



تأثیر محلول پاشی بر گی سیلیسیم دی اکسید نانو و غیر نانو بر عملکرد و توزیع مجدد ماده خشک گندم در شرایط تنش خشکی

عمران پارساپور^۱، عبدالمهدی بخشنده^{۲*}، محمدحسین قرینه^۳، حسن فیضی^۴، محمدرضا مرادی تلاوت^۵

۱. دانشجوی دکتری زراعت؛ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۲. استاد؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۳. دانشیار؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

۴. استادیار؛ دانشگاه تربیت مدرس

۵. استادیار؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۳۰

چکیده

به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی سیلیسیم بر عملکرد و توزیع مجدد ماده خشک گندم در شرایط تنش خشکی، پژوهشی مزرعه‌ای در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا گردید. تیمار تنش خشکی شامل سه سطح آبیاری نرمال (بدون قطع آبیاری یا شاهد)، تنش خشکی از زمان ساقه‌روی تا گل‌دهی و تنش خشکی از گل‌دهی تا رسیدگی دانه به‌عنوان فاکتور اصلی و محلول پاشی سطوح دی‌اکسید سیلیسیم در هفت سطح شامل بدون سیلیسیم (شاهد)، کاربرد ذرات نانو و غیرنانو سیلیسیم در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که تنش خشکی در دوره ساقه‌روی تا گل‌دهی عملکرد دانه گندم نسبت به شرایط آبیاری معمول را در حدود ۳۵ درصد کاهش داد. محلول پاشی سیلیسیم تا حدودی تأثیر منفی تنش خشکی بر عملکرد دانه را تقلیل داد. عملکرد دانه گندم با کاربرد غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو (۵۷۷/۶۱ گرم در مترمربع) و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو (۵۲۷/۷۳ گرم در مترمربع) به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارهای محلول پاشی شد. صرف‌نظر از تیمارهای محلول پاشی، توزیع مجدد ماده خشک در شرایط آبیاری معمول در حدود ۱۱ درصد کمتر از شرایط تنش خشکی بود. بیشترین سهم توزیع مجدد از عملکرد دانه گندم مربوط به محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو در شرایط تنش از گلدهی تا پایان دوره رشد بود. همچنین تنش خشکی سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها را به‌طور معنی‌داری کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: توزیع مجدد ماده خشک؛ فتوسنتز جاری؛ کارایی توزیع مجدد

مقدمه

بارندگی ۲۳۰ میلی‌متر و میزان تبخیر سالانه بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر جزء نواحی نسبتاً خشک کشور محسوب می‌شود. با توجه به این ویژگی‌های آب و هوایی، تنش خشکی یکی از معمول‌ترین تنش‌هایی است که می‌تواند در این استان رشد گیاهان زراعی را در مراحل نمو مختلف تحت تأثیر قرار دهد.

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا است (Sinclair, 2011). متوسط بارندگی سالیانه در کشور در حدود ۲۴۰ میلی‌متر است که این مقدار کمتر از یک‌سوم میانگین بارندگی جهانی است. استان خوزستان با متوسط

2011) با بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد دانه گزارش کردند که عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک و شاخص برداشت در شرایط تنش خشکی کاهش یافت، اما میزان استفاده از ذخایر برای پر کردن دانه (انتقال مجدد) از ۲۸ به ۳۸ درصد رسید. عبادی و همکاران (Ebadi et al., 2011) نیز بیان کردند که در جو قطع آبیاری باعث افزایش میزان انتقال مجدد ماده خشک از بافت‌های روی‌شی به دانه شد. مطالعه‌ای در مورد تأثیر محلول‌پاشی سیلیسیم دی‌اکسید بر انتقال و توزیع مجدد ماده خشک از بخش‌های رویشی بر عملکرد گندم در شرایط تنش خشکی انجام نشده است. لذا، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی برگی سیلیسیم دی‌اکسید نانو و غیر نانو بر عملکرد و اجزاء عملکرد گندم و نیز تعیین سهم منابع مختلف در شکل‌گیری عملکرد دانه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۵ - ۹۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان واقع در شهر ستان باوی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. تیمار تنش خشکی شامل سه سطح آبیاری نرمال (بدون قطع آبیاری یا شاهد)، اعمال تنش خشکی از زمان ساقه‌روی تا گل‌دهی و اعمال تنش خشکی از گل‌دهی تا رسیدگی دانه به‌عنوان فاکتور اصلی و محلول‌پاشی سطوح دی‌اکسید سیلیسیم در هفت سطح شامل بدون سیلیسیم (شاهد)، کاربرد ذرات نانو و غیر نانو سیلیسیم در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. قبل از محلول‌پاشی با توجه به مقادیر ذکر شده برای هر تیمار، محلول مورد نظر آماده گردید و با یک افشانه کالیبره شده از نوع پستی با گنجایش ۲۰ لیتر و طی دو مرحله در طول فصل رشد در مراحل ساقه‌رفتن و سنبله‌رفتن انجام شد. نانو ذرات دی‌اکسید سیلیسیم مورد استفاده ساخت شرکت Usnano آمریکا و دارای اندازه ذرات ۳۰-۲۰ نانومتر و خلوص ۹۹/۹ درصد بود. ذرات توده‌ای (غیر نانو) دی‌اکسید سیلیسیم هم‌ساخت شرکت مرک آلمان بود. شهرستان باوی با میانگین دمای حداقل ۱۴/۶، متوسط ۲۳/۲ و حداکثر ۳۱/۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۱۶۹ میلی‌متر از لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

با توجه به بحران آب در این منطقه و در کل کشور، ارائه راه‌کارهای مناسب برای کاهش اثر تنش خشکی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی یک مسئله بحرانی است.

استفاده و تنظیم غلظت برخی عناصر در شرایط کمبود آب راهبردی است که می‌تواند اثر مخرب تنش خشکی بر رشد و عملکرد گیاهان را کاهش دهد (Gong and Chen, 2012). سیلیسیم از جمله عناصری است که می‌تواند منجر به افزایش تحمل گیاهان زراعی به تنش‌های مختلف زیستی و غیر زیستی گردد (Chen et al., 2011). بسته به نوع گیاه، غلظت سیلیسیم در بخش‌های هوایی بین ۰/۱ تا ۱۰ درصد وزن خشک متغیر است (Hanafy et al., 2008). این عنصر نقش محوری در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف مثل جذب یون، فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌ها دارد (Hattori et al., 2005). گیاهان خانواده غلات می‌توانند مقادیر زیادی سیلیسیم در بافت‌های خود انباشته کنند (Tahir et al., 2006). در این گیاهان، فراهم بودن مقدار کافی سیلیسیم در شرایط تنش خشکی منجر به تشکیل لایه دوم سیلیس-کوتیکول روی بافت اپیدرم برگ‌ها است (Hanafy et al., 2008). همچنین سودمندی این عنصر در بهبود تحمل به تنش خشکی تا حدودی به فعال شدن پمپ $H^+-ATPase$ و جذب بیشتر یون پتاسیم مربوط می‌شود (Hattori et al., 2005).

عملکرد دانه گیاه زراعی به تعادل بین جذب و ساخت مواد آلی در منابع و مصرف آن در مخازن وابسته است. در گندم، وزن دانه از سه منبع فتوسنتز جاری بعد از گرده‌افشانی، انتقال کربوهیدرات‌هایی که قبل از گرده‌افشانی در بخش‌های رویشی گیاه ذخیره شده‌اند و بعد از گرده‌افشانی به دانه منتقل می‌گردند (حرکت مجدد) و انتقال کربوهیدرات‌هایی که بعد از گرده‌افشانی و در دوره رشد کند دانه تشکیل شده‌اند (انتقال مجدد)، تأمین می‌گردد. مجموع انتقال و حرکت مجدد به اصطلاح توزیع مجدد گفته می‌شود (Yang et al., 2014). یک روش ساده و مؤثر برای اندازه‌گیری انتقال مجدد مواد فتوسنتزی، اندازه‌گیری میزان کاهش وزن ساقه‌ها بین مراحل گرده‌افشانی و رسیدگی است (Liu et al., 2016). توان بالقوه ذخیره‌سازی مواد فتوسنتزی در ساقه و سپس کارایی انتقال آن‌ها به دانه دو خصوصیت مؤثر در ثبات عملکرد تحت شرایط تنش خشکی است (Kalaji et al., 2016). در این راستا، عزت‌احمدی و همکاران (Ezzat Ahmadi et al.,)

خاک مزرعه در عمق ۳۰-۰ در جدول ۱ ارائه شده است. نیتروژن موردنیاز از منبع اوره به میزان ۱۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار محاسبه و مصرف گردید. یک سوم آن قبل از کاشت به خاک اضافه شد. سرک اول در مرحله ۴-۶ برگی و یک سوم باقیمانده ابتدای مرحله ساقه رفتن در اختیار گیاه قرار گرفت. کود فسفر موردنیاز به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل تأمین و در زمان کاشت مصرف شد. بین کرت‌های اصلی دو متر و بین کرت‌های فرعی یک متر فاصله منظور شد.

عملیات تهیه بستر شامل شخم، دومرتبه دیسک عمود بر هم و ایجاد نهر بود. تسطیح کرت‌ها با استفاده از بیل و شن کش انجام و سپس بذرهای گندم (رقم چمران) در تاریخ اول آذر با تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع روی ۱۰ خط دو متری بافاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر در عمق ۳ تا ۵ سانتی‌متری کشت شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذرها و آبیاری‌های بعدی پس از تخلیه ۲۵ درصد از رطوبت قابل‌استفاده خاک انجام شد. برای جلوگیری از ورود آب باران به داخل کرت‌ها در دوره اعمال تیمار تنش خشکی از محافظ بارانی استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه.

Table 1. Physical and chemical properties of field soil.

بافت خاک Soil texture	ماده آلی (درصد) Organic matter (%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electric conductivity (ds m ⁻¹)	نیتروژن (درصد) Nitrogen (%)	سیلیسیم
					(میلی‌گرم بر کیلوگرم) Silicon (mg Kg ⁻¹)
رسی-لومی Clay loam	0.71	7.50	3.50	0.06	69.60

تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS و رویه GLM و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD محافظت‌شده در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

عملکرد دانه، بیولوژیک و شاخص برداشت

اثر ساده تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم به‌طور معنی‌داری عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت گندم را تحت تأثیر قرار داد، اما اثر متقابل آن‌ها بر این صفات معنی‌دار نشد (جدول ۲). عملکرد دانه گندم در شرایط بدون تنش (۵۹۰/۸۱ گرم در مترمربع) به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط اعمال تنش از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد (۵۱۲/۷۶ گرم در مترمربع) و برای این شرایط به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله شروع ساقه‌روی تا گلدهی (۳۸۵/۰۳ گرم در مترمربع) بود (شکل ۱A). همچنین عملکرد بیولوژیک گندم در شرایط بدون تنش به ترتیب در حدود ۱۲ و ۳۳ درصد بیشتر از شرایط اعمال تنش از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد (۱۲۳۲/۵۷ گرم در مترمربع) و اعمال تنش

در زمان رسیدگی فیزیولوژیک (دانه‌ها با رطوبت ۱۴ در صد)، بوته‌های دو مترمربع از چهار خط میانی در سطح خاک با داس بریده، برداشت و در تعیین عملکرد بیولوژیک و دانه مورد استفاده قرار گرفت. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد بیولوژیک محاسبه گردید. برای تعیین میزان توزیع مجدد مواد فتوسنتزی و پارامترهای وابسته به آن، از روابط زیر استفاده شد (Papakosta and Gagianas, 1991):

$$[1] \quad A - B = \text{میزان توزیع مجدد}$$

$$[2] \quad A/\text{میزان توزیع مجدد} = \text{کارایی توزیع مجدد}$$

$$[3] \quad = \text{سهم توزیع مجدد از عملکرد دانه} \\ 100 \times (\text{عملکرد دانه/میزان توزیع مجدد})$$

$$[4] \quad = \text{سهم فتوسنتز جاری از عملکرد دانه} \\ \text{میزان توزیع مجدد} - \text{عملکرد دانه}$$

که در این روابط A، وزن خشک بخش‌های رویشی در یک هفته بعد از مرحله گرده‌افشانی؛ و B، وزن خشک بخش‌های رویشی در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک است.

(جدول ۳). بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک گندم به ترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم نانو (۱۳۵۰/۵۵ گرم در مترمربع) و بدون محلول‌پاشی (۱۰۷۸/۹۴ گرم در مترمربع) به دست آمد. باین حال، بین تیمارهای محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم نانو و ۱۵۰ میلی‌گرم سیلیسیم غیر نانو و همچنین تیمار بدون محلول‌پاشی با محلول‌پاشی با غلظت‌های ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم سیلیسیم نانو و ۵۰ میلی‌گرم سیلیسیم غیر نانو اختلاف معنی‌داری از نظر میزان عملکرد بیولوژیک مشاهده نشد (جدول ۳).

خشکی از مرحله شروع ساقه‌روی تا گلدهی (۹۲۴/۹۷ گرم در مترمربع) بود (شکل ۱B). به نظر می‌رسد تنش خشکی در مرحله ساقه‌روی از طریق تأثیر بر رشد پنجه‌ها و همچنین کاهش جذب مواد غذایی در این مرحله از رشد سریع گیاه سبب کاهش بیشتر کل تولید ماده خشک (عملکرد بیولوژیک) شده است.

عملکرد دانه گندم در شرایط محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم سیلیسیم نانو (۵۷۷/۶۱ گرم در مترمربع) تفاوت معنی‌داری با تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم سیلیسیم غیر نانو (۵۲۷/۷۳ گرم در مترمربع) نداشت، اما به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارهای محلول‌پاشی بود

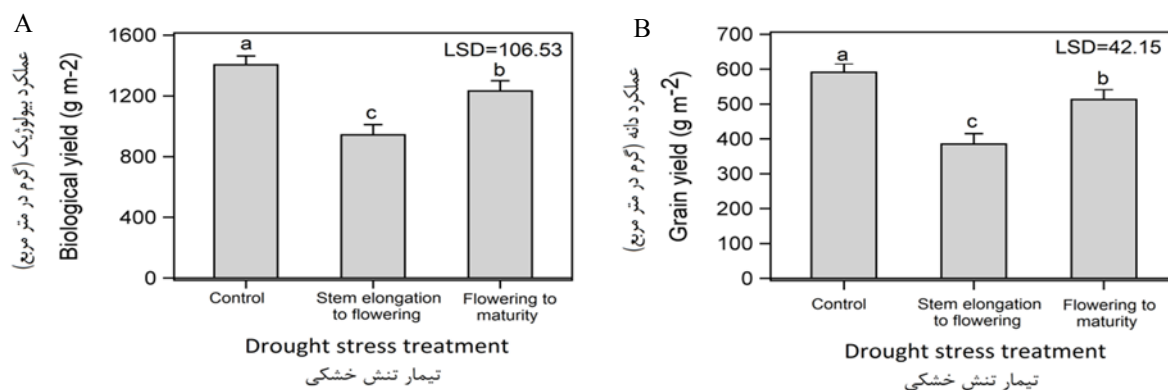
جدول ۲. تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی سیلیسیم بر عملکرد و اجزاء عملکرد گندم.

Table 2. Analysis of variance of drought stress (DS) and silicon foliar application (Si) on yield and yield components of wheat.

SOV	منابع تغییر	درجه آزادی df	Mean Square		
			عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	میانگین مربعات Harvest index
Block	بلوک	3	1914.93 ^{ns}	6971.88 ^{ns}	1.69 ^{ns}
Drought Stress (DS)	تنش خشکی	2	302167.25 ^{**}	1525834.10 ^{**}	13.77 [*]
Block × DS	بلوک × تنش خشکی	6	4154.88	26533.88	1.28
Silicon (Si)	سیلیسیم	6	27941.66 ^{**}	103058.09 ^{**}	15.23 ^{**}
DS × Si	تنش خشکی × سیلیسیم	12	3951.39 ^{ns}	22716.56 ^{ns}	1.46 ^{ns}
Error	خطا	54	3937.87	24383.96	0.96
CV (%)	ضریب تغییرات (درصد)		12.64	13.08	7.37

*, ** و ns به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهند.

*, ** and ns means significant at 0.05 and 0.01 probability levels, and non-significant, respectively.



شکل ۱. تأثیر تیمارهای تنش خشکی بر عملکرد دانه و بیولوژیک گندم.

Fig. 1. Effect of drought stress treatments on grain and biological yield of wheat.

جدول ۳. مقایسه میانگین تأثیر محلول پاشی سیلیسیم با ذرات نانو و غیر نانو بر عملکرد و اجزاء عملکرد گندم.

Table 3. Mean comparison of the effect of silicon foliar application with nano and bulk particles on yield and yield components of wheat.

نوع ذرات Particle type	غلظت Concentration	میانگین		
		عملکرد دانه (گرم در مترمربع) Grain yield (g m ⁻²)	عملکرد بیولوژیک (گرم در مترمربع) Biological yield (g m ⁻²)	شاخص برداشت (درصد) Harvest index (%)
نانو Nano	50	484.24 ^{bc}	1184.30 ^{bcd}	40.75 ^c
	100	577.61 ^a	1350.55 ^a	42.73 ^a
	150	478.29 ^{bc}	1134.52 ^{cd}	42.13 ^{ab}
غیر نانو Non-nano	50	467.22 ^{cd}	1124.64 ^{cd}	41.45 ^{bc}
	100	511.47 ^{bc}	1218.66 ^{bc}	41.92 ^b
	150	527.73 ^{ab}	1262.8 ^{ab}	41.84 ^b
شاهد Control	0	426.83 ^d	1078.94 ^d	39.29 ^d
LSD		51.36	127.81	0.80

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد ندارند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability.

بیشتری در عملکرد گردید که این امر خود سبب کاهش شاخص برداشت شد. شاخص برداشت دانه گندم در تیمار محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم سیلیسیم نانو (حدود ۴۳ درصد) مشابه با تیمار محلول پاشی با غلظت ۱۵۰ میلی گرم سیلیسیم نانو و به طور معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود (جدول ۳). کاهش شاخص برداشت دانه در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Hattori et al., 2005). به نظر می‌رسد جذب سیلیسیم باعث سخت و سیلیسی شدن بخش هوایی گیاه گردیده و امکان تحمل تنش در گیاه را میسر می‌کند و با کاهش مرگومیر گلچه‌ها باعث افزایش تعداد دانه در سنبله (به عنوان مهم‌ترین جزء عملکرد دانه) می‌شود و از این طریق شاخص برداشت را افزایش می‌دهد.

وزن خشک بخش‌های رویشی در مرحله گرده‌افشانی

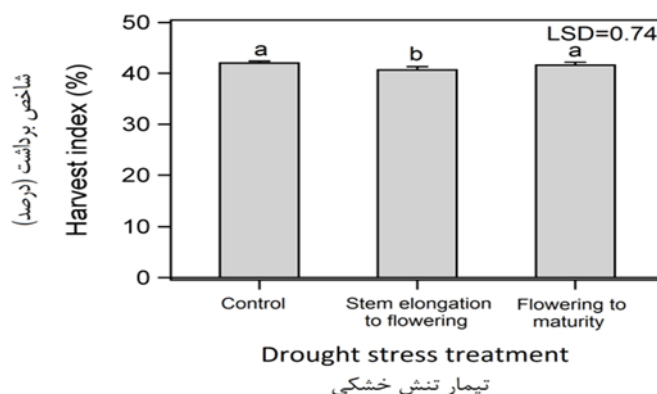
اثر ساده تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم بر وزن خشک بخش رویشی در مرحله گرده‌افشانی معنی دار بود (جدول ۴). وزن خشک بخش رویشی در مرحله گرده‌افشانی در شرایط بدون تنش (۹۴۶/۲۴ گرم در مترمربع) به طور معنی داری بیشتر از شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد (۸۳۲/۸۹ گرم در مترمربع) مشاهده شد و برای این شرایط نیز به طور معنی داری بیشتر از شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله شروع ساقه‌روی تا گلدهی (۶۸۱/۰۱ گرم در مترمربع) بود (شکل ۳A). با توجه به تأثیر کمبود رطوبت و تنش خشکی از مرحله ساقه‌روی تا

مشابه نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، گزارش شده است که در تنش خشکی کاربرد سیلیسیم عملکرد گندم را افزایش داد (Ali et al., 2013). در همین راستا، تاهیر و همکاران (Tahir et al., 2006) افزایش ۵۰ درصدی عملکرد گندم را به دنبال کاربرد سیلیسیم در شرایط تنش شوری گزارش کردند. کر ملا چعب و همکاران (Karmalachab et al., 2014) نشان دادند که میزان افزایش عملکرد دانه گندم با مصرف ۳۰ کیلوگرم سیلیسیم، در تنش شدید خشکی ۱۴ درصد افزایش یافت. به نظر می‌رسد سیلیسیم از طریق حفظ توازن آب، نگهداری کارایی فتوسنتزی، عمودی شدن برگ‌ها و رسوب در ساختار آوندهای چوبی باعث افزایش تحمل به خشکی در گیاهان می‌شود (Hattori et al., 2005). همچنین به نظر می‌رسد کاربرد ذرات نانو سیلیسیم در مقایسه با ذرات غیر نانو منجر به افزایش سرعت فتوسنتز، بهبود رشد گیاهچه‌ها و افزایش عملکرد بادام زمینی (*Arachis hypogaea* L.) شد (Prasad et al., 2012).

شاخص برداشت دانه گندم در شرایط بدون تنش تفاوت معنی داری با شرایط اعمال تنش از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد نداشت (در حدود ۴۲ درصد)، اما به طور معنی داری بیشتر از شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله شروع ساقه‌روی تا گلدهی (۳۹/۶۸ درصد) بود (شکل ۲). به نظر می‌رسد که تنش قبل از گرده‌افشانی از طریق کاهش تعداد سنبله و کاهش تعداد دانه در سنبله نسبت به تنش رطوبتی بعد از گرده‌افشانی به شکل معنی داری باعث کاهش

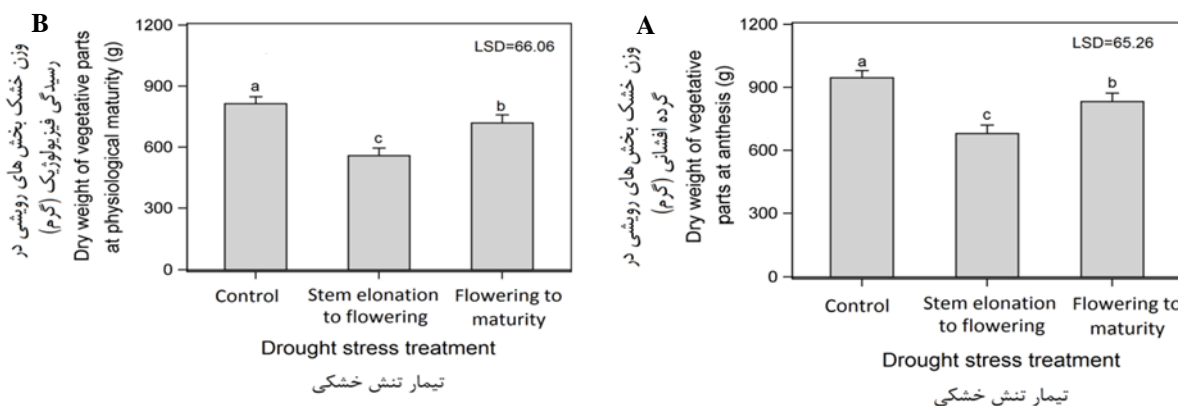
مختلف نانو ذرات SiO_2 بر گندم مشاهده کردند که غلظت‌های پایین‌تر این ذرات (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) اثر منفی بر رشد بخش‌های رویشی گیاهچه گندم نداشت، درحالی‌که غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر وزن خشک اندام‌های رویشی را کاهش داد. کارایی انتقال ماده خشک به وزن خشک ساقه در گرده‌افشانی بستگی دارد و وزن خشک بیشتر ساقه در گرده‌افشانی به سهم بیشتر ماده خشک انتقال یافته از آن به دانه‌ها منتهی می‌شود (Liu et al., 2016).

گلدهی بر کاهش شدید رشد پنجه‌ها و بخش‌های رویشی، وزن اندام‌های رویشی در این مرحله به شدت توسط تنش خشکی کاهش یافته است. وزن خشک بخش‌های رویشی در مرحله گرده‌افشانی در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو بیشترین مقدار را داشت، اما اختلاف آن با تیمارهای محلول‌پاشی با غلظت‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو معنی‌دار نبود (جدول ۵). کریمی و محسن‌زاده (Karimi and Mohsenzadeh, 2016) نیز با بررسی تأثیر غلظت‌های



شکل ۲. تأثیر تیمارهای تنش خشکی بر شاخص برداشت گندم.

Fig. 2. Effect of drought stress treatments on harvest index of wheat.



شکل ۳. تأثیر تیمارهای تنش خشکی بر وزن خشک بخش‌های رویشی گندم در مرحله گرده‌افشانی (A) و رسیدگی (B).

Fig. 3. Effect of drought stress treatments on dry weight of the vegetative parts of wheat at the anthesis (A) and maturity (B) stages.

معنی‌دار بود (جدول ۴). تنش خشکی منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک بخش‌های رویشی گیاه شد، به طوری‌که این صفت در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط اعمال تنش از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد در حدود ۱۲

وزن خشک بخش‌های رویشی در رسیدگی فیزیولوژیک

اثر ساده تنش خشکی و محلول‌پاشی سیلیسیم بر وزن خشک بخش رویشی در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک

در صد و در شرایط اعمال تنش از مرحله شروع ساقه‌روی تا گلدهی در حدود ۳۱ درصد کمتر از شرایط بدون تنش (۸۱۴/۱۲ گرم در مترمربع) بود (شکل ۳B). با توجه به اینکه اعمال تنش خشکی در مرحله قبل از گلدهی سبب انتقال بیشتر مواد فتوسنتزی ذخیره شده در این مرحله به اندام‌های زایشی و سنبله شد، به همین دلیل میزان کاهش ماده خشک در هنگام رسیدگی فیزیولوژیکی در اندام‌های رویشی بیشتر بود و وزن خشک اندام‌های رویشی به مقدار زیادتری کاهش یافت. وزن خشک بخش‌های رویشی در رسیدگی فیزیولوژیک در تیمار محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیسیم نانو در حدود ۷۷۲ گرم در مترمربع به دست آمد که با تیمارهای ۵۰ میلی گرم در لیتر سیلیسیم نانو و ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو اختلاف معنی داری نداشت اما به طور معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود (جدول ۵). کریمی و محسن‌زاده (Karimi

and Mohsenzadeh, 2016) نیز گزارش کردند که غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نانو ذرات SiO_2 تأثیر بیشتری بر رشد و ماده خشک گیاه نسبت به غلظت‌های بالاتر از این حد داشتند؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که ذرات نانو در غلظت‌های کم تا متوسط تأثیر بیشتری بر صفات گیاه داشته باشند.

میزان توزیع مجدد ماده خشک

اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم به طور معنی داری میزان توزیع مجدد ماده خشک را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۴). در شرایط بدون تنش، توزیع مجدد ماده خشک در تیمار عدم محلول پاشی (۱۰۱/۵۵) گرم در مترمربع) به طور معنی داری کمتر از تیمار محلول پاشی با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر سیلیسیم نانو (۱۰۸/۵۸)

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم بر میزان و کارایی توزیع مجدد ماده خشک و سهم توزیع مجدد ماده خشک و فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها.

Table 4. Analysis of variance of drought stress (DS) and silicon foliar application (Si) on the rate and efficiency of redistribution of dry matter and the contribution of redistribution of dry matter and current photosynthesis in grain filling.

منابع تغییر	درجه آزادی	Mean Square			میانگین مربعات		
		Dry weight of vegetative parts at anthesis	Dry weight of vegetative parts at physiological maturity	Dry matter redistribution	سهم توزیع مجدد ماده خشک	سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها	سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها
SOV	df						
تکرار	3	1848.57 ^{ns}	2042.60 ^{ns}	6.96 ^{ns}	0.0001	8.29 ^{ns}	2116.19 ^{ns}
Block							
تنش خشکی	2	495947.98 ^{**}	470008.22 ^{**}	2541.24 ^{**}	0.0194 ^{**}	1072.63 ^{**}	285292.56 ^{**}
Drought Stress (DS)							
بلوک × تنش خشکی	6	9959.25	10204.32	6.90	0.0005	14.96	4372.32
Block × DS							
سیلیسیم	6	27818.41 [*]	25145.12 [*]	199.45 ^{**}	0.0007 ^{ns}	78.07 ^{**}	24463.25 ^{**}
Silicon (Si)							
تنش خشکی × سیلیسیم	12	8410.14 ^{ns}	8045.66 ^{ns}	32.48 ^{**}	0.0005 ^{ns}	40.57 ^{**}	3574.33 ^{ns}
DS × Si							
خطا	54	9083.05	9067.72	9.41	0.0003	11.41	3949.76
Error							
C.V. (%)	ضریب تغییرات	11.62	13.66	12.50	11.30	12.92	16.83

*, ** و ns به ترتیب عدم اختلاف معنی دار و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد را نشان می‌دهند.

*, ** and ns means significant at 0.05 and 0.01 probability levels, and non-significant, respectively.

جدول ۵. مقایسه میانگین تأثیر محلول‌پاشی سیلیسیم با ذرات نانو و غیر نانو بر وزن خشک بخش‌های رویشی در مراحل گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک و سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها.

Table 5. Mean comparison of effect of silicon foliar application with nano and bulk particles on dry weight of vegetative parts at anthesis and physiological maturity, and Contribution of current photosynthesis in grain filling.

نوع ذرات Particle type	غلظت Concentration	میانگین		
		وزن خشک بخش‌های رویشی در مرحله گرده‌افشانی (گرم در مترمربع) Dry weight of vegetative parts at anthesis (g m ⁻²)	وزن خشک بخش‌های رویشی در رسیدگی فیزیولوژیک (گرم در مترمربع) Dry weight of vegetative parts at physiological maturity (g m ⁻²)	سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها (گرم در مترمربع) Contribution of current photosynthesis in grain filling (g m ⁻²)
نانو	50	819.02 ^{bc}	700.06 ^{abc}	365.28 ^{bc}
Nano	100	899.30 ^a	772.94 ^a	451.25 ^a
	150	781.24 ^c	656.23 ^c	353.28 ^{bcd}
غیر نانو	50	780.70 ^c	657.42 ^{bc}	343.94 ^{cd}
Non-nano	100	831.52 ^{abc}	707.18 ^{abc}	387.14 ^{bc}
	150	861.03 ^{ab}	735.08 ^{ab}	401.78 ^{ab}
شاهد Control	0	767.50 ^c	652.11 ^c	311.44 ^d
LSD		78.01	77.94	51.44

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability.

کارایی توزیع مجدد ماده خشک

اثر ساده تنش خشکی بر میزان کارایی توزیع مجدد ماده خشک معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج نشان داد که کارایی توزیع مجدد ماده خشک در شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله شروع طویل شدن ساقه تا گلدهی (۱۸/۴۶ درصد) به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط بدون تنش (۱۴/۰۷ درصد) یا اعمال تنش از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد (۱۳/۷۵ درصد) بود (شکل ۴). نتایج عزت احمدی و همکاران (Ezzat Ahmadi et al., 2011) نیز نشان داد که تحت شرایط تنش رطوبتی، میزان ماده خشک انتقال‌یافته، بازدهی انتقال مجدد و درصد انتقال مجدد ماده خشک گندم به ترتیب در حدود ۱۵، ۱۸ و ۵۰ درصد نسبت به تیمار آبیاری کامل افزایش یافت. انتقال و حرکت مجدد مواد فتوسنتزی مرحله قبل از گلدهی عامل مهمی در افزایش عملکرد دانه است. هنگام وقوع تنش خشکی شدید در مرحله ساقه‌روی تا گلدهی، بخش بی‌شتتری از مواد فتوسنتزی به دانه‌ها انتقال می‌یابد که این خود سبب افزایش کارایی توزیع مجدد ماده خشک در این مرحله می‌گردد.

گرم در مترمربع) و برای این تیمار به‌طور معنی‌داری کمتر از سایر تیمارهای محلول‌پاشی بود (جدول ۶). در شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله شروع طویل شدن ساقه تا گلدهی کمترین میزان توزیع مجدد ماده خشک در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو مشاهده شد که از این نظر تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد و محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو نداشت. در شرایط اعمال تنش از گلدهی تا رسیدگی، بیشترین میزان توزیع مجدد ماده خشک مربوط به تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو (۱۲۷/۶۰ گرم در مترمربع) بود، اما از این نظر تفاوت معنی‌داری با تیمارهای محلول‌پاشی با غلظت‌های ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو و ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو نداشت (جدول ۶). همچنین، میزان توزیع مجدد ماده خشک بدون در نظر گرفتن تیمارهای محلول‌پاشی در شرایط آبیاری معمول کمتر از شرایط تنش خشکی بود که با نتایج عزت احمدی و همکاران (Ezzat Ahmadi et al., 2011) مطابقت دارد.

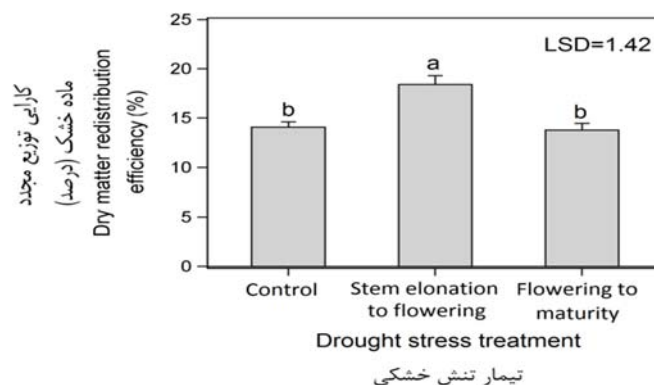
جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم بر توزیع مجدد ماده خشک (گرم در مترمربع) در گندم.

Table 6. Mean comparison of interaction of drought stress and silicon foliar application on dry matter redistribution (g m^{-2}) in wheat.

دوره تنش خشکی Drought stress period	Silicon foliar application			محلول پاشی سیلیسیم			شاهد Control
	۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات نانو 50 mg L ⁻¹ with nanoparticles	۱۰۰ میلی گرم در لیتر با ذرات نانو 100 mg L ⁻¹ with nanoparticles	۱۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات نانو 150 mg L ⁻¹ with nanoparticles	۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات غیر نانو 50 mg L ⁻¹ with bulk particles	۱۰۰ میلی گرم در لیتر با ذرات غیر نانو 100 mg L ⁻¹ with bulk particles	۱۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات غیر نانو 150 mg L ⁻¹ with bulk particles	
طویل شدن ساقه تا گلدهی Stem elongation to flowering	130.58 ^{ab}	134.25 ^a	133.98 ^a	128.83 ^b	133.90 ^a	133.40 ^a	129.98 ^{ab}
گلدهی تا پایان دوره رشد Flowering to end of growth	117.73 ^c	127.60 ^a	125.63 ^{ab}	123.10 ^b	125.35 ^{ab}	127.33 ^{ab}	114.65 ^c
شاهد Control	108.58 ^b	117.25 ^a	115.43 ^a	117.90 ^a	113.75 ^a	117.13 ^a	101.55 ^c

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ردیف اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

Means followed by the same letters in each row are not significantly different at 5% probability.



شکل ۴. تأثیر تنش خشکی بر کارایی توزیع مجدد ماده خشک در گندم.

Fig. 4. Effect of drought stress period on redistribution efficiency of dry matter in wheat.

در تیمار شاهد حداکثر (۴۵/۱۲) و در تیمار محلول پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو حداقل (۲۶/۲۹) بود (جدول ۷). همچنین در صد توزیع مجدد ماده خشک از عملکرد دانه بدون در نظر گرفتن تیمارهای محلول پاشی در شرایط آبیاری معمول کمتر از شرایط تنش خشکی بود. پاپاکوستا و گاگیاناس (Papakosta and Gagianas, 1991) گزارش کردند که متوسط در صد انتقال مجدد ماده خشک در گندم نان بین ۶ تا ۷۳ درصد متغیر بود. در شرایط

سهم توزیع مجدد ماده خشک در پر کردن دانه‌ها اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم به‌طور معنی‌داری در صد توزیع مجدد از عملکرد دانه را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۴). درصد توزیع مجدد ماده خشک از عملکرد دانه در شرایط بدون تنش یا اعمال تنش از مرحله طویل شدن ساقه تا گلدهی در تیمارهای محلول پاشی مشابه بود (جدول ۷). در شرایط اعمال تنش از گلدهی تا پایان دوره رشد، در صد توزیع مجدد ماده خشک از عملکرد دانه

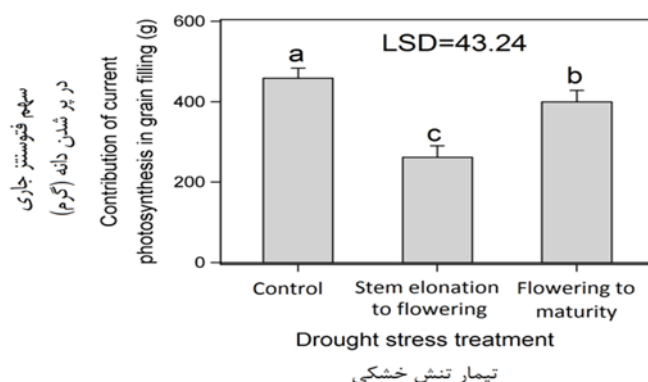
اختلاف معنی‌داری از این نظر میان تیمار شاهد با تیمارهای محلول‌پاشی با غلظت‌های ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو مشاهده نشد. به نظر می‌رسد که غلظت‌های مختلف ذرات نانو و غیرنانو سیلیسیم با افزایش لایه کوتیکولی برگ و همچنین میزان عمودی شدن برگ‌ها سبب نفوذ بیشتر نور در جامعه گیاهی و افزایش فتوسنتز جاری شده است.

فتوسنتز جاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع کربن برای پر شدن دانه‌ها، به جذب مؤثر نور به‌وسیله سطح سبز گیاه پس از مرحله گرده‌افشانی وابسته است (Maydup et al., 2014). این منبع نیز به‌طور معمول توسط پیری طبیعی برگ و بروز تنش‌های مختلف محدود می‌شود. درحالی‌که در همین زمان تقاضا برای مواد فتوسنتزی جهت پر شدن دانه‌ها و تقاضا برای تنفس نگهداری زیست‌توده نیز افزایش می‌یابد. در شرایط خشکی، کاهش سریع در فتوسنتز جاری بعد از گلدهی به علت کاهش هدایت روزنه‌ای برگ و کاهش آسیمیلاسیون خالص CO_2 در گندم اتفاق افتاده که نتیجه آن محدود شدن توزیع آسیمیلات‌های جاری به سمت دانه‌ها است (Kalaji et al., 2016). مشابه با نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش، احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2004) گزارش کردند که تنش خشکی میزان فتوسنتز جاری گندم را حدود ۲۰ درصد کاهش داد. در همین راستا، پالتا و همکاران (Palta et al., 1994) گزارش کردند که تنش خشکی عملکرد دانه گندم را ۲۴ درصد کاهش داد، در حالی که فرآوری کربن را پس از گرده‌افشانی ۵۷ درصد کاهش و انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای را ۳۶ درصد افزایش داد.

تنش رطوبتی انتهای فصل رشد، میزان ذخایر ساقه از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا در مناطق مدیترانه‌ای دوره پر شدن دانه‌ها با شرایط گرم و خشک مصادف شده و در فتوسنتز جاری گندم اختلال ایجاد می‌شود. همچنین نتایج آزمایش‌های مختلف (Gent, 1994; Tousei, 2007; Mojarrad and Ghannadha, 2007) نشان داد در شرایط مطلوب رطوبتی سهم ذخایر ساقه در پر کردن دانه‌های گندم نان حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد و در شرایط تنش رطوبتی بیش از ۴۰ درصد بود.

سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها

اثر ساده تنش خشکی و محلول‌پاشی سیلیسیم بر سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها معنی‌دار بود (جدول ۴). سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها در شرایط بدون تنش (۴۵۸/۶۸ گرم در مترمربع) به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط اعمال تنش خشکی از مرحله گلدهی تا پایان دوره رشد (۳۹۹/۶۸ گرم در مترمربع) و برای این شرایط نیز به‌طور معنی‌داری بیشتر از شرایط اعمال تنش از مرحله شروع ساقه‌روی تا گلدهی (۲۶۱/۹۸ گرم در مترمربع) بود (شکل ۵). سهم فتوسنتز جاری در پر کردن دانه‌ها در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو حداکثر (۴۵۱/۲۵ گرم در مترمربع) و در تیمار شاهد حداقل (۳۱۱/۴۴ گرم در مترمربع) بود (جدول ۵). باین حال، تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم نانو تفاوت معنی‌داری از این نظر با تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیسیم غیر نانو نداشت. همچنین،



شکل ۵. تأثیر تنش خشکی بر سهم فتوسنتز جاری در پر شدن دانه گندم.

Fig. 5. Effect of drought stress on the contribution of current photosynthesis in wheat grain filling.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی سیلیسیم بر درصد توزیع مجدد ماده خشک از عملکرد دانه‌ها در گندم.

Table 7. Mean comparison of interaction of drought stress and silicon foliar application on contribution of redistribution of dry matter in grain filling in wheat.

دوره تنش خشکی Drought stress period	Silicon foliar application			محلول پاشی سیلیسیم			شاهد Control
	۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات نانو 50 mg L ⁻¹ with nanoparticles	۱۰۰ میلی گرم در لیتر با ذرات نانو 100 mg L ⁻¹ with nanoparticles	۱۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات نانو 150 mg L ⁻¹ with nanoparticles	۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات غیر نانو 50 mg L ⁻¹ with bulk particles	۱۰۰ میلی گرم در لیتر با ذرات غیر نانو 100 mg L ⁻¹ with bulk particles	۱۵۰ میلی گرم در لیتر با ذرات غیر نانو 150 mg L ⁻¹ with bulk particles	
طویل شدن ساقه تا گلدهی Stem elongation to flowering	22.21 ^a	20.83 ^a	24.32 ^a	22.84 ^a	22.75 ^a	22.91 ^a	22.52 ^a
گلدهی تا پایان دوره رشد Flowering to end of growth	33.04 ^b	26.29 ^c	32.73 ^{bc}	35.78 ^b	30.01 ^{bc}	30.05 ^{bc}	45.12 ^a
شاهد Control	22.37 ^a	19.86 ^a	23.62 ^a	24.49 ^a	22.36 ^a	21.20 ^a	23.54 ^a

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ردیف اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد ندارند.

Means followed by the same letters in each row are not significantly different at 5% probability

افزایش عملکرد دانه و توزیع مجدد، کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر ذرات نانو سیلیسیم مناسب‌تر باشد، چراکه غلظت‌های بالاتر ذرات نانو تأثیر منفی بر رشد گیاه داشت و سبب کاهش عملکرد دانه و تولید ماده خشک گردید.

در مجموع، پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط تنش خشکی حضور سیلیسیم و به‌خصوص ذرات نانو نقش چشمگیری در بهبود عملکرد دانه گندم و همچنین توزیع مجدد مواد فتو سنتزی داشت. به نظر می‌رسد برای کاهش اثر منفی تنش رطوبتی در طول فصل رشد گیاه گندم و

منابع

- Ahmadi, A., Si-O-Semardeh, A., Zali, A.A., 2004. A comparison between the capacity of photoassimilate storage and remobilization, and their contribution to yield in four wheat cultivars under different moisture regimes. Iranian Journal Agricultural Science. 35, 921-931. [In Persian with English Summary].
- Ali, A., Tahir, M., Amin, M., Basra, S.M.A., Maqbool, M., Lee, D.G., 2013. Si induced stress tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) hydroponically grown under water deficit condition. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 19, 951-957.
- Chen, W., Yao, X., Cai, K., Chen, J., 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research. 142, 67-76.
- Ebadi, A., Sahed, K., Sanjari, A.H., 2011. The effect of irrigation cut on dry matter remobilization and some of agronomy traits on spring barley. Iranian Journal of Crop Production. 4, 19-37. [In Persian with English Summary].
- Ezzat Ahmadi, M., Noormohammadi, G., Ghodsi, M., Kafi, M., 2011. Effect of water stress and source limitation on accumulation and remobilization of photoassimilates in wheat genotypes. Iranian Journal of Field Crops Research. 9, 229-241. [In Persian with English Summary].

- Gent, M.P.N., 1994. Photosynthate reserves during grain filling in winter wheat. *Agronomy Journal*. 86, 159-167.
- Gong, H., Chen, K., 2012. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*. 34, 1589-1594.
- Hanafy, A.H., Ahmed, E.M., Harb, M.A., Morgan, S.H., 2008. Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions. *International Journal of Agricultural Research*. 3, 1-26.
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Mortia, S., Luxova, M., Lux, A., 2005. Application of Si enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologiae Plantarum*. 123, 459-466.
- Karmalachab, A., Bakhshandeh, A.M., Gharineh, M.H., Moradi-Talavat, M.R., Fathi, G.H., 2014. Effect of silicon application on morphophysiological, yield, and seed mineral elements content of wheat under water stress. *Agricultural and Gardening Production and Processing Journal*, 14, 133-144. [In Persian with English Summary].
- Kalaji, H.M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I.A., Cetner, M.D., Łukasik, E., Goltsev, V., Ladle, R.J., 2016. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*. 38, 102.
- Karimi, J., Mohsenzadeh, S., 2016. Effects of silicon oxide nanoparticles on growth and physiology of wheat seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*. 63, 119-123.
- Liu, E.K., Mei, X.R., Yan, C.R., Gong, D.Z., Zhang, Y.Q., 2016. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. *Agricultural Water Management*. 167, 75-85.
- Maydup, M.L., Antonietta, M., Graciano, C., Guiamet, J.J., Tambussi, E.A., 2014. The contribution of the awns of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) to grain filling: Responses to water deficit and the effects of awns on ear temperature and hydraulic conductance. *Field Crops Research*. 167, 102-111.
- Palta, J.A.T., Kobata, N.C., Turner, I.R., 1994. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. *Crop Science*. 334, 118-124.
- Papakosta, D.K., Gagianas, A.A., 1991. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling. *Agronomy Journal*. 83, 864-870.
- Prasad, T.N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja, K., Reddy, T., Sreeprasad, S., Sajanlal, P.R., Pradeep, T., 2012. Effect Of nano-scale zinc oxide particles on the germination growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*. 35, 905-927.
- Sinclair, T.R., 2011. Challenges in breeding for yield increase for drought. *Trends in Plant Science*. 16, 289-293.
- Tahir, M.A., Tullah, R., Aziz, T., Ashraf, M., Kanwal, S., Maqsood, M.A., 2006. Beneficial effects of silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*. 38, 1715-1722.
- Tousi Mojarrad, M., Ghannadha, M.R., 2007. Evaluation of grain yield potential and dry matter remobilization to seed in commercial bread wheat cultivars in normal and drought conditions. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 10, 323-339. [In Persian with English Summary].
- Yang, D., Luo, Y., Ni, Y., Yin, Y., Yang, W., Peng, D., Cui, Z., Wang, Z., 2014. Effects of exogenous ABA application on post-anthesis dry matter redistribution and grain starch accumulation of winter wheat with different staygreen characteristics. *The Crop Journal*. 2, 144-153.