

تأثیر استفاده از سیلیسیم بر برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی، عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان (*Helianthus.annus L.*) تحت سطوح مختلف رطوبتی

غلامرضا زمانی^۱، زهره نبی پور^{۲*}، یداله قیصری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶)

چکیده

آب قابل دسترسی، عامل اصلی محدودکننده رشد و تولید محصول در مناطق خشک است. در این راستا به منظور بررسی تأثیر کاربرد سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان تحت سطوح مختلف رطوبتی، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهر گناباد انجام شد. عامل اصلی آبیاری با سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی شامل چهار سطح (سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد نیاز آبی، سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی، سطح رطوبتی ۶۰ درصد نیاز آبی و سطح رطوبتی ۴۰ درصد نیاز آبی) و عامل فرعی زمان مصرف سیلیسیم در چهار سطح (بدون کاربرد (شاهد)، کاربرد در مرحله رویشی، کاربرد در مرحله زایشی، کاربرد در مرحله رویشی و زایشی) بود. نتایج آزمایش نشان داد که کاهش سطح رطوبتی از ۱۰۰ درصد به ۴۰ درصد نیاز آبی موجب کاهش قطر طبق، وزن خشک طبق، شاخص کلروفیل، محتوی نسبی رطوبت، تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، درصد و عملکرد روغن شد؛ به طوری که کمترین مقدار عملکرد دانه (۱۷۳۰/۸ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد بیولوژیک (۱۰۴۵۸/۲۱ کیلوگرم در هکتار) در تیمار سطح رطوبتی ۴۰ درصد نیاز آبی به دست آمد. هم‌چنین کاربرد سیلیسیم تحت سطوح کم آبیاری بر اساس نیاز آبی باعث بهبود اثرات کاهش سطوح رطوبتی در صفات مورد بررسی شد. بیش‌ترین عملکرد دانه (۷۵۷۲/۹۶ کیلوگرم در هکتار) در تیمار سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی و کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی به دست آمد و کمترین مقدار آن (۱۱۹۳/۵۴ کیلوگرم در هکتار) در تیمار سطح رطوبتی ۴۰ درصد نیاز آبی و بدون کاربرد سیلیسیم ثبت گردید. هم‌چنین کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی نسبت به تیمار عدم کاربرد (شاهد) به ترتیب باعث افزایش ۲/۵، ۱/۵ و ۲/۵ برابری عملکرد روغن در سطوح مختلف آبیاری شامل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی شد. به‌طورکلی نتایج نشان داد استفاده از سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی باعث جبران اثرات سوء کاهش سطح رطوبتی در صفات مورد بررسی گردید.

واژه‌های کلیدی: تعداد دانه در طبق، عملکرد دانه، عملکرد روغن، قطر طبق، وزن هزار دانه

زمانی غ.ر.، نبی پور ز.، قیصری ی. ۱۴۰۰. تأثیر استفاده از سیلیسیم بر برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی، عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان (*Helianthus.annus L.*) تحت سطوح مختلف رطوبتی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۹، شماره ۳. صفحه: ۵۷-۷۲.

- ۱- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، ایران
 - ۲- دکتری تخصصی زراعت، ایستگاه تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گناباد، مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، گناباد، ایران (مکاتبه کننده)
 - ۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
- * پست الکترونیک: zohreh.nabipour@yahoo.com

مقدمه

آفتابگردان یکی از دانه‌های روغنی مهم است که در سطح وسیعی از اراضی کشاورزی در دنیا کشت شده و میزان تولید آن حدوداً ۱۰ درصد از سهم بازار دانه‌های روغنی را به خود اختصاص می‌دهد (Zareei Siahbidi *et al.*, 2020). این گیاه به دامنه وسیعی از شرایط محیطی سازگار بوده (Yadollahi *et al.*, 2014) و خاص مناطق گرمسیر با اقلیم خشک و نیمه‌خشک است؛ بنابراین تحت عوامل محدودکننده محیطی مانند کم‌آبی و دمای بالا قرار می‌گیرد (Robert *et al.*, 2016).

کمبود منابع آب یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده رشد و توسعه محصولات کشاورزی در سراسر جهان است که با توجه به تغییرات اقلیمی و گرم شدن هوا طی سال‌های اخیر، به نظر می‌رسد این محدودیت در سال‌های آتی نیز پابرجاست (Yadollahi *et al.*, 2017). ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی که دارد جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود. بنابراین تنش خشکی بحرانی‌ترین و شایع‌ترین عامل غیرزنده‌ای بوده که تولیدات کشاورزی را در این کشور محدود می‌کند و کارایی استفاده از مناطق نیمه‌خشک و دیم را بویژه برای تولید محصولات تابستانه کاهش می‌دهد (Zareei Siahbidi *et al.*, 2020).

آفتابگردان به‌دلیل توانایی جذب آب در لایه‌های عمیق‌تر خاک، یک گیاه نسبتاً متحمل به کم‌آبی محسوب می‌شود (Hussain *et al.*, 2013). شناخت ویژگی‌های مربوط به رشد، عملکرد و همچنین سازگاری این گیاه زراعی به‌ویژه در رابطه با تنش خشکی می‌تواند در گسترش سطح زیر کشت و افزایش عملکرد آن تأثیر مهمی داشته باشد (Zareei Siahbidi *et al.*, 2020). در این رابطه شناخت مراحل حساس این گیاه نسبت به تنش خشکی، ممکن است از طریق اجتناب از آبیاری‌های با حجم بالا و در زمان نامناسب سبب بالا بردن بازدهی استفاده از منابع آب و خاک گردد (Patane *et al.*, 2017). در منابع به اثرات تنش رطوبتی و آبیاری محدود بر بسیاری از صفات فنولوژیک، ریخت‌شناسی، فیزیولوژیک و عملکرد گیاهان اشاره شده است (Zareei Siahbidi *et al.*, 2020; Hussain *et al.*, 2018; Pekcan *et al.*, 2017). عناصر غذایی و آب قابل‌دسترس توسط ریشه گیاه ارتباط نزدیکی با هم دارند؛ به‌طوری‌که روابط آبی تمام فرآیندهای

فیزیولوژیک را که با حلالیت و قابل‌دسترس بودن عناصر غذایی ارتباط دارند، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Pekcan *et al.*, 2016). کمبود آب از طریق کاهش تعرق و سیستم انتقال فعال باعث کاهش نفوذپذیری غشاء، قدرت جذب‌کنندگی ریشه گیاه و جذب عناصر غذایی می‌شود (Hussain *et al.*, 2018). خشکی خاک هم‌چنین سرعت انتشار مواد غذایی را از محیط خاک به سطح جذب‌کننده ریشه کاهش می‌دهد (Hussain *et al.*, 2018). به گزارش پاتانه و همکاران (Patane *et al.*, 2017) بیش‌ترین عملکرد آفتابگردان در تیمار آبیاری کامل به‌دست آمد و آبیاری در زمان گلدهی باعث کاهش معنی‌دار اثر تنش خشکی در گیاه آفتابگردان شد. مبصر و توسلی (Mobasser & Tavassoli, 2013) طی آزمایشی دریافتند که با قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد آفتابگردان صفات عملکردی وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، تعداد برگ، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه در اثر کم‌آبی کاهش معنی‌داری داشتند. مهم‌ترین عامل مرتبط با تولید محصول و افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزیستی، تغذیه صحیح گیاهان است که نقش به‌سزایی در افزایش عملکرد دارد. در همین ارتباط نقش عناصر غذایی نظیر سیلیسیم مورد توجه برخی پژوهشگران تغذیه قرار گرفته است (Trejo *et al.*, 2020; El-Kinany & Nassar., 2019; Gong & Chen, 2012). سیلیسیم بعد از اکسیژن دومین عنصر فراوان در پوسته زمین است که تا ۳۲ درصد از لایه لیتوسفر را پوشش می‌دهد (Manivannan *et al.*, 2016) ولی به‌دلیل این‌که در دسته عناصر ضروری برای رشد گیاهان قرار نگرفته توجه زیادی به نقش بیولوژی آن در گیاه نشده است (Amiri *et al.*, 2014). در طبیعت سیلیسیم عمدتاً به صورت سیلیکات و یا بصورت ترکیب با عناصری مانند پتاسیم، آلومینیوم، آهن، منگنز، کلسیم و سدیم یافت می‌شود (Artyszak, 2018). هم‌چنین در گیاهان سیلیسیم فقط می‌تواند بعنوان مونوسیلیسیک اسید $(\text{Si}(\text{OH})_4)$ جذب و بیش‌تر از طریق آپوپلاست منتقل شود؛ بطور کلی غلظت این عنصر در گیاه بین یک تا ۱۰ درصد کل ماده خشک را شامل می‌شود که این مقدار در درجه اول به ژنوتیپ گیاه و در درجه دوم به ویژگی‌های خاک به‌عنوان منبع تأمین‌کننده سیلیسیم بستگی دارد (Coskun *et al.*, 2019). اخیراً در پژوهش‌های صورت گرفته به اثرات مفید این عنصر بر افزایش تحمل اثرات ناشی از کمبود آب در چندین گونه گیاهی از جمله گوجه فرنگی (Shi *et al.*, 2016)، ذرت (Sayed *et al.*, 2014)، سویا (Shen *et al.*, 2010)، گندم

حفظ محتوی نسبی آب و کاهش نشت مواد سلولی و در نتیجه تداوم جریان انتقال مواد فتوسنتزی دخیله شده به دانه، حفظ جریان فتوسنتز، افزایش میزان مواد فتوسنتزی جاری دانه و در نهایت افزایش وزن دانه و عملکرد می-گردد. آبیلا و همکاران (Abida *et al.*, 2019) گزارش کردند که تجمع اسمولیتها (به عنوان مثال پرولین) و کاهش صفاتی نظیر طول ساقه، طول ریشه، وزن تر و خشک اندام هوایی و عملکرد و صفات مرتبط با آن تحت تیمار تنش خشکی بدون کاربرد سیلیسیم در گیاه ذرت مشاهده شد ولی در تیمارهای کاربرد سیلیسیم و اعمال تنش خشکی به طور قابل توجهی تجمع پرولین کاهش پیدا کرد و افزایش قابل توجهی در سایر صفات مورد بررسی مشاهده شد.

نظر به اینکه شهرستان گناباد در منطقه‌ای کم‌آب و با بارندگی کم واقع شده، لذا با کاربرد سیلیسیم می‌توان اثرات کم‌آبی برای گیاه آفتابگردان که یکی از دانه‌های روغنی با ارزش است را تا حدودی جبران کرد؛ لذا این تحقیق با هدف بررسی اثرات کاربرد سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان تحت سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ به صورت اسپلینت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه‌ای واقع در پنج کیلومتری شهرستان گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۵۳ متر از سطح دریا انجام شد. این شهرستان از لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. در این تحقیق تیمار آبیاری با سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی در چهار سطح رطوبتی شامل سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد نیاز آبی (معادل ۱۰۳۰۰ مترمکعب در هکتار و ۱۲/۸۷ مترمکعب در هر کرت فرعی در مجموع ۲۶ آبیاری)، سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی (معادل ۸۲۴۰ مترمکعب در هکتار و ۱۰/۳۱ مترمکعب در هر کرت فرعی در مجموع ۲۶ آبیاری)، سطح رطوبتی ۶۰ درصد نیاز آبی (معادل ۶۱۸۰ مترمکعب در هکتار و ۷/۷ مترمکعب در هر کرت فرعی در مجموع ۲۶ آبیاری) و سطح رطوبتی ۴۰

(Pei *et al.*, 2010) و برنج (Chen *et al.*, 2011) اشاره شده است، به‌ویژه در زمان بروز تنش‌های محیطی، با افزایش در فعالیت آنزیم‌های ضد اکسند و بالا بردن محتوای اسمولیتها نقش مهمی را در ایجاد مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده در گیاهان ایفا می‌کند (Etesami & Jeong, 2018). گزارش‌های متعددی از کاهش اثرات تنش‌های متعدد از جمله سمیت فلزات سنگین نظیر آهن و منگنز (Coskun *et al.*, 2019)، خشکی (Anitha *et al.*, 2019) و شوری (Al-Murad *et al.*, 2020) با تغذیه مناسب سیلیسیم وجود دارد؛ لیانگ و همکاران (Liang *et al.*, 2007) به این نتیجه رسیدند که کاربرد سیلیسیم سبب رسوب آن در غشاء سلولی و در نتیجه سیلیسی و سخت شدن دیواره سلولی می‌شود. آن‌ها دلیل این امر را در این می‌دانند که سیلیسیوم در درون گیاه یک عنصر غیرمتحرک است و پس از رسوب در داخل سلول به صورت ژل سیلیکا پلیمر شده، در می‌آید و برای گیاه غیرقابل استفاده می‌شود و تنها نقش استحکامی و پایداری خواهد داشت. ما و یاماجی (Ma & Yamaji, 2006) بیان نمودند که سیلیسیوم با رسوب در زیر لایه کوتیکولی (با ضخامت ۰/۱ میکرومتر) برگ و تشکیل لایه دوگانه کوتیکول-سیلیس به ضخامت ۲/۵ میکرومتر و در نتیجه افزایش ضخامت لایه کوتیکول و موم آن باعث کاهش تعرق از سطح برگ و پوست گیاهی که در شرایط تنش خشکی قرار دارد، می‌شود. در نتیجه این عمل محتوی آب گیاه افزایش و توسعه برگی و عملکرد نیز افزایش می‌یابد. بر اساس گزارشات، سودمندی سیلیسیوم در تحمل تنش خشکی مربوط به فعالیت بیش‌تر H^+ -ATPase موجود در غشاء و H^+ -PPase در تونوپلاست و جذب بیش‌تر یون پتاسیم (Liang *et al.*, 2007)، افزایش غلظت داخل سلول و جذب و نگهداری آب (Mobasser & Tavassoli, 2013) و تأثیر بر فعالیت برخی آنزیم‌ها و فرآیندهای فیزیولوژیکی است (El-Kinany & Nassar, 2019). لی و همکاران (Li *et al.*, 2007) بیان نمودند که سیلیسیوم به علت سخت و سیلیسی کردن سلول‌های برگ، باعث افزایش دوام و پایداری غشاء سلول می‌گردد. این امر اولاً از طریق افزایش دوام برگ و طول دوره پر شدن دانه در شرایط تنش امکان رشد و افزایش وزن دانه‌ها را فراهم می‌آورد؛ ثانیاً با اثرگذاری مثبت بر حفظ پایداری غشاء سلول منجر به

اندازه‌گیری شد، سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار داده شد و پس از تمیز کردن با دستمال کاغذی وزن اشباع برگ‌ها اندازه‌گیری و این برگ‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس در آون قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. محتوای نسبی آب برگ بر اساس معادله (۱) محاسبه گردید.

$$RWC = (F_w - D_w / S_w - D_w) \times 100 \quad (1)$$

F_w : وزن تر برگ، D_w : وزن خشک برگ و S_w : وزن اشباع برگ

برای اندازه‌گیری شاخص کلروفیل ۹۰ روز بعد از کاشت سه بوته از دو ردیف میانی هر کرت به صورت تصادفی انتخاب و در هر بوته روی یک برگ (برگ ۱۶-۱۸) سه نقطه در نظر گرفته شد. میانگین اعداد در هر کرت به عنوان عدد نهایی برای شاخص کلروفیل ثبت گردید. برای اندازه‌گیری این شاخص از دستگاه کلروفیل متر مدل Minolta-502 استفاده شد.

برداشت نهایی وقتی انجام شد که رنگ زرد مایل به قهوه‌ای در پشت طبق ۹۰ درصد بوته‌ها مشاهده شد و رطوبت بذور ۲۰ درصد بود. نمونه‌برداری با حذف اثر حاشیه انجام شد و به منظور اندازه‌گیری قطر طبق، تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و درصد پوکی دانه‌ها تعداد پنج بوته از هر کرت فرعی به طور تصادفی برداشت و مورد استفاده قرار گرفت. هم‌چنین به منظور اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، بوته‌ها از سطح چهار مترمربع در هر کرت برداشت شد. درصد روغن با استفاده از روش استخراج با حلال و دستگاه سوکسله صورت گرفت. عملکرد روغن نیز از حاصل ضرب عملکرد دانه در درصد روغن به دست آمد. برای محاسبه شاخص برداشت دانه عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) بر عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم در هکتار) تقسیم شد.

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از این آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 و مقایسه میانگین اثرات متقابل با کاربرد نرم‌افزار MSTAT-C و با روش چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. است.

درصد نیاز آبی (معادل ۴۱۲۰ مترمکعب در هکتار و ۵/۱۵ مترمکعب در هر کرت فرعی در مجموع ۲۶ آبیاری) و عامل فرعی زمان کاربرد سیلیسیم در چهار سطح (بدون کاربرد (شاهد)، کاربرد در مرحله رشد رویشی، کاربرد در مرحله رشد زایشی، کاربرد در مرحله رشد زایشی) بود. نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم‌افزار Cropwat محاسبه گردید. سپس حجم آب آبیاری برای هر کرت محاسبه شد؛ برای توزیع حجم آب آبیاری بین کرت‌ها و تنظیم دقیق توزیع آب از پمپ و کنتور آب برای اندازه‌گیری حجم دقیق آبیاری استفاده شد. سیلیسیم در مرحله رویشی در زمان ۲۰ برگی و در مرحله زایشی در مرحله دانه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت و در هر مرحله به مقدار چهار کیلوگرم در هکتار همراه با آب آبیاری وارد کرت‌های مورد نظر شد. ابعاد کرت‌های فرعی ۵×۲/۵ متر و فاصله بین کرت‌های فرعی یک متر و ابعاد کرت‌های اصلی ۵×۱۳ متر منظور شد. بر این اساس مساحت زمین آزمایش ۲۱×۵/۵ مترمربع بود. هر کرت فرعی شامل چهار خط کاشت هرکدام به طول پنج متر با تراکم ۸۳۰۰۰ بوته در هکتار بود. عملیات خاک‌ورزی و آماده‌سازی زمین شامل یک شخم عمیق و دو دیسک عمود برهم، تسطیح، ایجاد جوی و پشته و کرت‌بندی بود. بافت خاک لومی شنی بود. بر اساس آزمون تجزیه خاک، مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره که در دو مرحله شامل قبل از کاشت و بعد از تنک کردن مورد استفاده قرار گرفت، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم به طور یکنواخت در سطح مزرعه پخش و با شیارساز جوی و پشته ایجاد گردید. کاشت در تاریخ ۱۰ اردیبهشت با دست و به طریق هیرم کاری انجام شد. بذر مورد استفاده رقم ایروفلور (EUROFLOR) بود. وجین علف‌های هرز به صورت دستی در یک مرحله ۵۰ روز بعد از کاشت صورت پذیرفت. بیماری و آفت خاصی در مزرعه مشاهده نشد. عمل تنک در مرحله چهار برگی انجام گرفت و آبیاری تا این زمان بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی صورت گرفت و پس از آن تیمارهای آبیاری اعمال شد.

برای اندازه‌گیری محتوی نسبی آب برگ نمونه‌برداری ۹۰ روز بعد از کاشت، از آخرین برگ توسعه‌یافته انجام و بلافاصله وزن تر نمونه‌ها با ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۰۱

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (گناباد)

Table 1. Physical and Chemical Properties Soil Test site (Gonabad)

Soil Pattern	Sand	Loam	Clay	pH	Electrical Conductivity	Total Nitrogen	Total Phosphorus	Total Potassium
	%			-	dS/m	%	ppm	
Sandy clay loam	53.1	26.7	20.2	8.28	5.76	0.015	5.87	251

نتایج و بحث

کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی بیش‌ترین قطر طبق مشاهده شد (جدول ۳). بر اساس نتایج سایر محققان سیلیسیم باعث ایجاد کمپلکس‌های پیچیده با ترکیبات دیواره سلولی می‌شود و از این طریق استحکام دیواره و نیز رشد قطری و طولی سلول‌ها، به‌ویژه آوند چوبی را باعث می‌شود (El-Kinany & Nasser, 2019). سپهر و ملکوتی (Sepehr & Malakouti, 2005) و گونز و همکاران (Gunes *et al.*, 2008) نیز به نقش مثبت استفاده از سیلیسیم و سایر ریزمغذی‌ها در افزایش توان فتوسنتزی و قطر طبق آفتابگردان اشاره کرده‌اند.

وزن خشک طبق: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر وزن خشک طبق آفتابگردان داشت (جدول ۲). بررسی تغییرات وزن خشک طبق تحت تأثیر سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی نشان داد که کاهش سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد به ترتیب باعث کاهش ۲۷، ۳۰ و ۵۲ درصد در وزن خشک طبق شد (جدول ۳). یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب کاهش تورژسانس سلول و کاهش سطح تعرق کنندگی گیاه است؛ در این شرایط جذب مواد غذایی کند شده و رشد و توسعه سلول‌ها در اندام‌های هوایی کاهش می‌یابد؛ بنابراین با کاهش سطح رطوبتی و کاهش سطح اندام‌های فتوسنتز کننده به‌طور مسلم سایر اندام‌ها نظیر ساقه و طبق نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت (Lotfi *et al.*, 2014). نتایج جدول مقایسات میانگین نشان داد که با کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی بیش‌ترین وزن خشک طبق (۷۹/۹۰ گرم) حاصل شد و از طرف دیگر تیمارهای کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و کاربرد در مرحله زایشی در یک گروه آماری قرار گرفت و اختلاف معنی‌داری با همدیگر نداشت (جدول ۳). نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد اثرات متقابل سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم معنی‌دار نبود (جدول ۲).

قطر طبق: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد و همچنین اثر متقابل آن‌ها در سطح پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر قطر طبق داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم نشان داد که در سطوح رطوبتی ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی نسبت به تیمار عدم کاربرد، به ترتیب باعث افزایش قطر طبق به میزان ۵۹، ۳۷ و ۴۶ درصد شد؛ هرچند که در سطوح رطوبتی ۶۰ و ۴۰ درصد تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی با تیمارهای کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و کاربرد سیلیسیم در مرحله زایشی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند (جدول ۴). از طرف دیگر در تیمار سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی برتری کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی نسبت به سایر تیمارهای کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی تحت آبیاری با نیاز آبی کامل (سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد) داشت (جدول ۴). این موضوع نشان‌دهنده اثر مثبت کاربرد سیلیسیم تحت آبیاری با سطح رطوبتی ۸۰ درصد است. آزمایش‌های سایر محققان نیز نشان داده که کاهش سطح رطوبتی به-خصوص در مرحله زایشی باعث کاهش قطر طبق شده است (Yadollahi *et al.*, 2014). همچنین پکان و همکاران (Pekcan *et al.*, 2016) طی بررسی خود بر روی گیاه آفتابگردان پی بردند که قطر طبق در پی کاهش مقدار آب آبیاری روند کاهشی در پیش گرفت. بر اساس نتایج این محققان در شرایط کمبود آب، محتوی آب خاک کاهش یافت، در نتیجه پتانسیل آب برگ کم شده و روزنه‌ها بسته می‌شوند؛ در نهایت رشد سلول به شدت کم شده و یا متوقف می‌شود. بررسی نتایج روند تغییرات اثر سیلیسیم در طی دوره رشد بر قطر طبق نشان داد با

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان
Table 2. Analysis of Variance (mean square) for the effect of different levels of moisture and different times of application Silicon on yield and yield component of sunflower

S.O. V	df	Head diameter	Head dry weight	Chlorophyll Index	Relative water Content	Seed No. per head	Percentage of unfilled seed
Replication	2	1.89 ^{ns}	215.41 ^{ns}	6.39 ^{**}	16.17 ^{n.s}	27441.64 ^{n.s}	6.87 ^{n.s}
Moisture Level (a)	3	15.50 ^{**}	3126.65 ^{**}	46.15 ^{**}	1982.75 ^{**}	170156.50 [*]	663.72 ^{**}
Error (a)	6	3.97	220.58	0.58	7.41	49294.14	14.83
Si (b)	3	42.50 ^{**}	425.51 ^{**}	5.76 ^{**}	142.31 ^{**}	728634.83 ^{**}	133.19 ^{**}
(a×b)	9	4.00 [*]	275.40 ^{ns}	2.03 ^{n.s}	4.76 ^{n.s}	31504.00 ^{n.s}	25.40 [*]
Total error	24	1.95	144.05	1.36	10.87	58305.43	11.74
Cv %		12.53	21.88	10.61	6.63	28.08	18.27

ns, * and **: Non significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.
به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال پنج و یک درصد میباشد

جدول ۲ (ادامه) - تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم بر و اجزای عملکرد آفتابگردان
Table 2 (continued). Analysis of Variance (mean square) for the effect of different levels of moisture and different times of application Silicon on yield and yield component of sunflower

S.O. V	df	1000 seed weight	Seed yield	Biological yield	Harvest index	Oil percentage	Oil yield
Replication	2	229.02 ^{ns}	741094.41 ^{ns}	10259573.53 ^{ns}	2.77 ^{n.s}	21.27 ^{n.s}	138603.01 ^{n.s}
Moisture Level (a)	3	1885.62 ^{**}	28899289.21 ^{**}	286756479.84 ^{**}	261.05 ^{**}	123.66 ^{n.s}	5973015.90 ^{**}
Error (a)	6	174.75	912403.40	9974111.40	32.49	92.16	142273.79
Si (b)	3	1697.00 ^{**}	35541855.71 ^{**}	299651191.42 ^{**}	93.72 ^{**}	227.63 [*]	9513621.34 ^{**}
(a×b)	9	132.35 ^{n.s}	3359031.30 ^{**}	10669441.50 ^{n.s}	27.44 ^{n.s}	66.86 ^{n.s}	1034656.56 ^{**}
Total error	24	139.77	676821.74	14741550.00	23.28	78.96	100247.13
Cv%		21.18	23.20	25.16	21.76	25.55	23.25

ns, * and **: Non significant, significant at 5 and 1% probability levels, respectively.
به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال پنج و یک درصد میباشد

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان
Table 3. Means comparison of different levels of moisture and different times of application on yield and yield component of sunflower

	Head diameter (cm)	Head dry weight (gr)	Chlorophyll Index	Relative Water Content	Seed No. per head	Percentage of unfilled seed
Moisture level						
100% Moisture level (Full water requirement)	12.16 ^a	75.57 ^a	13.20 ^a	64.95 ^a	983.50 ^a	13.26 ^c
Moisture level 80% water requirement	11.91 ^a	54.87 ^b	11.72 ^b	54.38 ^b	901.25 ^{ab}	13.85 ^c
Moisture level 60% water requirement	10.91 ^{ab}	52.74 ^b	10.45 ^c	44.12 ^c	853.75 ^{ab}	18.59 ^b
Moisture level 40% water requirement	9.66 ^b	36.20 ^c	8.58 ^d	35.20 ^d	700.17 ^b	29.32 ^a
Si						
Without application(control)	9.25 ^c	33.93 ^c	10.48 ^b	48.18 ^b	740.00 ^b	22.69 ^a
Application in vegetative st.	10.66 ^b	52.65 ^b	11.83 ^a	51.99 ^a	704.17 ^b	19.43 ^b
Application in reproductive st.	11.00 ^b	52.90 ^b	10.40 ^b	45.52 ^b	767.25 ^b	18.29 ^b
Application in vegetative and reproductive st.	13.75 ^a	79.90 ^a	11.28 ^{ab}	52.95 ^a	1227.25 ^a	14.61 ^c

در هر ستون برای هر تیمار، حروف مشابه نمایانگر عدم تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد است.
In each column for every treatment, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels.

جدول ۳ (ادامه) - مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان
 Table 3 (continued). Means comparison of different levels of moisture and different times of application on yield and yield component of sunflower

	1000 seed weight (g)	Seed yield (kg ha ⁻¹)	Biological yield (kg ha ⁻¹)	Harvest index	Oil percentage	Oil yield
Moisture level						
100% Moisture level (Full water requirement)	68.83 ^a	5222.92 ^a	19946.12 ^a	27.91 ^a	38.65 ^a	1980.81 ^a
Moisture level 80% water requirement	63.59 ^a	4357.65 ^a	18965.31 ^a	21.91 ^{bc}	36.11 ^a	1936.76 ^a
Moisture level 60% water requirement	48.95 ^b	2868.31 ^b	11662.51 ^b	22.33 ^{ab}	32.55 ^a	945.21 ^b
Moisture level 40% water requirement	41.87 ^b	1730.80 ^c	10458.21 ^b	16.50 ^c	31.49 ^a	583.41 ^b
Si						
Without application(control)	44.01 ^c	2387.55 ^b	11194.00 ^c	19.41 ^b	33.42 ^b	830.93 ^b
Application in vegetative st.	48.76 ^c	2630.23 ^b	11914.61 ^c	21.08 ^b	31.32 ^b	850.00 ^b
Application in reproductive st.	59.85 ^b	3070.71 ^b	15816.23 ^b	22.16 ^{ab}	33.18 ^b	1078.92 ^b
Application in vegetative and reproductive st.	70.61 ^a	6091.30 ^a	22106.12 ^a	26.00 ^a	41.48 ^a	2686.41 ^a

در هر ستون برای هر تیمار، حروف مشابه نمایانگر عدم تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد است.

In each column for every treatment, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels.

جدول ۴ - اثر متقابل اثر سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان
 Table 4. Means comparison of interaction effect of different levels of moisture and different times of application Silicon on yield and yield component of sunflower

Moisture level	Si	Head diameter (cm)	Percentage of unfilled seed	Seed yield (kg ha ⁻¹)	Oil yield (kg ha ⁻¹)
100% Moisture level (Full water requirement)	Without application(control)	10 ^{d-g}	15.60 ^{d-f}	3508.45 ^{c-e}	1232.64 ^{b-d}
	Application in vegetative st.	11.33 ^{c-f}	12.93 ^{e-g}	3541 ^{c-e}	1243.38 ^{bcd}
	Application in reproductive st.	13 ^{bc}	13.33 ^{e-g}	4243.10 ^{cd}	1521.62 ^{bc}
	Application in vegetative and reproductive st.	16.66 ^a	11 ^{fg}	9599.22 ^a	3925.69 ^a
Moisture level 80% water requirement	Without application(control)	9 ^{fg}	21.56 ^{bc}	3023 ^{d-f}	1127.99 ^{b-e}
	Application in vegetative st.	10.66 ^{c-f}	12.20 ^{fg}	3117.83 ^{de}	1128.24 ^{b-e}
	Application in reproductive st.	11.33 ^{c-f}	13.60 ^{e-g}	3716.74 ^{c-e}	1346.33 ^{b-d}
	Application in vegetative and reproductive st.	14.33 ^{ab}	8.03 ^g	7572.96 ^b	4144.42 ^a
Moisture level 60% water requirement	Without application(control)	9 ^{fg}	20.80 ^{b-d}	1730.46 ^{f-h}	685.21 ^{e-g}
	Application in vegetative st.	11.33 ^{c-f}	18.53 ^{c-e}	2449.61 ^{e-h}	631.60 ^{e-g}
	Application in reproductive st.	10 ^{d-g}	20.63 ^{b-d}	2655 ^{efg}	833.28 ^{d-f}
	Application in vegetative and reproductive st.	12.33 ^{b-d}	14.40 ^{ef}	4638.81 ^c	1630.64 ^b
Moisture level 40% water requirement	Without application(control)	8 ^g	35.46 ^a	1193.54 ^h	277.66 ^g
	Application in vegetative st.	9.33 ^{e-g}	31.40 ^a	1507.62 ^{gh}	396.86 ^{fg}
	Application in reproductive st.	9.66 ^{e-g}	25.40 ^b	1667.91 ^{f-h}	614.22 ^{e-g}
	Application in vegetative and reproductive st.	11.66 ^{c-e}	25.03 ^b	2554.44 ^{e-h}	1044.83 ^{c-e}

در هر ستون برای هر تیمار، حروف مشابه نمایانگر عدم تفاوت معنادار در سطح احتمال ۵ درصد است.

In each column for every treatment, common letters demonstrate not significant at 0.05 probability levels.

معنی‌داری در سطح یک درصد بر وزن خشک طبق آفتابگردان داشت (جدول ۲). بررسی تغییرات وزن خشک

وزن خشک طبق: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات اصلی سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم تأثیر

طریق تأثیر بر آنزیم ریبولوز بی فسفات کربوکسیلاز و جلوگیری از تخریب کلروفیل توسط سیلیسیم است (Coskun *et al.*, 2019).

محتوی نسبی رطوبت: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی سطوح رطوبتی و کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد اثر معنی داری بر محتوی نسبی رطوبت داشت، درحالی که اثر متقابل آن معنی دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد میزان محتوی نسبی رطوبت با کاهش سطح رطوبتی از ۱۰۰ درصد به ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد به ترتیب کاهش ۱۶، ۳۲ و ۴۶ درصدی را به همراه داشت (جدول ۳). درصد رطوبت نسبی بافت‌ها از مهم‌ترین مؤلفه‌هایی است که نشان‌دهنده وضعیت آبی گیاه است (Hussain *et al.*, 2018). کم بودن محتوی نسبی آب برگ در هنگام تنش شدید رابطه نزدیکی با پتانسیل آب گیاه دارد، تنش رطوبتی باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش توسعه برگ‌ها می‌شود و به دلیل کاهش دی‌اکسیدکربن در دسترس گیاه میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد (Heidari *et al.*, 2013). نتایج تحقیقات حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 2018) نیز نشان داد با افزایش تنش رطوبتی به‌طور معنی داری محتوی نسبی آب برگ کاهش یافت. بر اساس نتایج این محققان کاهش مقدار محتوی نسبی آب برگ در اثر تنش کمبود رطوبت، از یک‌طرف به دلیل کاهش جذب آب توسط ریشه‌ها و از طرف دیگر افزایش تعرق آب از طریق برگ‌ها است که در نهایت منجر به بسته شدن روزنه‌های برگ می‌شود. بر اساس نتایج مقایسه میانگین محتوی نسبی رطوبت در تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی بالاترین مقدار بود که با تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی در گروه آماری مشترک قرار گرفت (جدول ۳). به نظر می‌رسد که سیلیسیوم از طریق افزایش غلظت داخل سلول به‌واسطه تأثیر برافزایش یون‌های پتاسیم و سیلیسیوم، باعث افزایش محتوی نسبی آب می‌شود (Artyszak, 2018). در گیاهان با وقوع تنش رطوبتی تنظیم اسمزی رخ می‌دهد یعنی در اثر تجمع یون‌ها، مواد محلول در سلول‌های برگ افزایش می‌یابد که بالا بودن محتوی مواد محلول باعث می‌شود وقتی برگ گیاه در آب مقطر غوطه‌ور می‌شود (برای اندازه‌گیری محتوی نسبی آب)، مواد سیئوپلاسمی به محیط آپوپلاستی نشت می‌کند و آبگیری بیش‌تری در مقایسه با برگ شاهد داشته و

طبق تحت تأثیر سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی نشان داد که کاهش سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد به ترتیب باعث کاهش ۲۷، ۳۰ و ۵۲ درصد در وزن خشک طبق شد (جدول ۳). یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب کاهش تورژسانس سلول و کاهش سطح تعرق کنندگی گیاه است؛ در این شرایط جذب مواد غذایی کند شده و رشد و توسعه سلول‌ها در اندام‌های هوایی کاهش می‌یابد؛ بنابراین با کاهش سطح رطوبتی و کاهش سطح اندام‌های فتوسنتز کننده به‌طور مسلم سایر اندام‌ها نظیر ساقه و طبق نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت (Lotfi *et al.*, 2014). نتایج جدول مقایسات میانگین نشان داد که با کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی بیش‌ترین وزن خشک طبق (۷۹/۹۰ گرم) حاصل شد و از طرف دیگر تیمارهای کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و کاربرد در مرحله زایشی در یک گروه آماری قرار گرفت و اختلاف معنی داری با همدیگر نداشت (جدول ۳). نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد اثرات متقابل سطوح مختلف رطوبتی و زمان کاربرد سیلیسیم معنی دار نبود (جدول ۲).

شاخص کلروفیل: بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر اصلی سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد بر شاخص کلروفیل معنی دار بود، درحالی که اثر متقابل آن‌ها معنی دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد با کاهش سطح رطوبت شاخص کلروفیل نیز روند کاهشی در پیش گرفت (جدول ۳). میزان کلروفیل در گیاهان یکی از فاکتورهای مهم حفظ ظرفیت فتوسنتزی است؛ تحت شرایط کمبود آب میزان کلروفیل بعنوان عامل اصلی در فرایند فتوسنتز کاهش می‌یابد بنابراین آسمیلات‌سازی در گیاه نیز کمتر می‌شود و در نتیجه باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود (Yadollahi *et al.*, 2017).

نتایج روبرت و همکاران (Robert *et al.*, 2016) نیز مطابق با نتایج این آزمایش است؛ به گزارش این محققان تحت شرایط کمبود رطوبت کاهش در غلظت کلروفیل ناشی از کاهش میزان سنتز در اثر تجزیه کلروفیل به دلیل افزایش در میزان کلروفیلاز، پراکسیداز و ترکیبات فنلی می‌باشد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیش‌ترین شاخص کلروفیل با کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی به‌دست آمد (جدول ۳). اثر سیلیسیم برافزایش مقدار کلروفیل برگ از

دانه در طبق را به علت اختصاص مواد فتوسنتزی بیش تر به طبق فراهم آورده است (Sepehr & Malakouti, 2005).

درصد پوکی دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی سطوح رطوبتی بر اساس نیاز آبی و کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر درصد پوکی دانه داشت (جدول ۲). بررسی اثرات متقابل نشان داد که در سطوح رطوبتی ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث کاهش درصد پوکی دانه نسبت به تیمار شاهد (بدون کاربرد) شد (جدول ۴). کمبود آب در طی دوره گلدهی و گرده‌افشانی، به علت اثرات آن بر اعضای زایشی و افزایش تعداد دانه‌های پوک در طبق، عملکرد دانه در آفتابگردان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zareei Siahbidi *et al.*, 2020). بر اساس جدول ۴ کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی نسبت به عدم کاربرد (شاهد) تحت سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی در مقایسه با سطوح رطوبتی ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی باعث کاهش بیش‌تر درصد پوکی دانه (۶۲ درصد در مقابل ۳۰ و ۲۹ درصد) شد. هم‌چنین درصد پوکی دانه در تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی تحت سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی (۳/۸ درصد) اختلاف معنی‌داری با تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی تحت سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد نیاز آبی (۱۱ درصد) نداشت (جدول ۴)؛ بنابراین می‌توان گفت کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی تحت سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی اثرات کم‌آبی بر درصد پوکی دانه را جبران کرده است. به نظر می‌رسد کاربرد توأم سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی از طریق تأثیر مثبت بر دوام سطح برگ در مرحله رویشی و افزایش فتوسنتز و نیز حفظ پایداری غشاء و کاهش نشت سلولی و در نتیجه تداوم جریان انتقال مواد فتوسنتزی ذخیره‌شده به دانه‌ها در مرحله پر شدن دانه باعث کاهش تعداد دانه پوک، افزایش وزن و عملکرد دانه می‌شود (Etesami & Jeong, 2018). هم‌چنین در سطوح رطوبتی ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی در مقایسه با کاربرد در مرحله زایشی باعث کاهش بیش‌تر درصد پوکی دانه نسبت به تیمار عدم کاربرد (شاهد) شد (جدول ۳). مطابق با این نتیجه سایر محققان نیز گزارش کردند که

در نتیجه محتوی آب برگ در گیاه تنش دیده پایین است؛ در حضور عناصری مانند سیلیسیم در شرایط کمبود رطوبت، عناصر در تعادل خواهند بود و سلول قدرت حفظ ساختار خود را پیدا کرده و نشت مواد کمتر صورت می‌گیرد و در نتیجه محتوی نسبی آب آن افزایش می‌یابد (Etesami & Jeong, 2018).

تعداد دانه در طبق: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر اصلی سطوح رطوبتی در سطح یک درصد و کاربرد سیلیسیم در سطح پنج درصد تأثیر معنی‌داری بر تعداد دانه در طبق آفتابگردان داشت، ولی اثرات متقابل معنی‌دار نبود (جدول ۲). روند تغییرات تعداد دانه در طبق تحت سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی نشان داد کاهش سطح رطوبتی از ۱۰۰ به ۴۰ درصد تعداد دانه در طبق را کاهش داد (جدول ۳). تعداد دانه در طبق آفتابگردان از اجزای مهم و مؤثر در عملکرد دانه است و عامل ایجاد تغییر در این صفت تعداد گل‌ها در طبق و باروری آن‌هاست که در سطوح رطوبتی کمتر به علت عقیم شدن دانه‌های گرده از یک‌سو و کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی و کاهش قطر طبق از سوی دیگر به مقدار زیادی از تولید دانه در طبق کاسته می‌شود. به عبارتی بروز کم‌آبی در طی دوره رشد گیاه از طریق کاهش سطح برگ و ریزش آن‌ها منجر به کاهش منبع فتوسنتزی گیاه و افت فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر این فرایند شده و باعث کاهش اندازه طبق و تعداد دانه در طبق می‌گردد (Roshdi *et al.*, 2006). احتمالاً تحت شرایط کمبود رطوبت فعالیت حشرات گرده‌افشان به دلیل کم شدن محتوی رطوبت دانه‌های گرده و در نتیجه کاهش چسبندگی دانه‌ها از یک طرف و نیز کاهش مقدار شهد تولید شده در گل‌ها از طرف دیگر کاهش می‌یابد و در نتیجه تعداد دانه بارور در طبق نیز کم می‌شود (Rahimizadeh *et al.*, 2010; Debaeke *et al.*, 2020). بررسی جدول مقایسات میانگین نشان داد که تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی بیش‌ترین تعداد دانه در طبق را نشان داد ولی سایر تیمارهای کاربرد شامل کاربرد در مرحله رویشی و کاربرد در مرحله زایشی با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۳). کاربرد ریزمغذی‌ها از طریق افزایش سطح و دوام برگ و نیز افزایش کلروفیل برگ و فعالیت آنزیم‌ها، باعث افزایش توان فتوسنتزی گیاه شده و امکان تشکیل تعداد بیش‌تری

سلول‌های اپیدرمی مانعی را برای کاهش آب از کوتیکول‌ها ایجاد می‌کند. هم‌چنین رشد گیاه را از طریق بهبود جذب عناصر غذایی، کاهش سمیت عناصر، بهبود فعالیت فتوسنتزی و مقاومت بیشتر در مقابل تنش‌ها افزایش می‌دهد (Asadzadeh *et al.*, 2015).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح مختلف رطوبتی بر اساس نیاز آبی، کاربرد سیلیسیم و اثرات متقابل در سطح یک درصد تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه داشت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم نشان داد در همه سطوح کم رطوبت شامل ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث افزایش حدوداً ۲/۵ برابری عملکرد دانه نسبت به تیمار عدم کاربرد (شاهد) شد (جدول ۴). می‌توان گفت کاهش عملکرد دانه در سطوح کم رطوبت تحت تیمار عدم کاربرد سیلیسیم به علت کاهش تعداد دانه‌های پر شده، قطر طبق، تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه است (جدول ۳). کاهش عملکرد دانه در اثر بروز تنش خشکی در آفتابگردان توسط محققان دیگر نیز به اثبات رسیده است؛ بر اساس نتایج سایر آزمایش‌ها احتمال دارد که تنش خشکی با کاهش سطح برگ، انسداد روزنه‌ها، کاهش فعالیت‌های پروتوپلاسمی و تثبیت گاز کربنیک، کاهش سنتز کلروفیل سبب تقلیل در فرایند فتوسنتز جاری و در نتیجه بر انتقال مواد فتوسنتزی از بوته‌ها به دانه‌ها تأثیر منفی گذاشته و منجر به کاهش وزن دانه‌ها و چروکیدگی آن‌ها و در نهایت کاهش عملکرد دانه شود (Yadollahi *et al.*, 2017). هم‌چنین کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در سطوح رطوبتی ۸۰ درصد و ۶۰ درصد نیاز آبی باعث افزایش عملکرد دانه حتی بیش‌تر از تیمار سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد بدون کاربرد (شاهد) شد (جدول ۴). این موضوع می‌تواند بیانگر این باشد که کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در سطوح رطوبتی کمتر می‌تواند اثرات کم‌آبی را بر عملکرد دانه کنترل کند. مطابق با نتایج این آزمایش سایر محققان اثرات مثبت کاربرد سیلیسیم بر بهبود عملکرد دانه آفتابگردان (Gunes *et al.*, 2008; Hussain *et al.*, 2019) و گندم (Maghsoudi & Emam, 2016) را گزارش نمودند.

عملکرد بیولوژیک: بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر اصلی سطوح رطوبتی و کاربرد سیلیسیم در سطح یک

در سطوح بیش‌تر رطوبتی کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی از طریق تأثیر برافزایش شاخص سطح برگ باعث تولید مواد فتوسنتزی بیش‌تر و در نتیجه کاهش تعداد دانه پوک شده است. درحالی‌که در سطوح کمتر رطوبتی به دلیل کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه درصد پوکی دانه افزایش یافته است (Etesami & Jeong, 2018).

وزن هزار دانه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر وزن هزار دانه داشت، درحالی‌که اثرات متقابل معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که وزن هزار دانه در سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری با سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد نداشت؛ ولی با سطوح رطوبتی ۶۰ و ۴۰ درصد در گروه آماری متفاوتی قرار گرفت (جدول ۳). هم‌چنین کمترین وزن هزار دانه در سطح رطوبتی ۴۰ درصد نیاز آبی به دست آمد (جدول ۳). بر اساس نتایج جدول مقایسات میانگین کاهش سطح رطوبتی از ۱۰۰ به ۴۰ درصد نیاز آبی تأثیر بیش‌تری بر کاهش مقدار وزن هزار دانه نسبت به تعداد دانه در طبق داشت (۳۹ درصد در برابر ۲۹ درصد) (جدول ۳). مطابق با این نتایج حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 2018) گزارش کردند که هم‌زمان با کاهش قطر طبق و تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه نیز کاهش یافت. این محققان اعلام کردند علت کاهش وزن هزار دانه در شرایط تنش رطوبتی تولید تعداد دانه کمتر به دلیل کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی و نیمه پر ماندن دانه‌ها بعلت کامل نشدن فرایند باروری است. سایر محققان نیز کاهش وزن هزار دانه در اثر کاهش سطوح رطوبتی را تأیید کردند (Yadollahi *et al.*, 2014; Heidari & Karami, 2013). نتایج مقایسه میانگین اثر کاربرد سیلیسیم نشان داد که تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله زایشی نسبت به کاربرد در مرحله رویشی باعث افزایش بیش‌تر وزن هزار دانه شد (۳۶ درصد در مقابل ۱۱ درصد) و در تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی بیش‌ترین وزن هزار دانه حاصل شد (جدول ۳). بر اساس جدول مقایسات میانگین به نظر می‌رسد که کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث افزایش حدود ۶۰ درصد نسبت به شاهد (عدم کاربرد سیلیسیم) در هر دو صفت وزن هزار دانه و تعداد دانه در طبق شد. گزارش شده است که کودهای سیلیکاته با اثر مثبت بر رشد رویشی گیاه و افزایش دوام سطح برگ از طریق کاهش تعرق گیاه و یا رسوب در زیر سلول‌های اپیدرم برگ و ساقه و حفظ و نگهداری فشار تورژسانس سبب افزایش تولید مواد فتوسنتزی می‌شود (Liang *et al.*, 2007). رسوب سیلیکات در

افزایش تولید دانه است، با اعمال سطوح رطوبتی کمتر بر اساس نیاز آبی به دلیل گرده‌افشانی ناقص و همچنین کاهش وزن دانه، عملکرد دانه با سرعت بیش‌تری نسبت به عملکرد بیولوژیک کاهش می‌یابد و در نتیجه شاخص برداشت نیز کاهش می‌یابد (Amiri et al., 2014). کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در این آزمایش باعث افزایش شاخص برداشت نسبت به شاهد شد (جدول ۳). با توجه به نتایج جدول مقایسه میانگین کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی باعث تأثیرپذیری بیش‌تر عملکرد رویشی نسبت به زایشی و در نتیجه کاهش شاخص برداشت نسبت به تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله زایشی می‌شود؛ در حالی که کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث سرمایه‌گذاری بیش‌تر گیاه بر عملکرد دانه می‌شود و شاخص برداشت بالاتری نسبت به سایر تیمارها مشاهده شد (جدول ۳).

درصد روغن: بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر اصلی سطوح رطوبتی بر درصد روغن معنی‌دار نبود، در حالی که کاربرد سیلیسیم در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. اصولاً درصد روغن یک صفت کمی است و توسط چندین ژن کنترل می‌شود، بنابراین آسیب دیدن تعداد زیادی از ژن‌های کنترل‌کننده در اثر تنش خشکی بعید به نظر می‌رسد؛ از این رو کاهش درصد روغن در اثر تنش خشکی جزئی است (Yadollahi et al., 2014). بر اساس نتایج جدول مقایسات میانگین کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث افزایش درصد روغن نسبت به سایر تیمارهای کاربرد سیلیسیم شده است (جدول ۳). با توجه به این که در ابتدا کربوهیدرات‌ها تجمع می‌یابند و سپس به روغن و پروتئین و یا هر ماده دیگری تبدیل می‌شوند، بنابراین هر چه طول دوره پر شدن دانه، تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه بیش‌تر باشد درصد روغن هم بالاتر خواهد بود (Pekcan et al., 2017). با توجه به این که در تیمار کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه بیش‌ترین مقدار و نیز درصد پوکی کمترین مقدار است، بنابراین می‌توان گفت احتمالاً کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی از طریق تأثیر مثبت بر اجزای عملکرد دانه باعث افزایش درصد روغن شده است (جدول ۳). نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد اثرات متقابل سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم بر درصد روغن معنی‌دار نبود (جدول ۲).

درصد بر عملکرد بیولوژیک معنی‌دار بود، در حالی که اثرات متقابل معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد کاهش سطح رطوبتی از ۱۰۰ به ۴۰ درصد باعث کاهش عملکرد بیولوژیک به مقدار ۴۷ درصد شد (جدول ۳). نتایج امیدواردلی و بهرانی (Omidi Ardali & Bahrani, 2011) نیز مطابق با نتایج این آزمایش است؛ به گزارش این محققان دلیل افزایش ماده خشک در گیاهان تحت آبیاری کامل گسترش بیش‌تر و دوام بهتر سطح برگ بود که موجب ایجاد منبع فیزیولوژیکی کامل جهت استفاده هر چه بیش‌تر از نور دریافتی و تولید ماده خشک گردید. بر اساس نتایج مقایسات میانگین، بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک با کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی به دست آمد که نسبت به تیمار بدون کاربرد (شاهد) دو برابر شده است (جدول ۳). سیلیسیم باعث تحریک تولید بیش‌تر آنزیم ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز در برگ می‌شود، غلظت بیش‌تر این آنزیم می‌تواند منجر به بهبود فتوسنتز در گیاه، تجمع بیش‌تر ماده خشک و در نتیجه عملکرد بیولوژیک بیش‌تر شود (Etesami & Jeong, 2018). مطابق با نتایج این آزمایش امیری و همکاران (Amiri et al., 2014) در گلرنگ و مقصودی و امام (Maghsoudi & Emam, 2016) در گندم گزارش کردند که کاربرد سیلیسیم تحت شرایط تنش خشکی باعث افزایش عملکرد بیولوژیک می‌شود.

شاخص برداشت: نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح مختلف رطوبتی و کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد بر شاخص برداشت معنی‌دار بود، در حالی که اثرات متقابل معنی‌دار نبود (جدول ۲). جدول مقایسه میانگین نشان داد که با کاهش سطوح رطوبتی از ۱۰۰ به ۴۰ درصد شاخص برداشت کاهش یافته است، به طوری که کمترین شاخص برداشت در سطح رطوبتی ۴۰ درصد نیاز آبی حاصل شد (۱۶/۵۰ درصد) (جدول ۳). شاخص برداشت در واقع برآیندی از نسبت عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک (وزن اندام‌های هوایی گیاه) است؛ با توجه به اینکه در تیمار سطح رطوبتی ۴۰ درصد نیاز آبی کاهش بیش‌تر عملکرد دانه نسبت به عملکرد بیولوژیک در مقایسه با سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد مشاهده شد (۶۶ درصد در مقابل ۴۷ درصد)، بنابراین کاهش شاخص برداشت در اثر کاهش سطوح رطوبتی قابل پیش‌بینی بود. افزایش این صفت در سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد به دلیل

عملکرد روغن در سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی و کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی به دست آمد (جدول ۴).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج پژوهش حاضر اگرچه کاهش سطوح رطوبتی در آبیاری می‌تواند بر اجزای عملکرد و عملکرد آفتابگردان اثر کاهشی معنی‌دار بگذارد؛ ولی کاربرد سیلیسیم از طریق تأثیر برافزایش قطر طبق، وزن خشک طبق، تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه و کاهش درصد پوکی دانه باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و عملکرد روغن گردید. کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در همه صفات مورداندازه‌گیری مطلوب‌ترین نتایج را داشت. بنابراین نتایج این آزمایش برای اراضی و مناطق مشابه با منطقه محل اجرا قابل توصیه است و در صورتی که با محدودیت منابع آبی مواجه باشیم امکان کاهش سطوح رطوبتی تا ۸۰ درصد نیاز آبی وجود دارد و می‌توان اثرات کاهش رطوبت را از طریق کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی به مقدار چهار کیلوگرم در هکتار جبران کرد. هم‌چنین جهت شناسایی سایر گونه‌های مقاوم و نیمه مقاوم به خشکی، تعیین حدود بحرانی این عنصر غذایی و نیز تأثیر انواع کودهای ریزمغذی بر کنترل آثار سوء تنش‌ها برای حصول آستانه-های اقتصادی عملکرد گیاهان زراعی انجام آزمایش‌های بیش‌تر مهم به نظر می‌رسد؛ بنابراین مطالعات بیش‌تر و استفاده از مقادیر متفاوت سیلیسیم در دامنه مشخصی از آب مورد استفاده برای آبیاری بر سایر گیاهان مورد کاشت در منطقه و هم‌چنین تأثیر استفاده از آن در میزان عناصر غذایی در خاک و آب توصیه می‌شود.

عملکرد روغن: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح رطوبتی و کاربرد سیلیسیم و اثرات متقابل تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر عملکرد روغن داشت (جدول ۲). بر اساس جدول اثرات متقابل در تیمار عدم کاربرد سیلیسیم (شاهد) با کاهش سطح رطوبت بر اساس نیاز آبی مقدار عملکرد روغن کاهش یافت (جدول ۴). گزارش شده است که تنش شدید خشکی سبب کاهش مقدار روغن تولیدی در گیاهان روغنی می‌شود و با کاهش بیش‌تر مقدار اسیدهای چرب با چند پیوند دوگانه و افزایش نسبت اسیدهای چرب اشباع در نهایت موجب بالا رفتن درجه اشباع بودن روغن می‌گردد (Joshani *et al.*, 2019). طبق نتایج حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 2018) تنش خشکی اثری بر درصد روغن نداشت ولی کم آبی شدید در مرحله گلدهی باعث کاهش بیش‌تر عملکرد روغن نسبت به عملکرد دانه شد که بدلیل تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های موثر در تولید روغن در گیاه بود. نتایج جدول اثرات متقابل نشان داد در همه سطوح کم رطوبت کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث بیش‌ترین عملکرد روغن شد. بر اساس نتایج در تیمار سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی عملکرد روغن در همه سطوح کاربرد سیلیسیم با تیمار آبیاری کامل در یک گروه آماری قرار گرفت؛ به طوری که کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی در سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی باعث افزایش عملکرد روغن حتی بیش‌تر از تیمار سطح رطوبتی ۱۰۰ درصد و کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی شد. می‌توان گفت کاربرد سیلیسیم در سطح رطوبتی ۸۰ درصد نیاز آبی اثرات کاهش سطح رطوبتی را کنترل کرده است. در سایر سطوح رطوبتی نیز کاربرد سیلیسیم در مرحله رویشی و زایشی باعث افزایش عملکرد روغن نسبت به سایر تیمارهای کاربرد سیلیسیم شد. بیش‌ترین مقدار

References

- Abida P., Liu W., Hussain S., Asghar J., and Perveen S. 2019. Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in Maize under drought stress. *Plants*, 8:431-445.
- Al-Murad M., Latif Khan A., and Muneer S. 2020. Silicon in horticultural crops: Cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. *Plants*, 9: 460- 481.
- Amiri A., Bagheri A., Khaje M., Najaf Abadipour F., and Yadollahi P. 2014. Effect of silicone foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of Safflower under limited irrigation conditions. *Crop Production Research*, 5(4): 361-372. (In Persian)

- Anitha R., Gayathry G., Thiruvarasan S., Christy P., Mary M., and Jayachandran M. 2019. Study of potassium silicate and silica solubilizing Bacteria and its impact on yield and quality of sugarcane under water stress condition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(11): 1287-1301.
- Artyszak A. 2018. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality: a literature review in Europe. *Plants*, 7(3):54-75.
- Asadzadeh N., Moosavi S.G., and Seghatoleslami M.J. 2015. Effect of irrigation regimes and application of nano and conventional ZnO and SiO₂ fertilizers on yield, yield components and water use efficiency of sunflower. *Biological Forum- An International Journal*, 7(1): 357-364.
- Chen W., Yao X., Cai K., and Chen J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by 843 improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 142: 67-76.
- Coskun D, Deshmukh R., Sonah H., Menzies J.G., Reynolds O., Ma J., Kronzucker J., and Belanger R. 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*, 221(1): 67-85.
- Debaeke P., Casadebaig P., Flenet F., and Langlade N. 2020. Sunflower crop and climate change: vulnerability, adaptation, and mitigation potential from case-studies in Europe. *Oilseeds & Fats Crops and Lipids*, 24(1): 1-15.
- El-Kinany R., and Nassar A. 2019. Effects of silicon levels and application methods on growth and quality characteristics of narcissus tazetta L. *Alexandria Journal of Agricultural Sciences*, 64(4): 231-243.
- Etesami H., and Jeong B.R. 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147: 881-896.
- Gong H., and Chen K. 2012. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthesis gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34: 1589-1594.
- Gunes A., Pillbeam D., Inal A., and Coban S. 2008. Influence of silicon on Sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, Antioxidant mechanisms, and Lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39: 1885-1903.
- Heidari M., and Karami A.V. 2013. Effect of drought stress and strains of mycorrhiza on yield, photosynthetic pigments Sunflower. *Journal of Environmental Stress on Crops*, 6(1): 17-26. (In Persian)
- Hussain S., Hussain S., Qadir T., Khaliq A., Ashraf U., Parveen A., Saqib M., and Rafiq M. 2019. Drought stress in plants: An overview on implications, tolerance mechanisms and agronomic mitigation strategies. *Plant Science Today*, 6: 389-402.
- Hussain M., Farooq S., Hasan W., Ul-Allah S., Tanveer M., Farooq M., and Nawaz M. 2018. Drought stress in Sunflower: physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, 201: 152-166.
- Hussain S., Ahmad M., Ahmad S., Iqbal J., Subhani J.M., Nadeem S.M., and Ibrahim M. 2013.
- Improvement of drought tolerance in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) by foliar application of abscisic acid and potassium chloride. *Pakistan Journal of Nutrition*, 12(4): 345-352.
- Joshan K., Sani B., Jabbari H., Mozafari H., and Moaveni P. 2019. Effect of drought stress on oil content and fatty acids composition of some Safflower genotypes. *Plant, Soil and Environment*, 65(11): 563-567.
- Li Q.F., Ma C.C., and Shang Q.L. 2007. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of Maize under drought stress. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 18: 531-536.

- Liang Y., Sun W., Zhu Y.G., and Christie P. 2007. Mechanisms of silicon mediated alleviation of a biotic stresses in higher plants. *Environmental Pollution*, 147: 422-428.
- Ma J.F., and Yamaji N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11: 392-397.
- Maghsoudi K., and Emam Y. 2016. Response of bread wheat cultivars to foliar application of silica under drought stress conditions after flowering. *Journal of Crop Production and Processing*, 6(19): 1-12. (In Persian)
- Manivannan A., Soundararajan P., Muneer S., and Jeong B.R. 2016. Silicon mitigates salinity stress by regulating the physiology, antioxidant enzyme activities, and protein expression in *Capsicum annum* 'Bugwang'. *BioMed Research International*, 20: 17-34
- Mobasser H.R., and Tavassoli A. 2013. Effect of water stress on quantitative and qualitative characteristics of yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Novel Applied Sciences*, 2(9): 299-302.
- Omidi Ardali G., and Bahrani M.J. 2011. The effects of drought, rates and times of nitrogen application on yield and yield components of Sunflower at different growth stages. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 55: 199-207. (In Persian)
- Patane C., Cosentino S.L., and Anastasi U. 2017. Sowing time and irrigation scheduling effects on seed yield and fatty acids profile of Sunflower in semi-arid climate. *International Journal of Plant Production*, 11(1): 17-32.
- Pei Z.F., Ming D.F., Liu D., Wan G.L., Geng X.X., Gong H.J., and Zhou W.J. 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in Wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29: 106-115.
- Pekcan V., Evcı G., Yılmaz M.L., Balkan A.S., Nalcaiyi S.C., Erdal N., Cicek N.Y., Ekmekci D., and Kaya K. 2017. Drought effects on yield traits of some Sunflower inbreds. *Agriculture and Forestry*, 61(4): 101-107.
- Pekcan V., Evcı G., Yılmaz M.L., Balkan A.S., Nalcaiyi S.C., Erdal N., Cicek N.Y., Ekmekci D., and Kaya Y. 2016. Effects of drought on morphological traits of some Sunflower lines. *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*, 2(2):54-68.
- Robert G.A., Rajasekar M., and Manivannan P. 2016. Triazole-induced drought stress amelioration on growth yield, and pigments composition of *Helianthus annuus* L. (Sunflower). *International Multidisciplinary Research Journal*, 5: 6-15.
- Rahimizadeh M., Kashani A., Zare Feizabady A., Madani H., and Soltani E. 2010. Effect of micronutrient fertilizers on Sunflower growth and yield under drought stress conditions. *Electronic Journal of Crop Production*, 3(1): 57-72. (In Persian)
- Roshdi M., Heydari Sharifabad H., Karimi M., Nourmohammadi G.H., and Darvish F. 2006. A Survey on the impact of water deficiency over the yield of Sunflower seed cultivar and its components. *Journal of Agricultural Science*, 12(1): 109-121.
- Sayed S.A., and Gadallah M.A.A. 2014. Effects of Silicon on *Zea mays* plants exposed to water and oxygen deficiency. *Russian Journal of Plant Physiology*, 61: 493-499.
- Sepehr A., and Malakouti M.J. 2005. Study on effect of K, Mg, Si and Zn micronutrients on improving yield and quality of Sunflowers. *Journal of Water and Soil Science*, 18(1): 29-36. (In Persian)
- Shen X., Zhou Y., Duan L., Li Z., Eneji A.E., and Li J. 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of Soybean seedlings under drought and Ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, 167: 1248-1252.
- Shi Y., Zhang Y., Han W., Feng R., Hu Y., Guo J., and Gong H. 2016. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, (7): 196-218.

- Trejo L., Garcia A., Escobar H., Ramirez S., Bello J., and Gomez F. 2020. Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *Plant Biology*, 7: 1-28.
- Yadollahi P., Asgharipour M.R., Marvane H., and Kheiri N. 2017. The effect of drought stress on grain and oil yield of two Cultivars of Sunflower. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 1(1): 65-75. (In Persian)
- Yadollahi P., Bagheri A.A., Amiri A., and Esmailzadeh S. 2014. Effects of drought and foliar application on yield and photosynthetic pigments Sunflower. *Journal of Crop Physiology*, 6 (21): 73-83. (In Persian)
- Zareei Siahbidi A., Rezaizad A., and Daneshian J. 2020. Effect of deficit irrigation on seed yield and yield components of Sunflower (*Helianthus Annuus L.*) hybrids. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 22(1): 1-14. (In Persian)

The Effect of Silicon Application on Some Physiological Characteristics, Yield and Yield Components of Sunflower (*Helianthus.annus* L.) under Different Moisture Levels

Gholamreza Zamani ¹, Zohreh Nabipour ^{2*}, Yadollah Gheisari³

(Received: August 2020 Accepted: December 2020)

Abstract

Available water is the main limiting factor in crop growth and production in arid lands. In order to investigate the effect of silicon application on yield and yield components of sunflower under different moisture levels, an experiment was conducted in the form of split plots in a randomized complete block design with three replications in Gonabad. The main factor of irrigation with different moisture levels based on water requirement includes 100% water requirement, 80% water requirement, 60% water requirement and 40% water requirement, and the secondary factor of silicon consumption time in four levels No application (control), application in vegetative stage, application in reproductive stage, application in both vegetative and reproductive stage. The experimental results showed that reducing the moisture level from 100% to 40% water requirement reduced head diameter, head dry weight, chlorophyll index, relative water content, number of seed per head, 1000-seed weight, seed yield, biological yield, harvest index, oil percentage, oil yield and seed yield; So that the lowest amount of seed yield (1730.8 kg / ha) and biological yield (10458.21 kg / ha) were obtained in the treatment of moisture level of 40% water requirement. Also, the application of silicon under low irrigation levels based on water requirement improved the effects of reducing moisture levels in all evaluated traits and seed yield. The highest seed yield (7572.96 kg / ha) was obtained in the treatment of 80% water requirement and application silicon in the vegetative and reproductive stages and the lowest seed yield (1193.54 kg / ha) was obtained in the treatment of 40% water requirement and without the use of silicon. The application of silicon in the vegetative and reproductive stages compared to the control treatment increased 2.5, 1.5 and 2.5 times the oil yield at different levels of irrigation, including 80, 60 and 40% water requirement. In general, the results showed that the use of silicon in the vegetative and reproductive stages at a moisture level 80% the water requirement compensated for the adverse effects of reducing the moisture level in the studied traits.

Keywords: Number of seeds per head, Seed yield, Oil yield, Head diameter, 1000-seed weight

Zamani G.R., Nabipour Z. and Gheisari Y. 2021. The effect of silicon application on some physiological characteristics, yield and yield components of Sunflower (*Helianthus.annus* L.) under different moisture levels. *Applied Soil Research*, 9(3): 57-72.

1. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran

2. Ph.D. in Agriculture, Gonabad Agricultural and Natural Resource and Education station, Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi, AREEO. Gonabad. Iran.

3. Ph.D. Student, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Iran

* Corresponding Author Email: zohreh.nabipour@yahoo.com