

اثر پاشش نانوسیلیس و تبوکونازول روی برخی صفات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد شکر سفید چغندر قند تحت تنش خشکی

Impact of nanosilicon and tebuconazole foliar application on some physiological traits, growth and white sugar yield of sugar beet under drought stress

شاهرخ نامجویان^۱؛ ابادر رجبی^{۲*}؛ علی سروشزاده^۳ و مجید آقاعلیخانی^۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۴

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2020.126870.1225 ; DOR: 20.1001.1.17350670.1398.35.2.3.7

ش. نامجویان، ا. رجبی، ع. سروشزاده و م. آقاعلیخانی. ۸۹۳۱. اثر پاشش نانوسیلیس و تبوکونازول روی برخی صفات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد شکر سفید چغندر قند تحت تنش خشکی. چغندر قند، ۳۵(۲): ۱۵۷-۱۷۴.

چکیده

شواهد زیادی وجود دارد که نقش تریازولها و سیلیس را در تخفیف اثرات تنش‌های غیرزیستی نشان می‌دهند. با این وجود، تاکنون قابلیت نانوسیلیس و تبوکونازول و اثرات متقابل احتمالی آنها در بهبود اثرات تنش خشکی و مکانیسم‌های مرتبط با آن در چغندر قند مورد بررسی قرار نگرفته است. به این منظور، یک آزمایش فاکتوریل خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه تحقیقاتی مهندس مطهری واقع در کمالشهر کرج طی سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ انجام شد. سه رژیم آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه (به ترتیب آبیاری معمول، تنش ملایم و تنش شدید) در کرت‌های اصلی قرار گرفتند. کرت‌های فرعی شامل ترکیب فاکتوریل سه سطح پاشش نانو سیلیس (+، ۱ و ۲ میلی‌مولار) و دو سطح تبوکونازول (۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر) بودند. نتایج نشان داد در شرایط تنش شدید خشکی، اثر نانوسیلیس روی صفات مورد بررسی وابسته به دز بود به طوری که کاربرد نانوسیلیس با غلظت یک میلی‌مولار موجب بهبود پارامترهای رشد و صفات فیزیولوژیکی شد و عملکرد شکر سفید و حداکثر ماده خشک را به ترتیب به میزان ۲۰ و ۱۷ درصد در مقایسه با تیمار تنش شدید خشکی بدون کاربرد نانوسیلیس، افزایش داد. در شرایط تنش شدید خشکی (آبیاری به میزان ۵۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه)، بیشترین شاخص سطح برگ، میزان کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ در تیمار مصرف یک میلی‌مولار نانو سیلیس مشاهده شد. در شرایط تنش شدید خشکی، کاربرد سیلیس به میزان دو میلی‌مولار اثر نامطلوبی بر عملکرد شکر داشت. کاربرد توأم سیلیس و تبوکونازول از طریق حفظ سبزی‌نگی گیاه و جلوگیری از پیری برگ‌ها موجب بهبود تولید ماده خشک و عملکرد شکر شد که ممکن است بیانگر وجود اثر متقابل بین دو ترکیب مذکور باشد. این نتایج نشان می‌دهد که نانوسیلیس و تبوکونازول می‌توانند به عنوان ابزار مناسبی برای تخفیف اثرات تنش خشکی در چغندر قند مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: تبوکونازول، تنش خشکی، چغندر قند، نانوسیلیس

۱- دانش آموخته دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشیار مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. * نویسنده مسئول a.rajab@areeo.ac.ir

۳- دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

مقدمه

عملکرد چغندر قند به شدت به شرایط اقلیمی در طول فصل رشد بستگی دارد (Kenter *et al.* 2006; Mirzaei and Abdollahian- Noghabi 2012). از این رو، تنش آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده تولید چغندر قند در جهان به شمار می‌رود به طوری که در مواردی میزان عملکرد این گیاه را تا بیش از ۴۰ درصد کاهش می‌دهد (Putnik-Delic *et al.* 2013). تحمیل تنش آبی در مراحل اولیه نمو چغندر قند نه تنها از رشد و توسعه برگ‌ها ممانعت می‌نماید بلکه رشد ریشه را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Chołuj *et al.* 2014). علاوه بر این، تنش رطوبتی می‌تواند تجمع ماده خشک (DM)، شاخص سطح برگ (LAI) و سرعت رشد محصول (CGR) چغندر قند را به طور زیانباری تحت تأثیر قرار داده و از این طریق عملکرد ریشه و شکر را کاهش دهد (Abayomi and Wright 2002).

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در مورد کاربرد ترکیبات شیمیایی در مزارع به منظور حفظ پتانسیل آب گیاه در شرایط کمبود رطوبت خاک با هدف نهایی بهبود راندمان مصرف آب انجام شده است. از جمله این ترکیبات، تریازول‌ها و کودهای سیلیس هستند که کارایی آنها در تخفیف تنش‌های محیطی نظیر خشکی و شوری در تحقیقات مختلف نشان داده شده است (Jaleel *et al.* 2008; Etesami and Jeong 2018).

تبوکونازول با فرمول شیمیایی $C_{16}H_{22}ClN_3O$ یک بازدارنده بیوسنتز جیبرلین است که به گروه تریازول‌ها تعلق دارد. نشان داده شده تبوکونازول با تأثیر بر صفات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاهان، باعث القای مقاومت

به انواع تنش‌های غیرزیستی می‌شود. در یک آزمایش، تیمار بوته‌های گوجه‌فرنگی با تبوکونازول علاوه بر بهبود محتوای نسبی آب برگ‌ها، موجب افزایش وزن خشک ریشه، از دما هوایی و رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش شوری گردید. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، کاربرد تبوکونازول توسعه اولیه تاج پوشش گیاهی و ارتفاع بوته‌های کلزا را کاهش داد (Tuna 2014; Child *et al.* 1993).

با وجودی که سیلیس بعد از اکسیژن فراوان‌ترین عنصر موجود در پوسته زمین را تشکیل می‌دهد اما به عنوان یک عنصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان شناخته نمی‌شود. باین وجود، شواهد زیادی در مورد اثر مطلوب کاربرد سیلیس روی رشد گیاهان به ویژه در شرایط وجود تنش‌های محیطی وجود دارد (Etesami and Jeong 2018). نتایج مطالعات هاتوری و همکاران (Hattori *et al.* 2005) نشان داد در شرایط تنش خشکی، سیلیس نقش مهمی در رشد ریشه‌های سورگوم و حرکت آب از خاک به طرف ریشه‌ها ایفا می‌نماید.

در سال‌های اخیر استفاده از فن‌آوری‌های نوین نظیر نانوتکنولوژی در کشاورزی به عنوان یکی از راه‌های افزایش رشد و عملکرد محصولات زراعی و کاهش خطرات ناشی از تنش‌های محیطی مدنظر قرار گرفته است. در این رابطه بهبودی و همکاران (Behboudi *et al.* 2018) گزارش کردند در شرایط تنش خشکی، مصرف حاکی نانوسیلیس موجب افزایش میزان سبزیگی و محتوای نسبی آب در برگ‌های گندم در مقایسه با تیمار شاهد گردید و میزان سطح برگ و بیوماس گیاه را به طور معنی‌داری افزایش داد.

نانو ذرات دارای ابعادی کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشند که موجب افزایش نسبت سطح به حجم و حلالیت بالای آنها در آب شده و نفوذ آنها را داخل

ویژگی‌های فیزیولوژیکی چغندر قند و بررسی احتمال وجود اثر متقابل بین آنها انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی مهندس مطهری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند واقع در کمالشهر کرج با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی انجام شد. اطلاعات هواشناسی محل آزمایش به صورت روزانه از ایستگاه سینوپتیک کرج اخذ شد (جدول ۱). قبل از کاشت، نمونه برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک مزرعه انجام و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری گردید (جدول ۲).

بافت‌های گیاهی تسهیل می‌نماید (Klaine et al., 2017; Tripathi et al., 2008) با وجودی که کاربرد نانوسیلیس بیش از سایر انواع نانو ذرات توجه محققین را به خود جلب نموده است لیکن تاکنون تأثیر آن بر شاخص‌های رشد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهان به خصوص تحت تنش خشکی به خوبی مورد بررسی قرار نگرفته است. از سوی دیگر، مطالعات انجام شده در مورد تأثیر تریازول‌ها روی رشد و نمو گیاهان نیز محدود به چند ترکیب خاص از انواع تریازول‌ها بوده است. از این رو این تحقیق با هدف بررسی اثر تیوکونازول و نانوسیلیس بر شاخص‌های رشد و عملکرد و برخی

جدول ۱ برخی از مؤلفه‌های مهم هواشناسی ایستگاه سینوپتیک کرج در فصل رشد چغندر قند در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶

ماه	میانگین درجه حرارت (سانتی‌گراد)		میانگین رطوبت نسبی (درصد)		مجموع بارندگی (میلی‌متر)		مجموع تبخیر (میلی‌متر)	
	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۵	۱۳۹۶
اردیبهشت	۲۰/۳	۲۰/۸	۴۳	۴۰	۱۲/۶	۲۳/۴	۱۷۲/۴	۱۳۸/۲
خرداد	۲۳/۸	۲۷/۰	۳۹	۳۷	۰/۳	۰	۳۳۵/۵	۳۳۷/۳
تیر	۲۷/۴	۲۸/۲	۳۷	۳۵	۰/۲	۰/۹	۴۰۸/۴	۳۵۲/۳
مرداد	۲۷/۳	۲۷/۸	۳۷	۳۵	۰	۰	۳۶۵/۰	۳۸۳/۸
شهریور	۲۴/۸	۲۵/۶	۳۷	۳۹	۰	۰	۲۸۰/۹	۲۸۷/۸
مهر	۱۸/۷	۱۷/۰	۴۱	۴۵	۰	۶	۱۸۸/۹	۱۸۱/۸

جدول ۲ برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر

مشخصات فیزیکی					
نقطه پژمردگی	ظرفیت زراعی	وزن مخصوص ظاهری	بافت خاک	رس	سیلت
(درصد)	(درصد)	(گرم بر سانتی متر مکعب)			(درصد)
۹/۷۴	۲۱/۰۵	۱/۱۳	لومی	۲۶	۳۶
مشخصات شیمیایی					
پتاسیم	فسفر	آمونیم	نیترات	کربن آلی	هدایت الکتریکی
(میلی‌گرم در کیلوگرم)	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	(قسمت در میلیون)		(درصد)	(میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر)
۵۶۶	۱۴/۴۰	۱۸/۲	۱۵/۳	۰/۸	۱/۱۱

در اینجا ETC عبارت است از تبخیر و تعرق گیاه برحسب میلی‌متر در روز، E_{pan} عبارت است از میزان تبخیر روزانه آب از تشتک تبخیر کلاس A. پارامترهای K_p و K_c به ترتیب عبارت‌اند از ضریب گیاهی و ضریب تشتک که بر اساس نشریه فنی شماره ۵۶ سازمان خواروبار جهانی محاسبه شدند. پارامتر I عبارت است از حجم آب آبیاری برای هر تیمار، A ، I_i و E_a به ترتیب عبارت‌اند از سطح هر کرت، فواصل آبیاری (۷ روز) و راندمان آبیاری که با توجه به روش آبیاری مورد استفاده در آزمایش (نواری - قطره ای) ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. حجم آب مورد نیاز هر کرت توسط کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. قبل از اعمال تیمارهای تنش آبی کلیه واحدهای آزمایشی در سال اول و دوم آزمایش بصورت یکسان به ترتیب به میزان ۱۹۴/۳ و ۲۲۳/۸ میلی‌متر آبیاری شدند بر این اساس مجموع آب مورد استفاده در تیمار فاقد تنش آبی در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب ۸۶۲/۵ و ۹۰۵/۱ میلی‌متر بود. مجموع آب مورد استفاده در تیمارهای مختلف آبیاری پس از اعمال تنش آبی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ مجموع آب مورد استفاده در تیمارهای مختلف آبیاری

سال	آبیاری معمول	تنش ملایم خشکی	تنش شدید خشکی
	(میلی متر)		
۱۳۹۵	۶۶۸/۲	۵۲۴/۸	۳۸۱/۳
۱۳۹۶	۶۸۱/۳	۴۲۸/۸	۳۷۶/۲

قبل از اعمال تنش آبی کلیه واحدهای آزمایشی بطور یکسان در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب ۱۹۴/۳ و ۲۲۳/۸ میلی‌متر آبیاری شدند.

تیمار برگ‌های چغندرقد با نانو سیلیس و توبوکونازول هریک به صورت جداگانه در دو نوبت (یک هفته قبل از اعمال تنش آبی و سه هفته بعد از اعمال تنش آبی (مرحله ۱۰ تا ۱۲ برگگی) با استفاده از سمپاش دستی انجام شد. نانو سیلیس مورد

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار با استفاده از رقم اکباتان انجام شد. سه رژیم آبیاری شامل آبیاری به میزان ۱۰۰ (آبیاری به روش معمول - شاهد)، ۷۵ (تنش ملایم) و ۵۰ (تنش شدید) درصد تبخیر و تعرق گیاه به عنوان عامل اصلی و ترکیب فاکتوریل پاشش نانوسیلیس در سه سطح (۱۰۰، ۲ و ۰ میلی‌مولار) و محلول پاشی توبوکونازول در دو سطح (۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر) به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند.

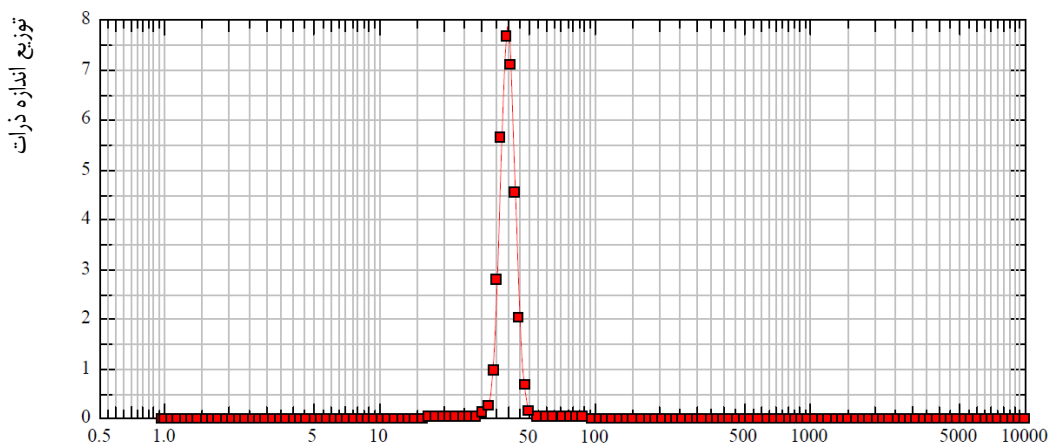
آماده‌سازی بستر کاشت (شامل عملیات شخم، دیسک و تسطیح) در پاییز سال قبل انجام و در بهار با مناسب شدن شرایط زمین و انجام دیسک سبک، به ترتیب در یازدهم و ششم اردیبهشت سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ اقدام به کاشت شد. جهت تأمین فسفر و نیتروژن خاک، به ترتیب ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هنگام کاشت در زمین توزیع و به وسیله دیسک سبک با خاک مخلوط گردید. همچنین، میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره به صورت سرک پس از تنک و وجین به خاک افزوده شد. کاشت بذور به روش خشکه کاری و با دستگاه ردیف‌کار چغندرقد (ایپورد) با فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر انجام شد و بلافاصله زمین آبیاری گردید. عملیات تنک مزرعه در مرحله چهار تا شش برگگی چغندرقد انجام شد و فاصله بوته‌ها روی ردیف حدود ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد تا تراکم مطلوب ۱۰۰ هزار بوته در هکتار حاصل شود. در این آزمایش، هر واحد آزمایشی (کرت) مشتمل بر پنج ردیف به طول هشت متر بود. تیمارهای آبیاری از مرحله شش تا هشت برگگی چغندرقد اعمال گردید و تا مرحله برداشت ادامه یافت. حجم آب مورد استفاده در هر تیمار با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد:

$$ETC = E_{pan} \times K_c \times K_p \quad (1)$$

$$I = \frac{ETC \times A \times I_i}{E_a \times 100} \quad (2)$$

برای تعیین وزن خشک، پس از جدا سازی قسمت‌های مختلف گیاه، هر یک از اندام‌ها به صورت جداگانه درون پاکت کاغذی قرار داده شد و به مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از ثابت شدن وزن خشک گیاه، وزن خشک هر نمونه با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد.

استفاده در این آزمایش از منبع سدیم سیلیکات ساخت شرکت سیگما آلدریج و به روش لیو و همکاران (Liu et al. 2009) تهیه شد و متوسط اندازه ذرات با استفاده از دستگاه آنالیز اندازه ذرات نانو (مدل Nanophox، ساخت آلمان) ۲۰ تا ۳۵ نانومتر تعیین گردید (شکل ۱). همچنین قارچ کش تبوکونازول بانام تجاری فولیکور از شرکت مرک آلمان تهیه گردید.



اندازه ذرات (نانومتر)

شکل ۱ اندازه و توزیع ذرات نانوسیلیس مورد استفاده در آزمایش بر اساس روش تفرق نور دینامیکی

(بالا، وسط و پایین) برگ پنجم بالای هر بوته اندازه‌گیری شد و میانگین اعداد به‌عنوان شاخص کلروفیل هر بوته در نظر گرفته شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد شکر، ناخالصی‌های ریشه با استفاده از دستگاه بتالایزر اندازه‌گیری شد و قند ملاس با استفاده از فرمول پیشنهادی راینفلد و همکاران (Reinefeld et al. 1974) محاسبه گردید. محتوای نسبی آب برگ به روش پیشنهادی یاماساکی و دیلنبرگ (Yamasaki and Dillenburg 199) تعیین شد.

داده‌های حاصل از نمونه‌برداری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 مورد آنالیز قرار گرفتند. برای بررسی داده‌ها و انجام تجزیه واریانس مرکب، آزمون یکنواختی اشتباهات آزمایشی (آزمون بارتلت) انجام شد. برای برازش معادلات غیرخطی رشد و به دست آوردن ضرایب آنها و همچنین رسم نمودارها از نرم‌افزار EXCEL استفاده شد. مقایسه میانگین

با استفاده از تابع تغییرات وزن خشک کل گیاه (TDW) و شاخص سطح برگ (LAI)، میزان سرعت رشد گیاه (CGR)، سرعت اسمیلاسیون خالص (NAR) و دوام سطح برگ (LAD) محاسبه گردید (Ozoni et al. 2008). از آنجا که تغییرات وزن خشک و سطح برگ گیاه تابع درجه دوم از زمان هستند به ترتیب با استفاده معادلات (۳) و (۴) محاسبه شدند.

$$TDW = a + bt + ct^2 \quad (3)$$

$$LAI = e + a'' + b''t + c''t^2 \quad (4)$$

در توابع فوق e پایه لگاریتم طبیعی، پارامترهای c''

، b'' ، a'' ، b ، c ضرایب ثابت معادلات و t زمان است.

برای اندازه‌گیری شاخص کلروفیل برگ از دستگاه کلروفیل‌متر (مدل SPADMinolta-۵۰۲) استفاده شد. بدین منظور یک ماه بعد از تاریخ محلول‌پاشی دوم، پنج گیاه به صورت تصادفی از هر کرت انتخاب شد و میزان کلروفیل سه قسمت

بر درصد شکر قابل استحصال است که پیش‌تر نیز در گزارش‌های مختلفی بدان اشاره شده است (Khorshid and Rajabi 2014; Kiyamaz and Ertek 2015).

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که عملکرد شکر و حداکثر وزن خشک تحت تأثیر اثر متقابل آبیاری × نانوسیلیس و اثر متقابل تبوکونازول × نانو سلیس قرار گرفت ($p \leq 0.01$) (جدول ۴).

پاشش نانو سلیس در کلیه سطوح آبیاری موجب بهبود عملکرد شکر و حداکثر وزن خشک گیاه شد (جدول ۵ و ۶). در شرایط تنش شدید آب، کاربرد نانوسیلیس به میزان یک میلی‌مولار میزان عملکرد شکر و ماده خشک را در مقایسه با گیاهانی که تنها تحت تنش شدید خشکی قرار داشتند به ترتیب به میزان ۲۰ و ۱۷ درصد افزایش داد (جدول ۶). مشخص شده است که کاربرد سلیس در گیاهان از طریق افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و حفظ سطح سبز برگ موجب افزایش تولید ماده خشک می‌گردد (Gong and Chen 2012). از آنجاکه عملکرد شکر تابعی از وزن ریشه و میزان شکر قابل استحصال است، به نظر می‌رسد بخشی از افزایش عملکرد شکر سفید ناشی از تأثیر سلیس بر شاخص‌های رشد و صفات فیزیولوژیکی چغندر قند به‌ویژه در شرایط تنش خشکی باشد. یافته‌های این مطالعه نیز نشان داد بین تمامی شاخص‌های رشد، میزان کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ‌ها با عملکرد شکر همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد (جدول ۱۲). از سوی دیگر جذب سلیس توسط گیاهان منجر به تشکیل لایه‌ای روی اپیدرم برگ‌ها و کاهش تعرق می‌شود که گیاه را قادر به حفظ پتانسیل آب در شرایط تنش خشکی می‌نماید (Ahmed et al. 2014). افزایش میزان ماده خشک و عملکرد شکر در اثر کاربرد سلیس در شرایط تنش خشکی توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Farazi et al. 2018).

صفات موردبررسی با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک و پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

وزن خشک و عملکرد شکر سفید

همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده است حداکثر وزن خشک و عملکرد شکر سفید تحت تأثیر عامل سال قرار نگرفت. با این‌وجود یافته‌های آزمایش نشان داد در سال دوم میزان تولید ماده خشک و شکر بیشتر از سال اول بود (جدول ۵). تولید ماده خشک چغندر قند، به میزان سطح برگ تولید شده توسط گیاه و مقدار تشعشع دریافتی در ابتدای دوره رشد بستگی دارد که خود تابعی از درجه حرارت می‌باشند. از این‌رو، توسعه سریع تاج پوشش چغندر قند در اوایل فصل رشد برای افزایش جذب نور در اواخر بهار و اوایل تابستان و در نتیجه افزایش تولید بیوماس و عملکرد شکر بسیار با اهمیت است (Milford 2006). به نظر می‌رسد دلیل بالاتر بودن عملکرد شکر و تولید ماده خشک در سال دوم آزمایش به‌واسطه بالا بودن متوسط درجه حرارت روزانه در ماه آخر فصل بهار و در نتیجه تأمین سریع‌تر واحد دمایی مورد نیاز برای توسعه تاج پوشش گیاه در ابتدای فصل رشد باشد (جدول ۱). در انطباق با این مشاهدات، محمدیان (Mohammadian 2016) نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده است.

در مقایسه با گیاهانی که در شرایط آبیاری معمول قرار داشتند تنش ملایم خشکی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد شکر و وزن خشک گیاه نداشت اما تنش شدید خشکی موجب کاهش معنی‌دار عملکرد شکر و وزن خشک گیاه گردید (جدول ۵ و ۶). میزان این کاهش برای عملکرد شکر ۲۱ درصد و برای حداکثر وزن خشک ۲۷ درصد برآورد گردید (جدول ۶). به نظر می‌رسد عدم کاهش معنی‌دار عملکرد شکر به‌واسطه تنش ملایم خشکی عمدتاً به واسطه اثر مثبت تنش ملایم خشکی

جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس مرکب صفات مورد مطالعه

میانگین مربعات									
منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد شکر سفید	ماده خشک در هر مترمربع از زمین	محتوای نسبی آب برگ	شاخص کلروفیل	حداکثر سرعت رشد محصول	حداکثر سرعت اسمیلانسیون خالص	حداکثر شاخص سطح برگ	دوام سطح برگ
سال	۱	۱/۵۴ ^{NS}	۰/۹۳ ^{NS}	۵۴۹/۰۴ ^{**}	۷۳۲/۹۲ *	۸۸/۲۶ ^{NS}	۱/۷۰ ^{NS}	۰/۴۴ ^{NS}	۱۲۶۹۹/۲۲ ^{NS}
تکرار (سال)	۶	۰/۷۱	۰/۰۱	۳/۱۷	۱۲/۷۳	۳/۷۹	۲/۴۰	۰/۱۱	۲۸۰/۵۶
آبیاری	۲	۴۸/۵۳ *	۴/۴۳ *	۲۰۲۳/۶۶ *	۴۳۵/۲۲ ^{**}	۱۱۵۳/۹۹ *	۱۹/۳۵ *	۸/۲۶ ^{**}	۵۸۶۳۴/۸۱ *
سال × آبیاری	۲	۳/۶۴ ^{NS}	۰/۰۷ ^{NS}	۴۷/۵۳ ^{NS}	۳/۴۶ ^{NS}	۱۲/۹۴ ^{NS}	۰/۵۷ ^{NS}	۰/۱۸ ^{NS}	۹۹۹/۴۳ ^{NS}
اشتباه اصلی	۱۲	۰/۹۶	۰/۰۲	۱۶/۴۱	۷/۸۵	۴/۸۲	۰/۳۷	۰/۰۶	۳۷۱/۷۰
تیوکونازول	۱	۱۰/۰۱ ^{NS}	۰/۳۳ ^{NS}	۲۲۴/۰۵ ^{NS}	۹۰/۴۹ ^{NS}	۲۷/۲۱ ^{NS}	۱۰/۷۸ ^{NS}	۰/۱۷ ^{NS}	۸۳/۶۴ ^{NS}
سال × تیوکونازول	۱	۰/۳۸ ^{NS}	۰/۰۱ ^{NS}	۶/۶۸ ^{NS}	۷/۶۳ ^{NS}	۲/۰۳ ^{NS}	۰/۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۱ ^{NS}	۹۴۵/۳۱ ^{NS}
آبیاری × تیوکونازول	۲	۰/۷۲ ^{NS}	۰/۰۵ *	۱۱۱/۵۷ ^{NS}	۱/۶۸ ^{NS}	۱۷/۰۶ ^{NS}	۰/۷۶ ^{NS}	۰/۷۷ ^{**}	۳۵۷۹/۷۸ ^{NS}
سال × آبیاری × تیوکونازول	۲	۰/۳۷ ^{NS}	۰/۰۰۲ ^{NS}	۱۲/۴۰ ^{NS}	۰/۴۵ ^{NS}	۰/۸۴ ^{NS}	۰/۳۹ ^{NS}	۰/۰۳ ^{NS}	۴۱۹/۹۶ ^{NS}
نانو سیلیس	۲	۵/۹۶ *	۰/۲۵ *	۱۷۳/۳۴ *	۳۹/۴۵ *	۶۷/۳۱ ^{**}	۰/۳۹ ^{NS}	۱/۸۵ ^{**}	۵۵۰۷/۱۸ ^{NS}
سال × نانو سیلیس	۲	۰/۳۱ ^{NS}	۰/۰۰۴ ^{NS}	۱۳/۳۸ ^{NS}	۱/۰۸ ^{NS}	۰/۷۱ ^{NS}	۰/۴۱ ^{NS}	۰/۰۱ ^{NS}	۴۷۸/۸۶ ^{NS}
آبیاری × نانو سیلیس	۴	۱۰/۰۷ ^{**}	۰/۴۳ ^{**}	۳۸۲/۰۲ ^{**}	۷۷/۰۵ ^{**}	۱۴۷/۳۱ *	۷/۸۵ *	۱/۲۶ *	۷۱۹۴/۳۰ ^{**}
سال × آبیاری × نانو سیلیس	۴	۰/۳۱ ^{NS}	۰/۰۲ ^{NS}	۲۱/۰۵ ^{NS}	۳/۷۲ ^{NS}	۱۱/۰۸ ^{NS}	۰/۶۱ ^{NS}	۰/۰۵ ^{NS}	۲۴۴/۵۰ ^{NS}
تیوکونازول × نانو سیلیس	۲	۴/۴۳ ^{**}	۰/۰۱ ^{NS}	۷۲/۵۷ ^{NS}	۲۱/۱۷ *	۵/۶۶ ^{NS}	۳/۱۹ ^{NS}	۰/۷۵ ^{**}	۱۲۸۱/۶۵ ^{NS}
سال × تیوکونازول × نانو سیلیس	۴	۰/۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۰۴ ^{NS}	۳۴/۶۱ ^{NS}	۱/۳۲ ^{NS}	۰/۳۹ ^{NS}	۰/۵۴ ^{NS}	۰/۰۰۲ ^{NS}	۱۴۷۱/۸۵ ^{NS}
آبیاری × تیوکونازول × نانو سیلیس	۲	۰/۷۲ ^{NS}	۰/۰۳ ^{NS}	۱۰/۵۶ ^{NS}	۱/۹۲ ^{NS}	۳/۴۷ ^{NS}	۰/۵۳ ^{NS}	۰/۱۶ ^{NS}	۸۵۵/۷۴ ^{NS}
سال × آبیاری × تیوکونازول × نانو سیلیس	۴	۰/۵۱ ^{NS}	۰/۰۱ ^{NS}	۳/۵۷ ^{NS}	۱/۴۲ ^{NS}	۱/۵۰ ^{NS}	۰/۱۴ ^{NS}	۰/۰۲ ^{NS}	۳۹۱/۶۳ ^{NS}
اشتباه فرعی	۹۰	۰/۶۴	۰/۰۱۳	۱۵/۷۹	۷/۳۶	۳/۵۹	۰/۷۴	۰/۸۲	۳۵۹/۷۶
ضریب تغییرات (درصد)		۱۰/۵۳	۶/۹۷	۴/۸۴	۵/۶۴	۷/۵۲	۶/۹۸	۱۲/۰۰	۷/۸۵

NS تفاوت غیر معنی دار، *، ** تفاوت معنی دار به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۵ مقایسه میانگین دو ساله (۹۶-۱۳۹۵) اثر اصلی سال، رژیم آبیاری، محلول پاشی تیوکونازول و نانوسیلیس بر صفات مورد مطالعه

تیمار	عملکرد شکر سفید (تن در هکتار)	حداکثر سرعت تجمع ماده خشک (کیلوگرم در مترمربع)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	شاخص کلروفیل (SPAD)	حداکثر سرعت رشد محصول (گرم بر مترمربع در روز)	حداکثر سرعت اسمیلاسیون خالص	حداکثر شاخص سطح برگ	دوام سطح برگ
سال								
اول	۷/۵۱ a	۱/۵۳ a	۸۰/۰۹ b	۴۵/۸۸ b	۲۴/۳۹ a	۱۲/۲۵ a	۲/۳۴ a	۲۳۲/۱۱ a
دوم	۷/۸۲ a	۱/۶۹ a	۸۳/۹۹ a	۵۰/۴۰ a	۲۵/۹۶ a	۱۲/۴۶ a	۲/۴۵ a	۲۵۰/۸۹ a
رژیم آبیاری								
آبیاری معمول	۸/۴۰ a	۱/۸۴ a	۸۶/۵۹ a	۴۹/۳۶ a	۲۸/۶۴ a	۱۲/۹۲ a	۲/۶۵ a	۲۶۵/۳۵ a
تنش ملایم خشکی	۷/۹۷ b	۱/۷۳ b	۸۴/۹۳ a	۵۰/۳۵ a	۲۷/۳۳ b	۱۲/۴۹ b	۲/۶۳ a	۲۵۸/۷۲ a
تنش شدید خشکی	۶/۴۸ c	۱/۲۸ c	۷۴/۶۰ b	۴۴/۷۱ b	۱۹/۵۷ c	۱۱/۶۷ c	۱/۹۲ b	۲۰۱/۳۴ b
نانو سیلیس (میلی مولار)								
۰	۷/۰۹ b	۱/۴۵ b	۷۸/۹۰ b	۴۶/۴۸ b	۲۲/۶۴ b	۱۱/۸۲ b	۲/۲۳ b	۲۲۶/۹۶ b
۱	۷/۸۲ a	۱/۶۸ a	۸۴/۵۳ a	۴۹/۵۴ a	۲۶/۵۶ a	۱۲/۶۵ a	۲/۵۴ ab	۲۵۱/۱۹ a
۲	۷/۹۴ a	۱/۷۰ a	۸۲/۶۸ a	۴۸/۳۹ a	۲۶/۳۳ a	۱۲/۶۰ a	۲/۴۱ a	۲۴۶/۳۵ a
تیوکونازول (میلی گرم در لیتر)								
۰	۷/۳۵ a	۱/۵۷ a	۸۰/۷۹ a	۴۷/۳۵ a	۲۴/۷۴ a	۱۲/۰۸ a	۲/۴۳ a	۲۴۲/۲۶ a
۲۵	۷/۸۸ a	۱/۶۶ a	۸۳/۲۹ a	۴۸/۹۳ a	۲۵/۶۱ a	۱۲/۶۳ a	۲/۳۶ a	۲۴۰/۷۴ a

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال پنج درصد معنی دار نیستند.

جدول ۶ مقایسه میانگین دوساله (۹۶-۱۳۹۵) اثر متقابل رژیم آبیاری و پاشش نانوسیلیس بر صفات عملکرد شکر و حداکثر تجمع ماده خشک

حداکثر تجمع ماده خشک (کیلوگرم در مترمربع)	عملکرد شکر سفید (تن در هکتار)	تیمارها	
		نانو سیلیس (میلی مولار)	رژیم آبیاری
۱/۷۱ c	۷/۹۱ cd	۰	آبیاری معمول
۱/۸۵ ab	۸/۲۲ bc	۱	
۱/۹۵ a	۹/۰۷ a	۲	
۱/۶۶ c	۷/۴۷ d	۰	تنش ملایم
۱/۷۱ c	۷/۸۴ cd	۱	
۱/۸۴ b	۸/۵۹ ab	۲	
۱/۲۷ e	۶/۲۷ e	۰	تنش شدید
۱/۴۹ d	۷/۵۴ cd	۱	
۱/۰۷ f	۵/۶۴ e	۲	

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال یک درصد معنی دار نیستند.

سینرژیک بر عملکرد شکر داشت به طوری که بیشترین میزان عملکرد شکر سفید به میزان ۷/۹۹ تن در هکتار از این تیمار به دست آمد (جدول ۷). نتایج مشابهی در خصوص تأثیر مثبت تریازولها روی رشد و عملکرد سایر گیاهان غده‌ای از قبیل سیبزمینی و کاساوا نیز گزارش شده است (Tekalign and Hammes 2005; Gomathinayagam et al. 2007). یکی از اثرات ترکیبات تریازول و سیلیس تأثیر آنها در تغییر توازن هورمون‌های مهم گیاهی به خصوص آبسزیک اسید و سیتوکینین است که به نظر می‌رسد در این مطالعه برهمکنش این دو ماده منجر به افزایش عملکرد شکر شده است (Jaleel et al. 2008; Etesami and Jeong 2018).

نکته قابل توجه دیگر در این پژوهش کاهش عملکرد شکر و حداکثر ماده خشک در تیمار تنش شدید آبی و کاربرد دو میلی مولار نانوسیلیس در قیاس با تیمار تنش شدید آبی بدون کاربرد نانوسیلیس بود (جدول ۶). این در حالی است که از سیلیس به عنوان عنصری بی‌خطر برای گیاهان نام برده می‌شود (Etesami and Jeong 2018). این مطلب بیانگر آن است که تأثیر سیلیس روی عملکرد چغندر قند وابسته به دز مصرفی بوده و برخلاف سیلیس، کاربرد این ماده در اندازه‌های نانو و در شرایط تنش می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر رشد گیاه داشته باشد که این موضوع نیازمند بررسی بیشتری است.

پژوهش حاضر نشان داد کاربرد هم‌زمان یک میلی مولار نانو سیلیس و تیبوکونازول در شرایط تنش شدید خشکی اثری

جدول ۷ مقایسه میانگین دوساله (۹۶-۱۳۹۵) اثر متقابل محلول پاشی تیبوکونازول و نانوسیلیس بر عملکرد شکر

عملکرد شکر سفید (تن در هکتار)	تیمارها	
	نانو سیلیس (میلی مولار)	تیبوکونازول (میلی گرم در لیتر)
۶/۶۰ b	۰	۲۵
۷/۷۵ a	۱	
۷/۷۱ a	۲	
۷/۸۲ a	۰	
۷/۹۹ a	۱	
۷/۸۳ a	۲	

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال پنج درصد معنی دار نیستند.

محتوای نسبی آب برگ و شاخص کلروفیل

اثر اصلی سال بر محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی دار بود. همچنین محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر اثر متقابل آبیاری و نانو سیلیس قرار گرفت (جدول ۴). مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری و نانو سیلیس نشان داد محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر تنش ملایم خشکی قرار نگرفت اما با تشدید تنش خشکی به طور معنی داری در مقایسه با تیمار آبیاری معمول کاهش یافت (جدول ۸).

واکنش گیاهان به تنش خشکی فرایندی پیچیده است به نحوی که حتی ژنوتیپ‌های مختلف یک گیاه نیز واکنش‌های متفاوتی را نسبت به خشکی نشان می‌دهند (Ilkaee et al. 2016) در تأیید یافته‌های این تحقیق، رو مانو و همکاران (Romano et al. 2013) نشان دادند تنش ملایم اسمزی (۶- مگاپاسکال) تأثیری روی محتوای نسبی آب برگ‌های چغندر قند نداشت در حالی که اعمال تنش شدید اسمزی (۱۲- مگاپاسکال)

موجب کاهش قابل ملاحظه محتوای نسبی آب برگ‌ها گردید. کاربرد نانوسیلیس به میزان یک میلی‌مولار در شرایط تنش شدید خشکی موجب بهبود محتوای نسبی آب برگ‌ها شد به طوری که در هر دو سال بین این تیمار و تیمار آبیاری معمول از نظر آماری اختلاف معنی داری ملاحظه نگردید (جدول ۸). به صورت مشابهی نشان داده شده تیمار بوته‌های خیار با سیلیس در شرایط کمبود آب، از طریق تأثیر بر میزان اسمولیت‌ها، موجب بهبود محتوای نسبی آب برگ‌ها شد (Ouzounidou et al. 2016). همچنین برخی از محققین دلیل افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها در اثر اعمال سیلیس را به بهبود جذب آب توسط ریشه‌های گیاه در شرایط تنش اسمزی نسبت داده‌اند (Haghighi and Pessaraki 2013). یافته‌های این مطالعه در انطباق با مشاهدات حسن‌الزمان و همکاران (Hasanuzzaman et al. 2018) است که گزارش کردند کاربرد سیلیس در شرایط تنش خشکی منجر به بهبود محتوای نسبی آب برگ‌های کلزا شد.

جدول ۸ مقایسه میانگین دوساله (۹۶-۱۳۹۵) اثر متقابل رژیم آبیاری و محلول پاشی نانوسیلیس بر محتوای نسبی آب برگ و شاخص کلروفیل

شاخص کلروفیل برگ	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	تیمارها	
		نانو سیلیس (میلی مولار)	رژیم آبیاری
۴۸/۴۲ b	۸۴/۸۴ bc	۰	
۴۹/۳۵ b	۸۵/۵۱ b	۱	آبیاری معمول
۵۰/۳۰ ab	۸۹/۴۱ a	۲	
۴۸/۸۱ b	۸۱/۷۱ c	۰	
۵۰/۱۳ ab	۸۴/۰۱ bc	۱	تنش ملایم
۵۲/۱۲ a	۸۹/۰۸ a	۲	
۴۴/۵۱ c	۷۳/۲۶ d	۰	
۴۷/۷۱ b	۸۱/۳۵ c	۱	تنش شدید
۴۱/۹۱ d	۶۴/۲۰ e	۲	

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال یک درصد معنی دار نیستند.

بود (جدول ۴ و ۵). یکی از بارزترین آثار تنش خشکی کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی است. کمبود آب با افزایش گونه‌های

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر اصلی سال و اثر متقابل آبیاری × نانو سیلیس برای شاخص کلروفیل معنی دار

فتوستتزر گیاه در شرایط تنش خشکی گردد. به صورت مشابهی تأثیر مثبت کاربرد سیلیس روی بهبود محتوای کلروفیل برگ‌های بوته‌های سورگوم در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Ahmed *et al.* 2014).

شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر متقابل آبیاری × نانوسیلیس بر شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ و اثر متقابل تیموکوناول × نانوسیلیس بر شاخص سطح برگ معنی‌دار بود (جدول ۴).

مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × نانوسیلیس نشان داد همانند سایر صفات مورد بررسی در این آزمایش تنش ملایم خشکی تأثیر معنی‌داری بر کاهش سطح برگ نداشت در حالی که با افزایش شدت خشکی میزان حداکثر شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ به ترتیب به میزان ۱۸ و ۲۱ درصد در مقایسه با تیمار شاهد کاهش یافت (جدول ۹). کاربرد نانو سیلیس در کلیه سطوح آبیاری شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ را افزایش داد. در شرایط تنش شدید خشکی کاربرد یک میلی‌مولار نانوسیلیس به ترتیب موجب افزایش ۲۲ و ۱۳ درصدی شاخص سطح برگ و دوام سطح برگ در مقایسه با تیمار تنش شدید خشکی شد (جدول ۹).

از جمله بارزترین اثرات تنش خشکی در گیاهان کاهش رشد برگ‌ها و تسریع در پیری و مرگ برگ‌ها می‌باشد (Maillard *et al.* 2018). این در حالی است که مطالعات متعددی نشان می‌دهند سیلیس می‌تواند از پیری برگ‌ها مانعت به عمل آورد. در این رابطه تأثیر سیلیس در به تعویق انداختن پیری برگ‌ها در گیاه انبه (*acidni arefignaM*) نیز گزارش شده است نشان داده شده کاربرد سیلیس در بوته‌های جو در معرض تنش اسمزی از طریق افزایش میزان کلروفیل و توقف بیان ژن‌های 04SVH (ژن مسئول پیری) موجب تأخیر

فعال اکسیژن در کلروپلاست سبب تخریب مولکول‌های کلروفیل و غشای کلروپلاست می‌گردد (Wang *et al.* 2003). شکسته شدن کلروفیل و تجزیه پروتئین‌ها در مواجهه با تنش‌های محیطی از نشانه‌های اولیه پیری برگ‌ها به‌ویژه برگ‌های جوان هستند (Zhang *et al.* 2010). مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری × نانوسیلیس نشان داد تنش ملایم خشکی سبب افزایش جزئی در میزان کلروفیل برگ‌ها شد لیکن با شدت گرفتن تنش خشکی، میزان کلروفیل برگ‌ها در مقایسه با تیمار آبیاری معمول، ۸ درصد کاهش یافت (جدول ۸). کاهش میزان کلروفیل برگ‌های چغندر قند در شرایط تنش شدید خشکی توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Ahmed *et al.* 2014). به نظر می‌رسد افزایش جزئی در میزان کلروفیل برگ‌ها در تیمار تنش ملایم خشکی به‌واسطه افزایش وزن مخصوص برگ و افزایش تعداد سلول‌ها در واحد وزن برگ باشد (Nonamiet *al.* 1997). در این رابطه علایی مقدم و همکاران (Alaeimoghadam *et al.* 2019) با بررسی تأثیر تنش خشکی روی ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند مشاهده کردند با کاهش آبیاری مقدار کلروفیل برگ‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این محققین اختلاف در مقدار کلروفیل برگ‌ها در ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند را با میزان حساسیت آنها در مقابل تنش خشکی مرتبط دانستند.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد در شرایط تنش شدید خشکی، برگ‌های بوته‌هایی که با یک میلی‌مولار نانوسیلیس تیمار شده بودند به‌طور معنی‌داری از محتوای کلروفیل بیشتری (۴۷/۷۱) نسبت به گیاهان تیمار نشده (۴۴/۵۱) برخوردار بودند (جدول ۸). به نظر می‌رسد که افزایش میزان کلروفیل در اثر کاربرد نانو سیلیس به‌واسطه نقش این عنصر در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش خسارت رادیکال‌های آزاد به کلروپلاست‌ها باشد (Ahmad and Haddad 2011). همچنین ممکن است رسوب سیلیس روی دیواره سلول‌ها از تجزیه پروتئین‌ها جلوگیری نموده و موجب حفظ رنگ‌دانه‌ها و بهبود

در پیری برگ‌ها شد. (*la tetralliaM*. 8102). همچنین سیلیس از طریق افزایش پلی‌آمین‌ها و آمینوسیکلوپروپان کربوکسیلیک اسید که پیش ماده تولید هورمون اتیلن است اثرات خشکی در پیر شدن برگ‌ها را به تعویق انداخت (niY Helaly et al. 2017).

بنابراین بنظر می‌رسد دلیل افزایش شاخص و دوام سطح برگ در تیمارهای مختلف آبیاری به‌واسطه اثر سیلیس روی تأخیر پیری برگ‌ها باشد. (Helaly et al. 2017).

جدول ۹ مقایسه میانگین دو ساله (۹۶-۱۳۹۵) اثرات متقابل رژیم آبیاری و محلول پاشی نانوسیلیس بر حداکثر شاخص سطح برگ، دوام سطح برگ، سرعت رشد محصول و سرعت جذب خالص

سرعت جذب خالص	سرعت رشد محصول (گرم بر گرم در متر مربع)	دوام سطح برگ	حداکثر شاخص سطح برگ	تیمارها	
				نانو سیلیس (میلی مولار)	رژیم آبیاری
۱۳/۰۴ a	۲۶/۸۴ c	۲۵۱/۳۴ bc	۲/۲۸ d	۰	
۱۲/۹۲ a	۲۸/۵۱ b	۲۵۹/۳۲ b	۲/۷۰ bc	۱	آبیاری معمول
۱۲/۷۹ ab	۳۰/۵۶ a	۲۸۴/۵۷ a	۲/۹۶ a	۲	
۱۲/۲۴ ab	۲۵/۶۹ c	۲۳۷/۴۷ cd	۲/۳۹ d	۰	
۱۲/۵۴ ab	۲۶/۶۰ c	۲۵۶/۸۰ b	۲/۶۳ c	۱	تنش ملایم
۱۲/۷۶ ab	۲۹/۷۰ ab	۲۷۹/۹۶ a	۲/۸۶ ab	۲	
۱۱/۷۵ c	۱۹/۱۶ e	۱۹۸/۶۷ e	۱/۸۶ e	۰	
۱۲/۷۶ ab	۲۳/۵۹ d	۲۲۴/۷۰ d	۲/۲۶ d	۱	تنش شدید
۱۰/۵۰ d	۱۵/۹۴ f	۱۸۰/۶۷ f	۱/۶۵ e	۲	

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیستند.

می‌کنند و بدین ترتیب می‌توانند از ساخته شدن هورمون جیبرلین در گیاهان ممانعت و در نتیجه موجب بازداری رشد اندام‌هوایی شوند (Jaleel et al. 2008). در این رابطه ناوارو و همکاران (Navarro et al. 2007) گزارش کردند که کاربرد پاکلوبوترازول در شرایط عدم تنش رطوبتی، شاخص سطح برگ بوته‌های توت فرنگی را به مقدار ۲۹ درصد در مقایسه با تیمار شاهد کاهش داد.

در این تحقیق کاربرد تبوکونازول در شرایط تنش خشکی تأثیر معنی‌داری روی حداکثر شاخص سطح برگ نداشت. با این وجود، سانکار و همکاران (Sankar et al. 2013) گزارش کردند کاربرد پاکلوبوترازول در شرایط تنش خشکی میزان سطح برگ سیب‌زمینی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. این اختلاف احتمالاً به دلیل وجود درجات مختلفی از خواص هورمونی در تریازول‌ها و نیز اثرات متقابل تبوکونازول

مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری × تبوکونازول روی حداکثر میزان شاخص سطح برگ نشان داد در شرایط تنش خشکی کاربرد تبوکونازول تأثیر معنی‌داری روی این صفت نداشت اما کاربرد آن در گروه تیمار آبیاری معمول موجب کاهش ۱۱ درصدی شاخص سطح برگ شد (جدول ۱۰). همچنین میزان شاخص سطح برگ تحت تأثیر اثر متقابل نانو سیلیس و تبوکونازول قرار گرفت و بیشترین میزان شاخص سطح برگ به میزان ۲/۵۷ در تیمار کاربرد تبوکونازول به همراه دو میلی مولار نانو سیلیس مشاهده شد (جدول ۱۱).

مطالعات پیشین نشان می‌دهند تریازول‌ها تخصیص مواد فتوسنتزی به برگ‌های گیاه را کاهش می‌دهند که می‌تواند منتج به کاهش سطح برگ شود (Tekalign and Hammes 2005). علاوه بر این تریازول‌ها به عنوان بازدارنده گیرنده‌های سیتوکروم P450 در زنجیره انتقال الکترون عمل

(2008). در تأیید یافته‌های مطالعه حاضر، بیشتر نشان داده شده که کاربرد تبوکونازول در بوته‌های گندم پیری برگ‌ها را به تعویق انداخته و موجب افزایش دوام سطح سبز برگ گیاه گردید (Zhang et al. 2010).

با سایر هورمون‌های گیاهی از جمله سایتوکنین است (Jaleel et al. 2008). برخلاف شاخص سطح برگ، کاربرد تبوکونازول در تیمار تنش شدید خشکی، میزان دوام سطح برگ را به‌طور معنی‌داری افزایش داد که دلیل آن می‌تواند به اثر تریازول‌ها روی کاهش هورمون اتیلن نسبت داده شود (Jaleel et al.

جدول ۱۰ مقایسه میانگین دو ساله (۹۶-۱۳۹۵) اثر متقابل رژیم آبیاری و محلول‌پاشی تبوکونازول بر شاخص سطح برگ

حداکثر شاخص سطح برگ	تیمارها	
	تبوکونازول (میلی گرم در لیتر)	رژیم آبیاری
۲/۸۰ a	۰	آبیاری معمول
۲/۴۹ b	۲۵	
۲/۶۸ a	۰	تنش ملایم
۲/۵۷ a	۲۵	
۱/۸۲ c	۰	تنش شدید
۲/۰۲ c	۲۵	

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نیستند.

جدول ۱۱ مقایسه میانگین دو ساله (۹۶-۱۳۹۵) اثر متقابل محلول‌پاشی تبوکونازول و نانوسیلیس بر حداکثر شاخص سطح برگ

حداکثر شاخص سطح برگ	تیمارها	
	نانوسیلیس (میلی مولار)	تبوکونازول (میلی گرم در لیتر)
۲/۳۴ a	۰	
۲/۵۳ a	۱	۰
۲/۴۲ a	۲	
۲/۰ b	۰	
۲/۵۲ a	۱	۲۵
۲/۵۷ a	۲	

اعداد داخل هر ستون با حروف انگلیسی مشابه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نیستند.

بیشترین کاهش سرعت رشد محصول و سرعت جذب خالص در مقایسه با تیمار آبیاری متعارف به ترتیب به میزان ۳۲ و ۱۰ درصد در تیمار آبیاری به میزان ۵۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه (تنش شدید خشکی) مشاهده گردید. تیمار بوته‌های تحت تنش شدید خشکی با یک میلی‌مولار نانوسیلیس در مقایسه با بوته‌هایی که تنها تحت تنش شدید خشکی بودند منجر به

نتایج نشان داد اثر اصلی تبوکونازول بر سرعت جذب خالص و اثر متقابل آبیاری نانوسیلیس برای سرعت رشد محصول و سرعت جذب خالص در سطح پنج درصد ($p \leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۴ و ۵). در شرایط عدم کاربرد نانوسیلیس، تنش کمبود آب به‌طور زیانباری سرعت رشد چغندر قند و سرعت جذب خالص را تحت تأثیر قرارداد (جدول ۵).

(Etesami and Jeong 2018). در پژوهش حاضر از میان صفات مورد مطالعه، شاخص سطح برگ و محتوای نسبی آب برگ بیشترین میزان همبستگی را با سرعت رشد محصول داشتند (جدول ۱۲). در تأیید این مشاهدات هاتوری و همکاران (Hattori et al. 2005) نیز گزارش کردند کاربرد سیلیس در شرایط تنش خشکی موجب افزایش ماده خشک و سرعت رشد گیاه سورگوم گردید. علاوه بر این، تجمع سیلیس در برگ‌ها می‌تواند افزایش آنها را افزایش داده و در نتیجه نفوذ نور را به داخل کانونی و سرعت جذب خالص را افزایش دهد (Saud et al. 2014). در این رابطه گانگ و چن (Gong and Chen 2012) بیان داشتند کاربرد ۲/۱۱ میلی‌مول سدیم سیلیکات میزان سرعت جذب خالص در بوته‌های گندم را در شرایط تنش خشکی به میزان ۳۷ میلی‌مول کربن در مترمربع در ثانیه افزایش داد.

افزایش قابل ملاحظه سرعت رشد محصول شد با این وجود این افزایش به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار آبیاری معمول بود (جدول ۹). همچنین تیمار بوته‌های چغندر قند با غلظت یک میلی‌مولار نانوسیلیس در شرایط تنش شدید خشکی موجب افزایش ۹ درصدی سرعت جذب خالص در مقایسه با تیمار تنش شدید خشکی بدون کاربرد نانوسیلیس گردید (جدول ۹). سرعت رشد گیاه شاخصی از فتوسنتز تاج پوشش گیاهی و بیانگر میزان تولید ماده خشک توسط گیاهان است. نشان داده شده است که در شرایط تنش خشکی، میزان گونه‌های فعال اکسیژن افزایش یافته و در نتیجه موجب آسیب به دستگاه فتوسنتزی می‌شود. این در حالی است که کاربرد سیلیس می‌تواند علاوه بر حفظ پتانسیل آب برگ‌ها سبب افزایش تولید آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاه شده و با حفظ شاخص سطح برگ، افزایش کلروفیل و حفاظت از سیستم فتوسنتزی گیاه، سبب بهبود سرعت رشد گیاه به‌ویژه در شرایط تنش خشکی شود.

جدول ۱۲ همبستگی بین صفات مورد بررسی در چغندر قند تحت تاثیر رژیم آبیاری، تبوکونازول و نانو سیلیس

عملکرد شکر سفید	حداکثر سرعت تجمع ماده خشک	محتوای نسبی آب برگ	شاخص کلروفیل	حداکثر سرعت رشد محصول	حداکثر سرعت اسمیلاسیون خالص	حداکثر شاخص سطح برگ	دوام سطح برگ
۱							
حداکثر سرعت تجمع ماده خشک	۰/۸۳**	۱					
محتوای نسبی آب برگ	۰/۸۶**	۰/۸۶**	۱				
شاخص کلروفیل	۰/۷۴**	۰/۷۸**	۰/۷۵**	۱			
حداکثر سرعت رشد محصول	۰/۸۴**	۰/۹۸**	۰/۹۰**	۰/۸۱**	۱		
حداکثر سرعت اسمیلاسیون خالص	۰/۶۶**	۰/۷۲**	۰/۶۹**	۰/۷۲**	۰/۷۳**	۱	
حداکثر شاخص سطح برگ	۰/۸۱**	۰/۸۱**	۰/۷۶**	۰/۶۱**	۰/۸۳**	۰/۴۱*	۱
دوام سطح برگ	۰/۸۱**	۰/۸۸**	۰/۸۵**	۰/۶۹**	۰/۹۰**	۰/۵۳**	۰/۹۰**

*، ** تفاوت معنی‌دار به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد نانوسیلیس با وضعیتی وابسته به دز و از طریق بهبود شاخص‌های رشد، میزان کلروفیل

و محتوای نسبی آب برگ موجب تخفیف اثرات تنش شدید خشکی در چغندر قند شد. عملکرد شکر و کلیه صفات مورد بررسی تحت تأثیر برهمکنش رژیم آبیاری و نانوسیلیس

ترکیب تیماری از کاربرد آب به میزان ۵۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه با یک میلی مولار سیلیس حاصل شد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد با استفاده از کاربرد نانوسیلیس و تبوکونازول می توان در شرایط تنش شدید رطوبتی میزان تولید ماده خشک و عملکرد شکر را بهبود بخشید.

قرار گرفتند درحالی که کاربرد تبوکونازول به تنهایی تأثیری روی صفات مورد بررسی نداشت. با این وجود، داده های این تحقیق نشان می دهد برخی از صفات از قبیل شاخص کلروفیل و شاخص سطح برگ می توانند تحت تأثیر برهمکنش تبوکونازول و نانوسیلیس قرار گیرند. در شرایط تنش شدید خشکی، بهترین

References:

منابع مورد استفاده:

- Abayomi YA, Wright D. Sugar beet leaf growth and yield response to soil water deficit. African Crop Science Journal. 2002; 10(1): 51-66.
- Ahmad ST, Haddad R. Study of silicon effects on antioxidant enzyme activities and osmotic adjustment of wheat under drought stress. Czech Journal of Genetics and Plant Breeding. 2011; 21;47(1):17-27.
- Ahmed M, Asif M, Hassan FU. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. Acta physiologiae plantarum. 2014; 36(2):473- 483.
- Alaei moghadam Sh, Esmaeeli M, Rajabi A, Najafi H. Effects of water deficit stress on physiological and biochemical traits of sugar beet genotypes (*Beta vulgaris* L.). Journal of Sugar Beet. 2019; 34(2): 131-146. (in Persian, abstract in English)
- Behboudi F, Tahmasebi Sarvestani Z, Kassaei MZ, Modares Sanavi SA, Sorooshzadeh A. Improving Growth and Yield of Wheat under Drought Stress via Application of SiO₂ Nanoparticles. Journal of Agricultural Science and Technology. 2018; 20(7):1479- 1492.
- Child RD, Evans DE, Allen J, Arnold GM. Growth responses in oil seed rape (*Brassica napus* L.) to combined applications of the triazole chemicals triapenthenol and tebuconazole and interactions with gibberellin. Plant growth regulation. 1993; 13(2):203- 212.
- Chołuj D, Wiśniewska A, Szafranski KM, Cebula J, Gozdowski D, Podlaski S. Assessment of the physiological responses to drought in different sugar beet genotypes in connection with their genetic distance. Journal of Plant Physiology. 2014;171(14):1221- 1230.
- Etesami H, Jeong BR. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018; 147:881- 896.
- Farazi M, Goldani M, Nasiri Mahallati M, Nezami A, Rezaei J. Investigating the effect of silicon and potassium foliar spraying and additional soil application of potassium on quantitative and qualitative yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under moisture stress conditions. Applied Research in Field Crops. 2018; 31(3): 1-19. (in Persian)
- Gomathinayagam M, Jaleel CA, Lakshmanan GA, Panneerselvam R. Changes in carbohydrate metabolism by triazole growth regulators in cassava (*Manihot esculenta* Crantz); effects on tuber production and quality. Comptes Rendus Biologies. 2007; 330(9): 644- 655.

- Gong H, Chen K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2012; 34(4): 1589- 1594.
- Haghighi M, Pessaraki M. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*. 2013; 161:111- 117.
- Hasanuzzaman M, Nahar K, Anee TI, Khan MI, Fujita M. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. *South African Journal of Botany*. 2018; 115:50- 57.
- Hattori T, Inanaga S, Araki H, An P, Morita S, Luxová M, Lux A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*. 2005; 123(4):459- 466.
- Helaly MN, El-Hoseiny H, El-Sheery NI, Rastogi A, Kalaji HM. Regulation and physiological role of silicon in alleviating drought stress of mango. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017; 118:31- 44.
- Ilkkae MN, Forozesh P, Habibi D, Taleghani D, Rajabi A. Response of different sugar beet genotypes to water deficit stress. *Journal of Sugar Beet*. 2016; 32(2): 135- 146. (in Persian, abstract in English)
- Jaleel CA, Gopi R, Manivannan P, Gomathinayagam M, Hong-Bo S, Zhao CX, Panneerselvam R. Endogenous hormonal and enzymatic responses of *Catharanthus roseus* with triadimefon application under water deficits. *Comptes Rendus Biologies*. 2008; 331(11):844- 852.
- Kenter C, Hoffmann CM, Märlander B. Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*. 2006; 24(1):62- 69.
- Kiyamaz S, Ertek A. Yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) at different water and nitrogen levels under the climatic conditions of Kırşehir, Turkey. *Agricultural Water Management*. 2015; 158:156- 165.
- Khorshid A, Rajabi A. Investigation on quantity and quality characters of sugar beet advanced breeding populations in drought and salinity stress and non-stress conditions. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS)*. 2014; 7(9):532- 536.
- Klaine SJ, Alvarez PJ, Batley GE, Fernandes TF, Handy RD, Lyon DY, Mahendra S, Mc Laughlin MJ, Lead JR. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*. 2008; 27(9): 1825- 1851.
- Liu C, Li F, Luo C, Liu X, Wang S, Liu T, Li X. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 161(2-3):1466- 1472.
- Maillard A, Ali N, Schwarzenberg A, Jamois F, Yvin JC, Hosseini SA. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. *Environmental and experimental botany*. 2018; 155:394- 410.
- Milford GF. Plant structure and crop physiology. *Sugar beet*. 2006; 30-49.
- Mirzaei MR, Abdollahian- Noghabi M. Study of sugar beet growth pattern in Hamedan, Iran. *Journal of Sugar Beet*. 2012; 27(2): 1-9. DOI:10.22092/jsb.2012.662.

- Mohammadian R. Effect of sowing date and defoliation intensity on root yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Iranian Journal of Crop Sciences. 2016; 18(2):88-103.
- Navarro A, Sánchez-Blanco MJ, Bañon S. Influence of paclobutrazol on water consumption and plant performance of *Arbutus unedo* seedlings. Scientia Horticulturae. 2007; 111(2):133- 139.
- Nonami H, Wu Y, Boyer JS. Decreased growth-induced water potential (a primary cause of growth inhibition at low water potentials). Plant Physiology. 1997;114(2): 501- 509.
- Ouzounidou G, Giannakoula A, Ilias I, Zamanidis P. Alleviation of drought and salinity stresses on growth, physiology, biochemistry and quality of two *Cucumis sativus* L. cultivars by Si application. Brazilian Journal of Botany. 2016; 39(2): 531- 539.
- Ozoni Davaji A., Esfahani M., Sami Zadeh H, Rabiei M. Effect of planting pattern and plant density on growth indices and radiation use efficiency of apetalous flowers and petalled rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. Iran J. Crop Sci. 2008; 9: 382– 400.
- Putnik-Delic M, Maksimovic I, Venezia A, Nagl N. Free proline accumulation in young sugar beet plants and in tissue culture explants under water deficiency as tools for assessment of drought tolerance. Rom Agric Res. 2013; 30:141- 148.
- Reinefeld E, Emmerich A, Baumgarten G, Winner C, Beiss U. Zur voraussage des melassezuckers aus rubenanalysen. Zucker. 1974.
- Romano A, Sorgona A, Lupini A, Araniti F, Stevanato P, Cacco G, Abenavoli MR. Morpho-physiological responses of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes to drought stress. Acta physiologiae plantarum. 2013; 35(3): 853- 865.
- Sankar B, Karthishwaran K, Somasundaram R. Leaf anatomical changes in peanut plants in relation to drought stress with or without paclobutrazol and ABA. Journal of Phytology. 2013: 25- 29.
- Saud S, Li X, Chen Y, Zhang L, Fahad S, Hussain S, Sadiq A, Chen Y. Silicon application increases drought tolerance of Kentucky bluegrass by improving plant water relations and morphophysiological functions. The Scientific World Journal. 2014; 2014: 368694.
- Tekalign T, Hammes PS. Growth and biomass production in potato grown in the hot tropics as influenced by paclobutrazol. Plant Growth Regulation. 2005; 45(1):37- 46.
- Tripathi DK, Singh S, Singh VP, Prasad SM, Dubey NK, Chauhan DK. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. Plant Physiology and Biochemistry. 2017; 110:70-81.
- Tuna AL. Influence of foliarly applied different triazole compounds on growth, nutrition, and antioxidant enzyme activities in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under salt stress. Australian Journal of Crop Science. 2014; 8(1):71.
- Wang W, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. Planta. 2003; 218(1): 1-4.
- Yamasaki S, Dillenburg LR. Measurements of leaf relative water content in *Araucaria angustifolia*. Revista Brasileira de

fisiologia vegetal. 1999;11(2): 69-75.

Yin L, Wang S, Tanaka K, Fujihara S, Itai A, Den X, Zhang S. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. Plant, Cell and Environment. 2016; 39(2):245- 258.

Zhang YJ, Zhang X, Chen CJ, Zhou MG, Wang HC. Effects of fungicides JS399-19, azoxystrobin, tebuconazole, and carbendazim on the physiological and biochemical indices and grain yield of winter wheat. Pesticide Biochemistry and Physiology. 2010; 98(2):151- 157.