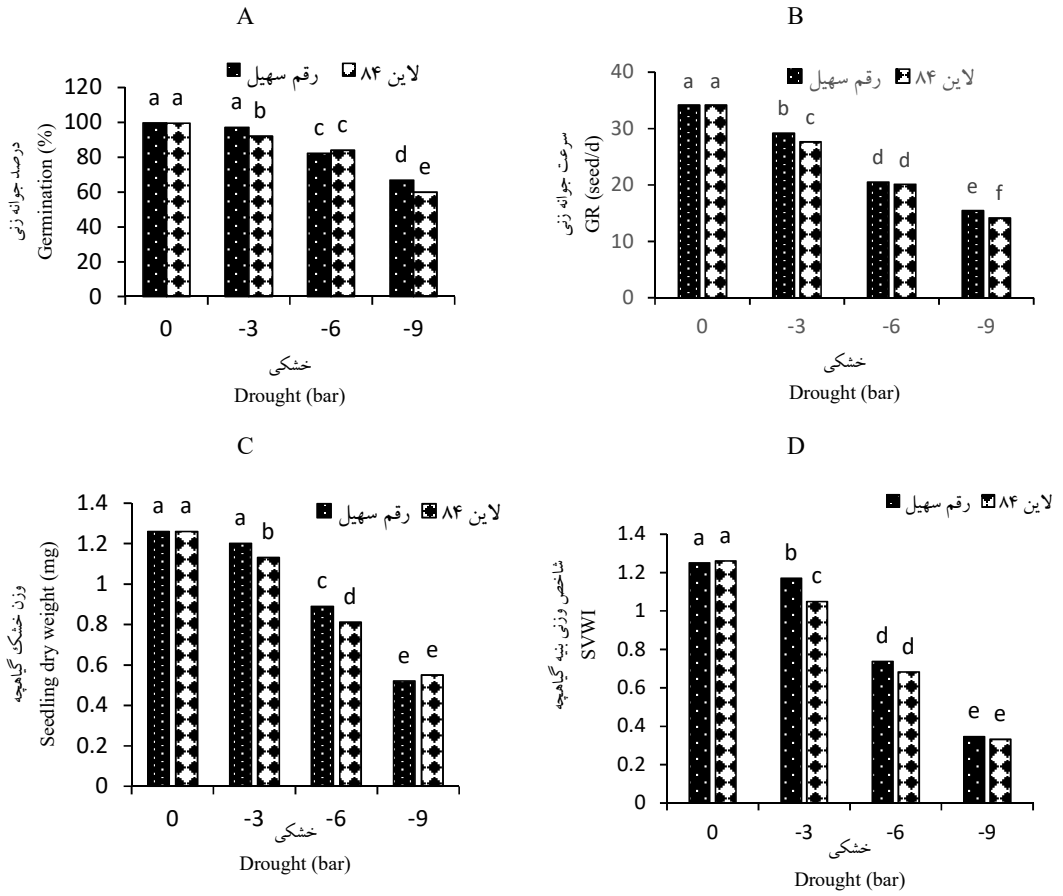
ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ ٪.

ns, * and **: non- significant, significant at the 5 and 1% level of probability, respectively.

نتایج مقایسه میانگین غلظت‌های سیلیکون از نظر درصد جوانه‌زنی بذر نشان داد بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در محلول ۸ میلی‌مولار سیلیکون به مقدار ۸۷/۵۸ درصد مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۶ میلی مولار (۸۶/۵۸ درصد) نداشت. با افزایش غلظت سیلیکون، درصد جوانه‌زنی بذر افزایش یافت. به طوری که غلظت‌های ۲، ۴ ، ۶ و ۸ میلی مولار به ترتیب درصد جوانه‌زنی ۱/۸۲، ۳/۷۵، ۵/۱۵ و ۶/۳۵ درصد نسبت به تیمار شاهد باعث افزایش درصد جوانه‌زنی شد (شکل A ۲).

متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر: نتایج تجزیه وار یانس داده ها نشان دهنده تأثیر معنی‌دار ($P\leq0.01$) خشکی و سیلیکون بر متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر کاملینا بود (جدول۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها سطوح تنش خشکی، با افزایش شدت تنش خشکی، میانگین زمان جوانه‌زنی افزایش پیدا کرد. به طوری که در تیمارهای ۳-، ۶- و ۹- بار به ترتیب ۱۷ ، ۵۴ و ۶۴ درصد نسبت به تیمار شاهد، میانگین زمان جوانه‌زنی افزایش یافت (شکل۳). شایان ذکر است که مقدار عددی کم‌تر در این صفت، مطلوب‌تر است. آخوندی (Akhundi, 2010) گزارش کرد که متوسط زمان جوانه‌زنی، با افزایش شدت تنش خشکی افزایش یافت که با نتایج به دست آمده از این تحقیق مطابقت دارد. زمان لازم جهت سبز شدن، شاخص خوبی از نظر قدرت بذر می‌باشد (Rostaei *et al*., 2003). این امر خصوصاً در شرایط کم

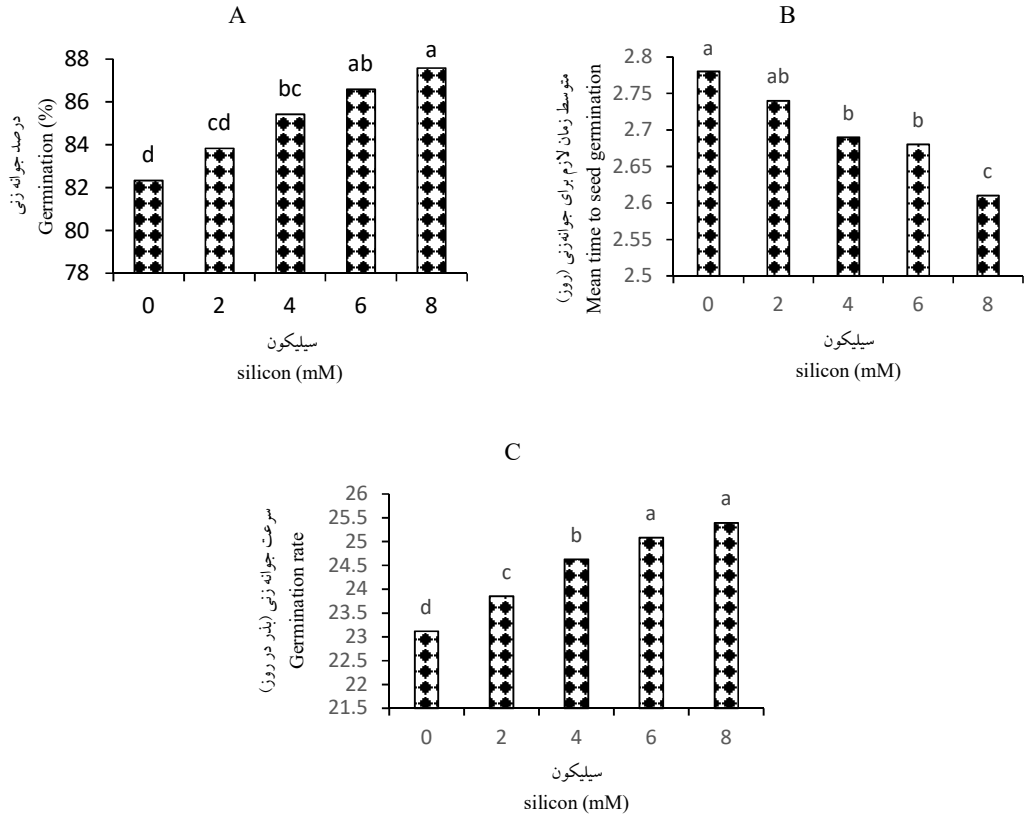
رطوبت در استقرار سریع گیاهچه اهمیت دارد (Irannejad and Shahbazian,. 2004). تنش خشکی با محدود کردن جذب آب توسط بذر و حرکت و انتقال ذخایر بذر به جنین، سرعت جوانه‌زنی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Fernandez *et al*., 1992).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل ژنوتیپ کاملینا × خشکی از نظر درصد جوانه‌زنی بذر (A)، سرعت جوانه‌زنی بذر (B)، وزن خشک گیاهچه (C) و شاخص وزنی بنیه گیاهچه (D) (P≤0.05)

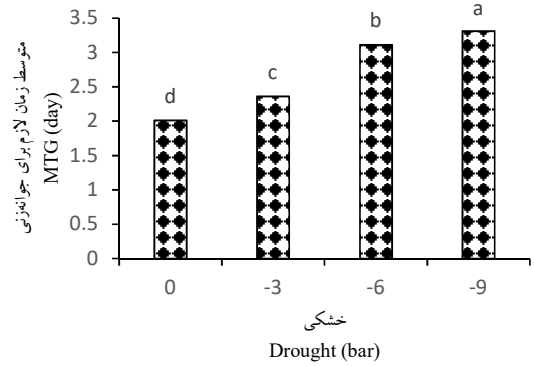
Figure 1- Mean comparison of camelina genotype × drought interaction in terms of seed germination percentage (A), germination rate (B), seedling dry matter (C) and seedling vigor weight index (D) (P≤0.05)

نتایج مقایسه میانگین اثر سیلیکون بر متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر نشان داد بیش‌ترین مقدار این صفت در تیمار شاهد (بدون سیلیکون) به مقدار ۲/۷۸ روز مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار محلول ۲ میلی‌مولار نداشت. کم‌ترین میانگین زمان جوانه‌زنی هم مربوط به تیمار ۸ میلی‌مولار سیلیکون بود. با افزایش غلظت سیلیکون، میانگین زمان جوانه‌زنی کاهش یافت. به طور میانگین در تیمارهای ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌مولار سیلیکون نسبت به تیمار شاهد (بدون سیلیکون)، میانگین زمان جوانه‌زنی به ترتیب ۱/۴۵ ، ۳/۳۵ ، ۳/۷۵ و ۶/۵ درصد کاهش یافت (شکل B ۲). در کاملینای پاییزه، کوتاه بودن مدت زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر، سبب رشد سریع‌تر گیاهچه و متعاقباً تسریع در به حالت روزت رفتن و مقاومت در برابر سرمای زمستانه می‌شود (Berti et al., 2016).



شکل ۲- مقایسه میانگین سطوح سیلیکون از نظر درصد جوانه‌زنی بذر (A)، متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی (B) و سرعت جوانه‌زنی بذر (C) ($P\leq0.05$)

Figure 2- Mean comparison of silicon levels in terms of seed germination percentage (A), mean time to germination, MTG (B) and germination rate, GR (C) in camelina ($P\leq0.05$)



شکل۳- مقایسه میانگین سطوح خشکی از نظر متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر کاملینا ($P\leq0.05$)

Figure 3. Mean comparison of drought levels in terms of mean time to seed germination in camelina ($P\leq0.05$)

سرعت جوانه‌زنی بذر: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان دهنده تأثیر معنی‌دار ($P\leq0.01$) ژنوتیپ، تنش خشکی، سیلیکون و اثر متقابل ژنوتیپ×خشکی بر سرعت جوانه زنی بذر کاملینا بود (جدول۱). نتایج مقایسه میانگین

اثر متقابل ژنوتیپ×خشکی نشان داد که در رقم سهیل در تیمار های ۳-، ۶- و ۹- بار به ترتیب ۱۴/۵ ، ۴۰ و ۵۵ درصد و در لاین-۸۴ به ترتیب ۱۹، ۴۱ و ۵۸ درصد نسبت به تیمار شاهد سرعت جوانه‌زنی کاهش یافت. رقم سهیل در شرایط تنش خشکی دارای سرعت جوانه‌زنی بیش‌تری از لاین-۸۴ بود (شکل B ۱). سرعت جوانه‌زنی یکی از شاخص‌های ارزیابی تحمل به تنش خشکی است، به طوری که ارقام دارای سرعت جوانه‌زنی بیش‌تر، تحت شرایط خشکی از شانس بیش‌تری برای سبزشدن برخوردارند (Leport *et al*., 1999). به نظر می‌رسد که عامل بیش‌تر بودن سرعت جوانه‌زنی در بعضی از ژنوتیپ‌ها، مربوط به سرعت بیش‌تر جذب آب و آماس بذر آن‌ها است (Marchner, 1995). اگر جوانه‌زنی و به دنبال آن توسعه ریشه به سرعت انجام شود، احتمال بقای گیاهچه به علت افزایش احتمال جذب رطوبت از عمق بیش‌تری از خاک زیادتر می‌شود. از آنجایی که تنش اسمزی موجب عدم دسترسی بذر به آب می‌گردد، بنابراین، افزایش تنش موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی بذر می‌گردد. کاهش جذب آب و متعاقب آن کاهش فعالیت های آنزیمی مربوط به فرآیند های بیوشیمیایی جوانه‌زنی، علت اصلی کاهش سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش خشکی است (Malik *et al*., 1986). در سطوح بالای تنش خشکی، آسیب‌های احتمالی ناشی از تخریب ساختمان سه بعدی آنزیم‌ها می‌تواند یکی از دلایل کاهش سرعت جوانه‌زنی باشد (Bradford *et al*., 1995).

مقایسه میانگین سطوح سیلیکون از نظر سرعت جوانه‌زنی بذر کاملینا نشان داد که بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی در ۸ میلی‌مولار سیلیکون (به مقدار ۲۵/۳۹ بذر در روز) مشاهده شد که اختلاف معنی داری با تیمار ۶ میلی‌مولار (۲۵/۰۸ بذر در روز) نداشت. کم‌ترین سرعت جوانه‌زنی روزانه هم مربوط به تیمار شاهد (به مقدار ۲۳/۱۲ بذر در روز) بود. سیلیکون باعث افزایش سرعت جوانه‌زنی شد، به طوری که در غلظت‌های ۲ ، ۴ ، ۶ و ۸ میلی‌مولار به ترتیب ۳ ، ۶/۵ ، ۸/۵ و ۱۰ درصد نسبت به تیمار شاهد سرعت جوانه‌زنی افزایش یافت (شکل C ۲).

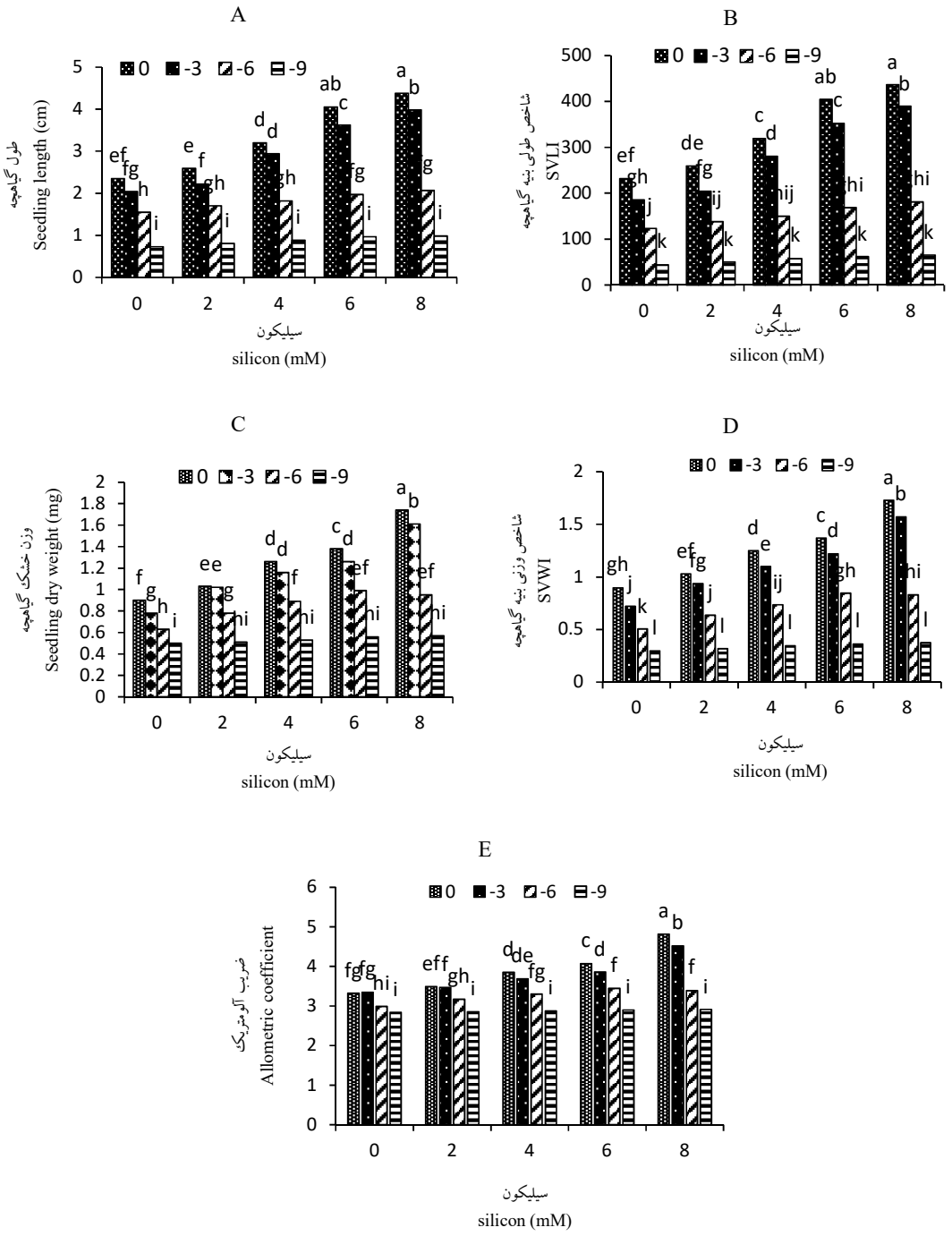
طول گیاهچه: تجزیه واریانس نشان دهنده تأثیر معنی‌دار ($P\leq0.01$) اثرهای ساده خشکی، سیلیکون و اثر متقابل خشکی×سیلیکون بود (جدول۱). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سیلیکون×خشکی نشان داد که بیش‌ترین طول گیاهچه در ۸ میلی‌مولار سیلیکون و بدون تنش خشکی به مقدار ۴/۳۸ سانتی‌متر مشاهده شد که اختلاف معنی داری با تیمار ۶ میلی‌مولار بدون تنش خشکی نداشت. با افزایش شدت خشکی و کاهش غلظت سیلیکون، طول گیاهچه کاهش یافت. در تیمارهای ۳-، ۶- و ۹- بار به ترتیب طول گیاهچه ۱۰/۵۵ ،۴۵ و ۷۳/۵۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. همچنین در تیمارهای ۲ ، ۴ ،۶ و ۸ میلی‌مولار سیلیکون نسبت به تیمار بدون سیلیکون، طول گیاهچه به ترتیب ۹/۶۵، ۳۳,۱۵، ۵۹/۶۵ و ۷۲ درصد افزایش یافت (شکل A ۴). طول گیاهچه معیاری از بنیه گیاهچه محسوب می‌شود. در بسیاری از گونه‌های گیاهی، همبستگی بین طول گیاهچه و شاخص بنیه گیاهچه به اثبات رسیده است (Hampton and Tekrony, 1995). پتانسیل اسمزی بالاتر سبب سنتز بیش‌تر ترکیبات با وزن مولکولی پایین مانند پرولین می‌شود و از سنتز ترکیبات با وزن مولکولی بالاتر نظیر پروتئین‌ها می‌کاهد (Yamamato *et al*., 1997). لذا، با افزایش پتانسیل اسمزی، به دلیل افزایش سنتز مولکول‌های با وزن مولکولی پایین‌تر و کاهش سنتز ترکیبات با وزن مولکولی بالاتر، وزن تر و خشک گیاهچه کاهش می‌یابد.

شاخص طولی بنیه گیاهچه: نتایج تجزیه واریانس نشان دهنده تأثیر معنی‌دار ($P\leq0.01$) خشکی، سیلیکون و اثر متقابل خشکی×سیلیکون و تاثیر معنی‌دار ($P\leq0.05$) ژنوتیپ بر شاخص طولی بنیه گیاهچه بود (جدول۱). مقایسه میانگین اثر متقابل سیلیکون×خشکی نشان داد که بیش‌ترین شاخص طولی بنیه گیاهچه در تیمار ۸ میلی‌مولار سیلیکون و بدون

تنش خشکی (به مقدار ۴۳۶/۴) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۶ میلی‌مولار سیلیکون × بدون تنش خشکی نداشت. کم‌ترین شاخص طولی بنیه هم مربوط به تیمار خشکی ۹- بار و بدون سیلیکون بود. با افزایش شدت خشکی، شاخص طولی بنیه گیاهچه کاهش یافت، به طور میانگین در تیمارهای خشکی ۳-،۶- و ۹- بار به ترتیب شاخص طولی بنیه گیاهچه ۱۴/۴۵، ۵۴ و ۸۳ در صد کاهش یافت. همچنین با افزایش غلظت سیلیکون، شاخص طولی بنیه گیاهچه افزایش یافت. به طور میانگین در تیمارهای ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌مولار سیلیکون نسبت به تیمار شاهد، شاخص طولی بنیه گیاهچه به ترتیب ۱۱/۳۵، ۳۷/۸۵، ۶۸/۳ و ۸۳ درصد افزایش یافت (شکل B ۴). شاخص بنیه گیاهچه معرف درصد و پتانسیل جوانه‌زنی بذر است. هر چه کیفیت بذر پایین‌تر باشد، درصد جوانه‌زنی نیز پایین‌تر و شاخص بنیه گیاهچه کاهش می‌یابد (Azad and Toubeh, 2000). سید احمدی (Seyed ahmadi,. 2013) در تحقیق بر روی کلزا، کاهش ۳۶ درصدی بنیه گیاهچه در اثر افزایش تنش را گزارش کرد. همچنین عطاردی و همکاران (Atarodi *et al*., 2012)، کاهش بنیه گیاهچه تحت تنش خشکی را گزارش نمودند.

وزن خشک گیاهچه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای ساده خشکی، سیلیکون و اثر متقابل خشکی×سیلیکون بر روی وزن خشک گیاهچه معنی‌دار ($P\leq0.01$) بودند. همچنین اثر ژنوتیپ×خشکی نیز بر روی این صفت معنی‌دار ($P\leq0.05$) بود (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر ژنوتیپ×خشکی نشان داد که بیش‌ترین وزن خشک گیاهچه در شرایط بدون تنش خشکی در رقم سهیل و لاین-۸۴ (هر دو به مقدار ۱/۲۶ گرم) مشاهده شد. کم‌ترین وزن خشک گیاهچه هم مربوط به تیمار خشکی ۹- بار در رقم سهیل (به مقدار ۰/۵۲ گرم) بود. با افزایش پتانسیل اسمزی، وزن خشک گیاهچه کاهش یافت (شکل C ۱). کافی و همکاران (Kafi *et al* ,. 2005) نیز بیان کردند که با کاهش پتانسیل آب، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه کاهش یافت. در پژوهشی که سطوح تنش اسمزی را روی بذر کاملینا اعمال نمودند آستانه تحمل به خشکی در مرحله جوانه‌زنی را ۰/۷۵- مگاپاسکال (معادل ۷/۵- بار) معرفی کردند. (Hosseini Sanehkoori *et al*., 2021). دی و کار (De and Kar, 1995) در گیاه ماش بیان کردند در شرایط خشکی، مقدار پروتئین‌های دیواره که در طویل شدن و رشد سلول نقش دارند کاهش یافته اما برخی ترکیبات پکتینی که سبب نرم شدن دیواره سلول می‌شوند افزایش می‌یابد. مقایسه میانگین اثر خشکی×سیلیکون نشان داد که با افزایش غلظت سیلیکون، وزن خشک گیاهچه افزایش یافت. همچنین با افزایش شدت تنش، وزن خشک گیاهچه کاهش یافت. بیش‌ترین مقدار وزن خشک گیاهچه در تیمار ۸ میلی مولار سیلیکون در شرایط بدون تنش خشکی (به مقدار ۱/۷۴ گرم) مشاهده شد (شکل C ۴).

شاخص وزنی بنیه گیاهچه: تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده سیلیکون و تنش خشکی و اثر متقابل سیلیکون × تنش خشکی ($P\leq0.01$) و اثر متقابل ژنوتیپ×تنش خشکی ($P\leq0.05$) بر شاخص وزنی بنیه گیاهچه معنی‌دار شدند (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار این شاخص در تیمار شاهد و محلول ۸ میلی‌مولار سیلیکون به مقدار ۱/۷۳ به دست آمد. با افزایش شدت تنش خشکی، شاخص وزنی بنیه گیاهچه کاهش پیدا کرد. اما با افزایش غلظت سیلیکون، این صفت افزایش یافت (شکل D۴). در پژوهشی، کاهش بنیه بذر در گیاه سویا در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Vieira et al., 1992). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی × ژنوتیپ نشان داد که بیش‌ترین شاخص وزنی بنیه گیاهچه در رقم سهیل و لاین-۸۴ در تیمار بدون تنش خشکی مشاهده شد. با افزایش شدت تنش در هر دو ژنوتیپ، شاخص وزنی بنیه گیاهچه کاهش یافت (شکل D۱). بذرهای دارای کیفیت پایین‌تر، از شاخص بنیه بذر کمتری برخوردارند.



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل خشکی× سیلیکون از نظر طول گیاهچه (A)، شاخص طولی بنیه گیاهچه (B)، وزن خشک گیاهچه (C)، شاخص وزنی بنیه گیاهچه (D) و ضریب آلومتریک (E) در کاملینا (P≤0.05)

Figure (4) Mean comparison of drought × silicon interaction in terms of seedling length (A), seedling vigor length index, SVLI (B), seedling dry weight (C), seedling vigor weight index (D) and allometric coefficient (E) in camelna (P≤0.05)

همچنین، بذرهای مرغوب به دلیل ذخایر و اندوخته غذایی بیشتر، دارای شاخص بنیه بیش تری هستند (Sinaki *et al*., 2007). ساختار ژنتیکی بذر، شرایط تغذیه‌ای و محیطی گیاه مادری، شرایط مرحله رسیدگی، اندازه و وزن مخصوص بذر، خسارت مکانیکی و زوال بذر از عوامل مؤثر بر بنیه بذر می‌باشند (Khoshsokhan *et al*., 2012). یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی موثر بر بنیه بذر، وقوع تنش رطوبتی روی گیاه مادری در حین تشکیل بذر است که باعث ایجاد بذرهای چروکیده و کوچک شده که قدرت گیاهچه را کاهش می‌دهد (Szira *et al*., 2008). بذوری که در شرایط تنش محیطی از بنیه بالاتری برخوردار باشند در یک زمان معین، مقدار ماده خشک بیش‌تری تولید کرده و از این طریق، قدرت استقرار خود را در محیط بهبود می‌دهند (Soltani *et al*., 2009).

ضریب آلومتریک: تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای تنش خشکی و سیلیکون و اثر متقابل آنها بر روی ضریب آلومتریک معنی‌دار ($P\leq0.01$) شدند (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار ضریب آلومتریک، در تیمار اثر متقابل شرایط بدون تنش خشکی × محلول ۸ میلی‌مولار سیلیکون به مقدار ۴/۸۲ بدست آمد. با افزایش غلظت سیلیکون، ضریب آلومتریک افزایش پیدا کرد به طوری که غلظت های ۲، ۴، ۶ و ۸ میلی‌مولار سیلیکون به ترتیب باعث افزایش ۳/۸۴، ۹/۶۱، ۱۴/۱ و ۲۵/۳۲ درصدی ضریب آلومتریک شدند. اما با افزایش شدت تنش خشکی، ضریب آلومتریک کاهش یافت به طوری که تنش ۳-، ۶- و ۹- بار به ترتیب باعث کاهش ۳/۵۸، ۱۶/۸۷ و ۲۶/۵۹ درصدی ضریب آلومتریک شدند (شکل 4E). کاهش رشد گیاهچه در پاسخ به افزایش شدت خشکی، به سبب کمبود آب و عدم جذب متوازن مواد غذایی بوده که این حالت ممکن است همه جنبه‌های متابولیسم گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Gupta *et al* 1993). با تشدید خشکی، سرعت رشد ریشه کاهش می‌یابد البته رشد ریشه نسبت به قسمت‌های هوایی گیاه کم‌تر تحت تاثیر قرار گرفته به طوری که نسبت کلی اندام‌های هوایی به ریشه کاهش می‌یابد (Zarei *et al*., 2007).

نتیجه‌گیری نهایی

به طور کلی، نتایج آزمایش حاضر نشان داد که با افزایش تنش خشکی، درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، شاخص طولی بنیه گیاهچه، شاخص وزنی بنیه گیاهچه، ضریب آلومتری وزن خشک ساقه‌چه به ریشه‌چه، طول و وزن خشک گیاهچه کاهش یافتند، اما در مقابل متوسط زمان لازم برای جوانه‌زنی بذر کاملینا افزایش پیدا کرد. کاربرد سیلیکون سبب افزایش در صد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، شاخص طولی بنیه گیاهچه، شاخص وزنی بنیه گیاهچه، ضریب آلومتری وزن خشک ساقه‌چه به ریشه‌چه، طول و وزن خشک گیاهچه شد. همچنین نتایج نشان داد که در بذرهای تیمار شده با سیلیکون در مقایسه با بذرهای بدون استفاده از سیلیکون (شاهد)، تحمل خشکی افزایش یافت. در شرایط خشکی، بیش‌ترین افزایش در ویژگی‌های جوانه‌زنی، در تیمار سیلیکون با غلظت ۸ میلی‌مولار به دست آمد که باعث بهبود وضعیت گیاهچه کاملینا شد. با توجه به اهمیت جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه در زراعت موفق (به ویژه در شرایط دیم)، یافتن راهکاری جهت تقویت بذر بسیار سودمند است. با توجه به نتایج آزمایش حاضر، به نظر می‌رسد کاربرد سیلیکون بتواند در تکنولوژی بذر کاملینا و پوشش‌دار کردن آن، برای کاهش اثرات سوء خشکی در مرحله جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه مؤثر باشد. این روش، افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر، تولید گیاهچه قوی‌تر و در نهایت استقرار موفق گیاهچه کاملینا در شرایط تنش خشکی را به دنبال خواهد داشت.

منابع

Reference

Akhundi, M. 2010. Investigating the effect of PEG stress on alfalfa genotypes in water culture environment, 11th Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding of Iran. Shahid Beheshti University. (In Persian)

Alen, S.G., A.K. Dobrenz, M.H. Schonhorst, and J.E. stoner. 1985. Heritability of NaCl tolerance in germination of alfalfa seed. J. Agron. 77: 99-101. Doi: 10.2134/agronj1985.00021962007700010023x.

Arellano, A.D.V., G.M. Da Silva, E. Guatimosim, K.R. Dorneles, L.G. Moreira, and L.J. Dallagnol. 2021. Seeds Coated with Trichoderma Atroviride and Soil Amended with Silicon Improve the Resistance of Lolium Multiflorum Against Pyricularia Oryzae. Biol. Control. 154: 104499. Doi: 10.1016/j.biocontrol.2020.104499.

Association of Official Seed Analysts (AOSA). 1993. Seed Vigor Testing Journal of Science. 12(1): 1-19.

Atarodi, H., H. Irannejad, A. Shiranirad, R. Amiri, and G.H. Akbari. 2012. Effects of Drought Stress and Planting Dates on Seedling Emergence, Plant Growth and Seed Vigour of Produced Seeds in Canola (*Brassica napus*) Cultivars. Iranian Journal of Field Crop Science. 42 (1): 71-80. Dor: 20.1001.1.20084811.1390.42.1.8.4 (In Persian)

Azad, F., and A. Toubeh. 2000. The relationship between wheat germination efficiency and dry matter production and some other factors in laboratory culture and vegetation. Summary of 6th Iranian Conference on Plant Breeding (Babolsar). Mazandaran University. (In Persian)

Balakhnina, T., and A. Borkowska. 2013. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. Int. Agrophys. 27(2): 225-232. Doi: 10.2478/v10247-012-0089-4.

Berti, M., R. Gesch, C. Eynck, J. Anderson, and S. Cermak. 2016. Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. Ind. Crops. Prod. 94: 690-710. Doi: 10.1016/j.indcrop.2016.09.034.

Biju, S., S. Fuentes, and D. Gupta. 2017. Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. Plant. Physiol. Biochem (PPB). 119: 250-264. Doi: 10.1016/j.plaphy.2017.09.001.

Bradford, K.J. 1995. Water Relations in Seed Germination. Pp 351-396. *In* J. Kigel, and G. Galili (Eds.) Seed Development and Germination. Marcel Dekker, Inc, New York.

Chaudhry, S., and G. P. S. Sidhu. 2022. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: A comprehensive review. Plant. Cell. Rep. 41(1): 1-31. Doi: 10.1007/s00299-021-02759-5

De, R., and R. K. Kar. 1995. Seed germination and seedling growth of mung bean (*Vigna radiata*) under water stress included by PEG-6000. Seed Sci. Technol. 23: 301-304.

Edalatifard, L., S.A.M. Modares Sanavy, and H. Askari. 2014. The optimum condition under light and Media for Seed germination of *Withania coagulans*. Intl. J. Farm Allied Sci. 3(7): 722-728.

Ellis, R.H., and E.H. Roberts. 1981. The quantification of aging and survival in orthodox seeds. Seed Sci. Technol. 9: 377-409.

Fernandez, G.C.J. 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. Pp 257-270. In C. G. Kuo(Ed.). Proc. Int. Symp. Adaptation of Food Crops to Temperature and Water Stress, Taiwan. 13-16 Aug. 1992. Shanhua, Taiwan. Doi: 10.22001/wvc.72511.

Gardner, F.P., R.B. Pearce, and R.L. Mitchell. 1999. Physiology of crop plants. Translated by Koocheki, A. and G. Sarmadnia. Jahad Daneshgahi Press, Mashhad. (In Persian)

Gharib Eshghi, A., and M.H. Nemati. 2012. Technical publication of rapeseed planting, planting and planting. Ministry of Agricultural Jihad, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Extension and Education Vice-Chancellor. Agricultural Jihad Organization of Zanjan province, management of agricultural coordination and promotion, Iran. (In Persian)

Ghidoli, M., E. Ponzoni, F. Araniti, D. Miglio, and R. Pilu. 2023. Genetic Improvement of *Camelina sativa* (L.) Crantz: Opportunities and Challenges. Plants. 12(3): 570. Doi: 10.3390/plants12030570.

Guo, Q., L. Meng, P. Mao, and X. Tian. 2013. Role of silicon in alleviating salt-induced toxicity in white clover. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 91(2): 213-216. Doi: 10.1007/s00128-013-1034-3.

Gupta, A. K., J. Singh, N. Kaur, and R. Singh. 1993. Effect of polyethylenglycol-induced water stress on uptake interconversion and transport of sugars in chickpea seedlings. Plant. Physiol. Biochem (PPB). 31:743-747.

Hampton, J.G., and D.M. Tekrony. 1995. Handbook of vigor test methods (3rd. Ed.) ISTA, Zurich, Swirztland

Hosseini Sanehkoori, F., H. Pirdashti, and E. Bakhshandeh. 2021. Quantifying water stress and temperature effects on camelina (*Camelina sativa* L.) seed germination. Environmental and Experimental Botany. 186: 10445. Doi:10.1016/j.envexpbot.2021.104450

International Seed Testing Association (ISTA). 2003. Handbook for Seedling Evaluation (3rd. Ed.). International Seed Testing Association. Zurich, Switzerland.

International Seed Testing Association (ISTA). 2006. International Rules for Seed Testing. ISTA, Basserdorf, Switzerland.

Irannejad, K. and N. Shahbazian. 2004. Resistance of crops to environmental stresses, Karno Publications. (In Persian)

Kafi, M., A. Nizami, H. Hosseini, and A. Masoumi. 2005. Physiological effects of drought stress caused by polyethylene glycol on germination of lentil genotypes. Iranian Journal of Field Crop Science. 3(1):69-80. Doi: 10.22067/gsc.v3i1.1293. (In Persian)

Kameswara Rao, N., Dulloo, M. E., and J. M. Engels. 2017. A review of factors that influence the production of quality seed for long-term conservation in genebanks. Genet. Resour. Crop Evol. 64: 1061-1074. Doi:10.1007/s10722-016-0425-9.

Khaeim, H., Z. Kende, L. Balla, I.C. Gyuricza, A. Eser and Á. Tarnawa. 2022. The Effect of Temperature and Water Stresses on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Sustainability. 14*(7): 3887. Doi. 10.3390/su14073887.

Khoshsokhan, F., M. Babalar, H.R. Chaghazardi and M.R. Fatahi-Moghadam. 2012. Effect of salinity and drought stress on germination indices of two Thymus species. Agronomy Research Moldavia. 45(1):28-35. Doi:10.2478/v10298-012-0003-z.

Leport, N.C., J. Turner, M.D. French, R. Barr, S.L. Duda, D. Dauies, K.H. Tennant, and M. Siddique. 1999. Physiological responses of chickpea genotypes to terminal drought in a Mediterranean-type environment. Eur. J. Agron. 11(3-4):279- 291. Doi:10.1016/S1161-0301(99)00039-8.

Maguire, J.D. 1962. Speed of germination, aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. Crop Sci. 2(2): 176-177. Doi: 10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x.

Malhi, G. S., M. Kaur, and P. Kaushik. 2021. Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. Sustainability. 13(3):1318. Doi: 10.3390/su13031318.

Malik C.P., K. Gupta and S. Sharma. 1986. Effect of water stress on germination and seedling metabolism of gram (*Cicer arietinum* L.). Acta Agronemica Hungarica. 35: 11-16.

Marchner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Ann Bot. 78(4): 527–528. Doi: 10.1006/anbo.1996.0155.

Michel, B.F., and M.R. Kaufmann. 1973. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiol. 51(5): 914-916. Doi: 10.1104/pp.51.5.914.

Nikkhah, H.R., H. Tajali, S.A. Tabatabaei, and M. Taheri. 2022. Evaluation of Yield Stability and Drought Tolerance of Barley Genotypes in Temperate Regions of the Iran. Journal of Crop Breeding. 14(44): 1-17. Dor: 20.1001.1.22286128.1401.14.44.1.8. (In Persian)

Parande, S., G.R. Zamani, M.H.S. Zahan, and M. Ghader. 2013. Effects of silicon application on the yield and component of yield in the common bean (*Phaseolus vulgaris*) under salinity stress. International Journal of Agronomy and Plant Production. 4(7): 1574-1579. Doi:10.22067/gsc.v3i1.1293 (In Persian)

Poudineh, Z., B.A. Fakheri, A.R. Sirosmehr, and S. Shojaei. 2018. Effect of drought stress on the morphology and antioxidant enzymes activity of Foeniculum vulgare cultivars in Sistan. Indian. J. Plant. Physiol. 23: 283-292. Doi:10.1007/s40502-018-0370-z.

Rahimi, A.A., A. Madhaj, and M.M. Majdam. 2018. The study of seed germination and seedling growth of alfalfa (*Medicago sativa* L.) genotypes under the effect of drought stress. Crop Physiol. J. 10(40): 129-144. Dor: 20.1001.1.2008403.1397.10.40.8.4. (In Persian)

Rahnama-Ghahfarokhi, A., and R. Tavakkol-Afshari. 2007. Methods for dormancy breaking and germination of galbanum seeds *(Ferula gummosa)*. Asian J. Plant. Sci. 6(4): 611-616. Doi: 10.3923/ajps.2007.611.616

Rodrigues, L.A., I.C. De Oliveira, G.A. Nogueira, T.R.B. Da Silva, A.c. Da Silva Candido, and C.Z. Alves. 2019. Coating seeds with silicon enhances the corn yield of the second crop. Rev. Caatinga. 32 (4):897-903. Doi: 10.1590/1983-21252019v32n405rc.

Rostaei, M., D. Sadeghzadeh, E. Zadhassan, and Y. Arshad. 2003. Investigating the relationship between traits affecting wheat grain yield using factor analysis in dryland conditions. J. Agric. Knowledge. 13(1):1-10. (In Persian)

Sakihama, Y., M. F. Cohen, S. C. Grace, and H. Yamasaki. 2002. Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. Toxicology. 177: 67-76.

Seyed ahmadi, S.A. 2013. Evaluation of germination and vigor parameters of rapeseed parents seeds resulted from the heat and drought stress at the end of growth season. Crop Physiol. 5(17): 61-75. Dor: 20.1001.1.2008403.1392.5.17.5.0. (In Persian)

Sinaki, J.M., Majidi-Heravan, E., Shirani Rad, A.H., Noor-Mohammadi, G.H. and Zarei, G. 2007. The effects of water deficit during growth stages of canola (*Brasica napus* L.). Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 2: 417-422.

Soltani, E., F. Akram-Ghaderi, and H. Maemar. 2009. The effect of priming on germination components and seedling growth of cotton seeds under drought. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources. 14(5): 9-16. (In Persian)

Srivastava, A. K., J. Suresh Kumar, and P. Suprasanna. 2021. Seed 'primeomics': plants memorize their germination under stress. Biol. Rev. 96(5): 1723-1743. Doi: 10.1111/brv.12722 .

Szira, F., A.F. Balint, A. Borner, and G. Galiba. 2008. Evaluation of drought-related traits and screening methods at different developmental stages in spring barley. J. Agron. Crop Sci. 194: 334-342. Doi: 10.1111/j.1439-037X.2008.00330.x.

Vieira, R. D., D. M. Tekrony, and D. B. Egli. 1992. Effect of drought and defoliation stress in the field of soybean seed germination and vigor. Crop Sci. 32:471-475. Doi: 10.2135/cropsci1992.0011183X003200020037x.

Wu, L.M., Y. Fang, H.N. Yang, and L.Y. Bai. 2019. Effects of drought-stress on seed germination and growth physiology of quinclorac resistant Echinochloa crusgalli. PLos One. 14(4): 1-11. Doi: 10.1371/journal.pone.0214480.

Yamamato, A., J. Turgeon, and J.M. Duich. 1997. Seedling emergence and growth of solid matrix primed Kentucky bluegrass seed. Crop Sci. 37: 225. Doi: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700010039x.

Yang, H., L. Zhao, S. Zhao, J. Wang, and H. Shi. 2017. Biochemical and transcriptomic analyses of drought stress responses of LY1306 tobacco strain. Sci. Rep. 7: 1-10. Doi: 10.1038/s41598-017-17045-2.

Yu Shi, Y., Y. Zhang, H. Yao, J. Wu, H. Sun, and H. Gong. 2014. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. Plant. Physiol. Biochem. (PPB). 78: 27-36. Doi: 10.1016/j.plaphy.2014.02.009 .

Zarei, L., E. Farshadfar, R. Haghparast, R. Rajabi, and M. Mohammadi SarabBadieh. 2007. Evaluation of some indirect traits and indexes to identify drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Asian J. Plant. Sci. 6(8): 1204-1210. Doi: 10.3923/ajps.2007.1204.1210.

Zhang, W., Z. Xie, D. Lang, J. Cui, and X. Zhang. 2017. Beneficial Effects of Silicon on Abiotic Stress Tolerance in Legumes. J. Plant Nutr. 1-33. Doi: 10.1080/01904167.2017.1346127.