University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 3, pp. 645-657 (Fall 2023)

https://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4869.2083

Original article

Effect of silicon and cycocel application on yield, yield components and biochemical traits of two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under drought conditions

H. Dehghanzadeh*, Z. Adavi

Assistant Professor, Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

Received 13 December 2021; Accepted 15 November 2021

Extended abstract

Introduction

Wheat is a major staple food crop in the world. Although all abiotic stresses adversely affect the wheat growth and production, water scarcity imposes the most severe effects on this crop. Drought stress is also believed to affect the uptake, transport and accumulation of key inorganic nutrients in plants. Silicon occurs abundantly in soils, but in the field of plant growth the other inorganic elements for plant growth are more important than Silicon. However, Silicon plays an effective role in plants under stressful conditions. Silicon entails useful effects in plants under water-deficit treatments, with respect to drought-induced regulation of metabolic processes and water relations. Of several plant growth regulators, Cycocel (CCC) is believed to be very effective in masking the adverse effects of different abiotic and biotic stresses on crops as well as being an essential component of the signal-transduction pathways operating in plants exposed to environmental cues including drought stress. Exogenously applied CCC is believed to affect absorption and transport of nutrients, stomata regulation, growth and photosynthetic rate, chlorophyll synthesis and transpiration. The literature has little information on the role of Silicon and CCC applied in combination in alleviating drought-induced injurious effects on plants. Therefore, in the present study, we appraised the effects of exogenous Silicon and CCC applied individually or in combination on wheat growth and grain yield under water-deficit conditions.

Materials and methods

This study was carried out in Tiran province, Isfahan, Iran during 2018-2019, as a split-split plot design in randomized complete block with three replications. The main plots considered irrigation regimes (full irrigation and 40% field capacity irrigated), sub-plots considered Silicon and cycocel application (control, 3.6 g l^{-1} Silicon, 210 mg l^{-1} Cycocel, and 3.6 g l^{-1} Silicon + 210 mg l^{-1} Cycocel) and sub-sub plots considered two wheat cultivar (Sirvan and Chamran). All measurements based on fresh plant samples were done before the grain-filling stage. Measurements included relative water content, soluble sugars and soluble proteins; activities of peroxidase, ascorbate peroxidase, catalase, superoxide dismutase, levels of hydrogen peroxide, malondialdehyde, concentrations of Ca, K and Mg and leaf water potential. At maturity, yield and yield components were measured. Statistical analysis of data was performed using the MINITAB statistical software.

* Corresponding author: Farzad Hosseinpanahi; E-Mail: Dehghanzadeh@pnu.ac.ir

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

Drought stress caused a considerable reduction in yield and yield components and relative water content of both cultivars. Application of Silicon and cycocel effectively improved these parameters in water-deficit treatments. Moreover, water-limited conditions markedly promoted the activities of key antioxidant enzymes including peroxidase, ascorbate peroxidase, catalase and superoxide dismutase, while enhancing the accumulation of soluble sugars, potassium, magnesium and calcium in leaf tissues. Application of Silicon and cycocel further enhanced the activities of the key antioxidant enzymes and accumulation of osmolytes, and decreased the levels of H_2O_2 and malondialdehyde in drought stressed plants. Synergistic effects of Silicon + cycocel application on yield and physiological parameters were apparent compared with Silicon or cycocel applied separately. Water-stress alleviation and yield improvement in the wheat cultivars by Silicon and cycocel application was attributable to partly improved osmotic adjustment and antioxidant activity as well as to more favorable water status under stress conditions.

Conclusion

Foliar application of Silicon, CCC and especially the combination Silicon + CCC, markedly improved grain yield and yield components of the two wheat cultivars under water-deficit. In Silicon, CCC and Silicon + CCC treatments, grain yield was 15.63%, 16.60% and 24.32% higher respectively, than with no foliar application under water stress in cv. Chamran, and 10.25%, 16.02% and 19.25% higher in cv. Sirvan. The results of the study highlight the role of Silicon and CCC application in regulating water-stress response of wheat, suggesting that Silicon and CCC are involved in physiological activities. These results showed positive effects of Silicon and CCC in terms of increased antioxidant activity as well as relative water content and leaf water potential. In addition, Silicon and CCC stimulated the active accumulation of some osmolytes in leaves of water-stressed wheat plants, which suggests enhanced osmoregulation ability. The synergistic effects of Silicon + CCC application on yield and physiological parameters were greater than of Silicon or CCC applied separately. Therefore, proper application of Silicon and CCC might result in increased production of wheat, particularly in dryland areas.

***Keywords*:** Membrane stability, Oxidative stress, Plant growth regulator, Stress

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۲

https://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4869.2083

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد سیلیکون و سایکوسل بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، اجزای عملکرد و عملکرد دانه دو رقم گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش آبی

حمید دهقان‌زاده*، ظهراب اداوی

گروه علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پایداری غشاء
تنش
تنش اکسیداسیون
تنظیم‌کننده رشد گیاهی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۹/۲۲

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۲

۱۶(۳): ۶۴۵-۶۵۷

چکیده

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد سایکوسل و سیلیکون بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، اجزای عملکرد و عملکرد دانه دو رقم گندم تحت شرایط کم‌آبیاری در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده بر پایه‌ی طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در اصفهان انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل دو سطح تنش آبی (آبیاری کامل و آبیاری به میزان ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان فاکتور اصلی، سایکوسل و سیلیکون (شاهد، ۲۰ میلی‌مولار سیلیکون، ۱۷۰۰ میکرومولار سایکوسل و کاربرد توأم ۲۰ میلی‌مولار سیلیکون +۱۷۰۰ میکرو مولار سایکوسل) به‌عنوان فاکتور فرعی و دو رقم گندم (چمران و سیروان) به‌عنوان فاکتور فرعی فرعی بودند. نتایج نشان داد تنش خشکی باعث کاهش عملکرد دانه به میزان ۳۵/۵۵ و ۶۶/۰۰ درصد در رقم چمران و سیروان و همچنین کاهش اجزای عملکرد دانه و محتوای نسبی آب برگ دو رقم گندم گردید. در شرایط تنش کاربرد سیلیکون، سایکوسل و سیلیکون+ سایکوسل باعث افزایش عملکرد دانه به میزان ۱۵/۶۳، ۱۶/۶۰ و ۲۴/۳۲ درصد در رقم چمران و افزایش ۱۰/۲۵، ۱۶/۰۲ و ۱۹/۲۵ درصدی عملکرد دانه در رقم سیروان گردید. همچنین خشکی باعث افزایش آنزیم‌های پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، سوپر اکسید دسموتاز و همزمان افزایش قندهای محلول، پتاسیم، منیزیم و کلسیم در بافت‌های برگی گردید. کاربرد سیلیکون و سایکوسل باعث افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع اسمولیت‌ها و کاهش مقدار مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در شرایط تنش گردید. تأثیر کاربرد توأم سیلیکون و سایکوسل بر بهبود عملکرد دانه و اجزای عملکرد دانه به‌واسطه بهبود محتوای نسبی آب، حفظ پتانسیل آب بالاتر، افزایش غلظت قند، پروتئین، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و افزایش آنتی اکسیدانت‌های سلول در شرایط تنش بیشتر از کاربرد مجزای آن‌ها بود؛ بنابراین کاربرد سیلیکون و سایکوسل با کاهش اثرات منفی تنش آبی، می‌تواند پتانسیل تولید گندم را در شرایط خشکی افزایش دهد.

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) از مهم‌ترین گیاهان زراعی است و در مساحت وسیعی از زمین‌های کشاورزی جهان کشت می‌گردد. بخش زیادی از زمین‌های زیر کشت گندم در ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده تولیدات زراعی مطرح است (Dehghanzadeh, 2019). پاسخ گیاهان به تنش آبی دارای سازوکار پیچیده‌ای است که شامل تغییرات مولکولی و گسترش آن به کل فرایندهای متابولیسم گیاه و تأثیر آن بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فنولوژیک است (Emam, 2011). تنش آبی در تمام دوره رشد بخصوص در مرحله گلدهی و طول دوره پر شدن دانه در گندم باعث کاهش تعداد و اندازه دانه می‌شود (Khajeh et al., 2008; Pessarakli, 2016). همچنین تنش خشکی بر جذب، انتقال و تجمع عناصر معدنی ضروری در گیاه مؤثر است (Sinclair, 2011).

سیلیکون یکی از فراوان‌ترین عناصر موجود در خاک بوده و چون جزء عناصر ضروری برای گیاه نیست، کمتر موردتوجه قرار گرفته است. پژوهش‌های مختلف به اثرات مفید آن

* نگارنده پاسخگو: حمید دهقان زاده. پست الکترونیک: Dehghanzadeh@pnu.ac.ir

به‌خصوص در زمان تنش اشاره و گزارش کردند که سیلیکون با افزایش فعالیت‌های ضد اکسیداسیونی و بالا بردن اسمولیت‌ها، نقش مهمی را در ایجاد مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی ایفا می‌کند (Tale Ahmad and Haddad, 2008). در تحقیقی سیلیکون باعث افزایش سوپر اکسید دسموتاز، کاتالاز و کاهش پراکسید هیدروژن و کاهش خسارت ناشی از اکسید در گندم تحت شرایط خشکی گردید (Gong et al., 2005). لی و همکاران (Li et al., 2009) هم با تیمار سیلیکون، افزایش عملکردی معادل ۲۳/۷ و ۳۱/۱ درصد در گندم را به ترتیب در تنش ملایم و تنش شدید خشکی گزارش کردند. این افزایش از طریق افزایش سوپر اکسید دسموتاز و کاتالاز و همچنین افزایش ظرفیت فتوسنتزی بیان گردید. افزایش پروتئین محلول در اثر کاربرد سیلیکون در گندم (Gong et al., 2005) و جو (Liang et al., 2008) تحت شرایط خشکی گزارش شده است. همچنین افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گندم تحت تنش خشکی با کاربرد سیلیکون به‌واسطه افزایش پروتئین محلول و افزایش فعالیت سوپر اکسیددسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز گزارش شده است (Khajeh et al., 2008). سیلیکون با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های اکسنده و کاهش محتوای رادیکال آزاد در سلول، مانع از خسارت اکسنده به سلول گیاهی شده، با بالا بردن محتوای تنظیم‌کننده‌های اسمزی نظیر پرولین و قندهای محلول، با حفظ تعادل آبی سلول از کاهش شدید محتوای نسبی آب جلوگیری می‌کند (Zhang et al., 2017).

کندکننده‌های رشد، مواد شیمیایی ساخته‌شده یا طبیعی هستند که به‌طور مستقیم با هدف تغییر برخی فرآیندهای ساختاری گیاه زراعی به‌کار می‌روند. به نظر می‌رسد هم‌اکنون با معرفی ارقام متعدد پاکوتاه و نیمه پاکوتاه در برخی غلات مانند گندم، کاربرد سایکوسل با هدف کاهش ارتفاع ساقه از اهمیت کمتری برخوردار باشد (Shekoofa and Emam, 2008). بااین‌وجود، اگر تأثیر مثبت سایکوسل بر عملکرد دانه قطعیت بیشتری یابد، استفاده از آن در مزارع غلات اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. کاربرد سایکوسل در گندم سبب افزایش محتوای نسبی آب، پروتئین و کلروفیل در شرایط تنش خشکی گردید و در گیاهانی که با سایکوسل تیمار شده بودند، با رفع تنش بازیابی سریع‌تری در گیاه مشاهده گردید (Ashraf and Foolad, 2007). اثر مثبت سایکوسل در شرایط تنش، حفظ سبزینگی گیاه بود که منجر به کاهش دمای کانوپی گردید (Shekoofa and Emam, 2008; PirastehAnosheh and Emam, 2015). سایکوسل از طریق افزایش سطح برگ و تعداد برگ، منجر به افزایش فتوسنتز و افزایش عملکرد می‌گردد (Pourmohammad et al., 2013).

اگرچه کاربرد سیلیکون و سایکوسل بر بهبود مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های محیطی گزارش شده است (Senaratna et al., 2000; Ashraf et al., 2009; Hayat et al., 2010; Zhang et al., 2017)، اما مطالعات کمی از تأثیر کاربرد توأم آن‌ها در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه وجود دارد؛ بنابراین در این تحقیق تأثیر کاربرد مجزا و توأم سیلیکون و سایکوسل بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه و ویژگی‌های بیوشیمیایی دو رقم گندم تحت شرایط تنش خشکی بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در منطقه تیران اصفهان با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۹ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۲ دقیقه انجام گرفت. ارتفاع محل آزمایش ۱۵۹۵ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی سالیانه ۱۶۵ میلی‌متر است. خصوصیات خاک محل آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. آزمایش به‌صورت کرت‌های دو بار خردشده بر پایه‌ی طرح بلوک کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. تنش خشکی در دو سطح (آبیاری کامل و آبیاری به میزان ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌عنوان فاکتور اصلی، سایکوسل و سیلیکون {شاهد، ۲۰ میلی‌مولار سیلیکون (Khodabandehloo et al., 2014)، ۱۷۰۰ میکرومولار سایکوسل (Jalalvand et al., 2019) و کاربرد توأم ۲۰ میلی‌مولار سیلیکون + ۱۷۰۰ میکرومولار سایکوسل)} به‌عنوان فاکتور فرعی و دو رقم گندم چمران و سیروان به‌عنوان فاکتور فرعی فرعی در نظر گرفته شد. محلول‌پاشی سایکوسل و سیلیکون در مرحله پایان پنجه‌زنی زمانی که برمبنای تشریح بوته‌های نماینده مزرعه سنبله اولیه در مرحله برجستگی دوگانه (مرحله رشدی زادوکس[1]= ۳۰) بود، به‌صورت شاخساره‌ای، در هوای آرام با استفاده از یک دستگاه

[1] Zadoks Growth Stage

محلول‌پاش دقیق دستی با فشار ثابت انجام گرفت. فاصله کرت‌های اصلی ۲ متر و کرت‌های فرعی ۱ متر در نظر گرفته شد. هر کرت دارای ۱۰ خط کشت بود. بذرها به‌صورت یکنواخت و به‌صورت دستی کشت شدند. فاصله خط‌ها ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کاشت در نیمه آبان ماه و با تراکم ۳۵۰ بوته در هر مترمربع انجام شد. میزان کود فسفر برحسب ۱۵۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات‌تریپل در هکتار محاسبه گردید و پیش از کاشت به خاک اضافه شد. کود نیتروژن بر مبنای ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره تأمین گردید و طی سه مرحله، یک‌سوم در زمان کاشت، یک‌سوم ابتدای ساقه رفتن و یک‌سوم دیگر در اوایل گلدهی به کرت‌های آزمایشی افزوده شد. مراقبت‌های زراعی به‌صورت یکنواخت برای همه کرت‌های آزمایشی در طول فصل رشد انجام شد. تمام کرت‌های آزمایشی تا قبل از شروع گلدهی به‌صورت منظم و بر اساس حد ظرفیت مزرعه آبیاری شدند. آبیاری کرت‌های تیمار تنش نیز با شروع گلدهی تا رسیدگی بر اساس ۴۰ درصد ظرفیت زراعی انجام گرفت. میزان ظرفیت ذخیره خاک (Fc-Pwp) از ۱۷ درصد در سطح تا ۱۵/۵ درصد وزنی در اعماق مختلف متغیر بود. درصد حجمی رطوبت خاک در حالت اشباع، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی به ترتیب ۳۶/۵، ۲۹/۶۷ و ۱۴/۰۶ درصد بود. درصد حجمی رطوبت خاک قبل از آبیاری در تیمارهای شاهد و تنش ۲۲/۵ و ۱۳/۸ بود. با استفاده از رابطه (۱) میزان آب مصرفی در هر آبیاری جهت کرت‌های اصلی برآورد و در هنگام آبیاری از طریق سرریز به کرت‌ها وارد گردید (Hassanli, 2000)

$$VW = [(FC-SM). Bd. D. A] \quad [1]$$

در این رابطه VW حجم آب مصرفی در هر آبیاری (برحسب مترمکعب)، FC درصد وزنی رطوبت خاک در ظرفیت زراعی، SM درصد وزنی رطوبت خاک در هنگام نمونه‌برداری، Bd جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتیمترمکعب)، D عمق توسعه ریشه گیاه (متر) و A مساحت کرت اصلی (مترمربع) است. مقدار آب مصرفی در تیمارهای شاهد و تنش به ترتیب ۶۷۴۸ و ۴۰۴۷ مترمکعب در هکتار به دست آمد. برای مشخص کردن درصد وزنی رطوبت خاک به‌منظور محاسبه میزان آب موردنیاز، از سه قسمت مختلف هر کرت نمونه‌هایی تا عمق توسعه ریشه برداشت گردید. بلافاصله وزن مرطوب توزین و سپس به مدت ۱۲ ساعت در آون با حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد جهت تعیین وزن خشک آن قرار داده شد (Varavipour, 2011).

جدول ۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاک در محل اجرای آزمایش در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر

Table 1. Chemical and physical properties of soil at the depth of 0-30 cm

بافت خاک (Soil texture)	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	نیتروژن کل Total nitrogen	ماده آلی Organic matter	پتاسیم K	فسفر P	pH	هدایت الکتریکی Ec
	---------- % ----------					----- mg kg^{-1} -----			dS.m^{-1}
Silty clay loam	40	35	25	0.034	0.2	320	12	7.5	2.7

در مرحله قبل از پر شدن دانه، محتوای نسبی آب از روش کاستلو (Castillo, 1996)، قندهای محلول بر اساس روش ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2006)، پروتئین محلول از روش برادفورد (Bradford, 1976)، فعالیت پراکسیداز از روش کاکمارک و همکاران (Cakmak et al., 1993)، اسکوربات پراکسیداز از روش ناکانو و آسادا (Nakano and Asada, 1981)، سطح پراکسید هیدروژن از روش ولژاویچ ژووانوویچ و همکاران (Veljovic-Jovanovic et al., 2002)، مقدار کاتالاز از روش آعبی (Aebi, 1984)، سوپراکسید دسموتاز با روش ژیندسا و ماتو (Dhindsa and Matow, 1981) و مالون دی‌آلدئید از روش هودگس و همکاران (Hodges et al., 1999)، غلظت پتاسیم، کلسیم و منیزیم به‌وسیله فلیم فتومتر مدل ۴۱۰ کورنینگ از برگ پرچم اندازه‌گیری گردید. در هنگام برداشت مساحتی معادل یک مترمربع و پس از حذف حاشیه از هر کرت انتخاب و عملکرد و اجزای عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab -13 انجام گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثر عامل آزمایشی، از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

عملکرد و اجزای عملکرد دانه

تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله به میزان ۲۴/۶۰ درصد در رقم چمران و ۳۸/۷۷ درصد در رقم

سیروان گردید (جدول ۲). با کاربرد سایکوسل و سیلیکون تأثیر منفی تنش خشکی بر تعداد دانه در سنبله کاهش یافت. در شرایط تنش، کاربرد سایکوسل، سیلیکون و سیلیکون+ سایکوسل منجر به افزایش ۱۱/۶۴ و ۱۱ /۳۲ و ۱۸/۱۹ درصدی تعداد دانه در سنبله در رقم چمران و افزایش ۱۰/۹۱ و ۸/۴۴ و ۱۳/۹۷ درصدی در رقم سیروان در مقایسه با شاهد گردید (جدول ۲). همچنین تنش خشکی باعث کاهش وزن هزار دانه در هر دو رقم گردید (جدول ۲). کاربر سایکوسل و سیلیکون منجر شد که کاهش وزن هزار دانه در شرایط تنش در مقایسه با شاهد کمتر باشد (جدول ۲). بیشترین تأثیر مثبت با کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون در شرایط تنش و افزایش ۲۲/۹۰ درصدی وزن هزار دانه در رقم چمران در مقایسه با شاهد به دست آمد (جدول ۲).

جدول ۲. تأثیر سیلیکون (Si) و سایکوسل (CCC) بر عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم گندم تحت شرایط مختلف آبیاری

Table 2. Effect of Silicon (Si) and Cycocel (CCC) on yield and yield components of two wheat cultivars under different irrigation conditions

تیمارهای آبیاری Irrigation treatment	تیمارهای شیمیایی Chemical treatment	تعداد دانه در سنبله No. of grains per spike		وزن هزار دانه 1000-grain weight (g)		عملکرد دانه Grain yield ($g\ m^{-2}$)	
		Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران
آبیاری کامل 100% field capacity	0	41.01 b	40.56 b	42.00 a	42.00 a	570.00 a	570.87 a
	Si	41.61 b	43.12 a	42.32 a	42.32 a	570.65 a	570.32 a
	CCC	41.54 b	41.32 b	42.81 a	42.81 a	580.23 a	578.32 a
	Si+ CCC	43.52 a	43.63 a	43.15 a	43.15 b	584.47 a	582.23 a
آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی 40% field capacity	0	25.11 d	30.56 e	22.52 d	22.52 c	210.87 d	367.87 d
	Si	27.23 c	34.02 d	25.05 c	25.05 b	234.15 c	435.23 c
	CCC	27.85 c	34.12 d	25.00 c	25.00 b	250.12 b	440.40 c
	Si+ CCC	28.62 c	35.12 c	26.01 b	26.01 b	260.13 b	485.45 b

جدول ۲. ادامه

Table 2. Continued

تیمارهای آبیاری Irrigation treatment	تیمارهای شیمیایی Chemical treatment	زیست‌توده Biological yield ($g\ m^{-2}$)		شاخص برداشت Harvest index (%)	
		Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران
آبیاری کامل 100% field capacity	0	1353.62 a	1300.52 b	42.18 a	43.53 b
	Si	1342.00 a	1310.23 ab	42.45 a	43.71 b
	CCC	1336.23 a	1315.02 ab	43.50 a	43.58 b
	Si+ CCC	1380.23 a	1364.02 a	42.38 a	42.30 b
آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی 40% field capacity	0	600.68 d	835.32 e	35.00 c	43.19 b
	Si	650.10 c	970.50 d	35.84 c	44.23 ab
	CCC	653.14 c	970.25 d	38.02 b	45.12 ab
	Si+ CCC	668.12 b	1000.88 c	38.45 b	48.12 a

میانگین‌های هر عامل آزمایشی در هر ستون با حداقل یک حرف مشترک، با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

All means followed by the same letter(s) in column are not significantly different at the 5% probability level by LSD test.

تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه در رقم چمران به میزان ۳۵/۵۵ درصد و در رقم سیروان به میزان ۶۶/۰۰ درصد گردید (جدول ۲). بااین‌حال کاربرد سایکوسل، سیلیکون و سایکوسل+ سیلیکون منجر به افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی گردید (جدول ۲). تأثیر کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون بر افزایش عملکرد دانه بیشتر از کاربرد مجزای آن‌ها بود (جدول ۲). در شرایط تنش، کاربرد سایکوسل، سیلیکون و سیلیکون+ سایکوسل منجر به افزایش ۱۹/۷۱، ۱۸/۳۱ و ۳۱/۹۶ درصدی عملکرد دانه در رقم چمران و افزایش ۱۸/۶۱ و ۱۱/۰۳ و ۲۳/۳۶ درصدی در رقم سیروان

در مقایسه با شاهد گردید (جدول ۲). در هر دو رقم، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار زیست‌توده گردید. بااین‌حال گیاهان تیمار شده با سیلیکون و سایکوسل در شرایط تنش زیست‌توده بالاتری در مقایسه با گیاهان شاهد داشتند (جدول ۲). تأثیر مثبت کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون بر افزایش زیست‌توده بیشتر از کاربرد مجزای آن‌ها بود (جدول ۲).

تنش خشکی باعث کاهش شاخص برداشت در رقم سیروان شد (جدول ۲). در شرایط تنش خشکی کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون باعث بهبود شاخص برداشت در هر دو رقم گندم گردید (جدول ۲). سایکوسل، از طریق کاهش ارتفاع در گیاه و تخصیص بیشتر مواد به مقصدهای فیزیولوژیک باعث بهبود در شاخص برداشت می‌شود. استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد، با حفظ ماده خشک تولیدشده، از طریق ازدیاد شاخص برداشت می‌تواند باعث افزایش عملکرد شود (Ashraf et al., 2011). کاهش عملکرد و اجزای عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (Thapa et al., 2018; Erocli et al., 2007; Sinclair, 2011; Dehghanzadeh, 2019). بااین‌حال کاهش عملکرد و اجزای دانه و زیست‌توده با کاربرد سایکوسل، سیلیکون و بخصوص کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون در شرایط تنش کمتر بود. بهبود رشد گیاهان مختلف تحت تأثیر تنش خشکی با کاربرد سایکوسل و سیلیکون در تحقیقات مختلف گزارش شده است (Zhang et al., 2017; Maghsoudi et al., 2016). افزایش عملکرد دانه در گیاه سورگوم با کاربرد سایکوسل گزارش شده که با نتایج این تحقیق همسو است (Sonobe et al., 2010). همچنین در تحقیقات سایر پژوهشگران هم افزایش قابل‌توجه عملکرد و اجزای عملکرد دانه گندم تحت شرایط خشکی را با کاربرد سایکوسل گزارش شده است (Ahmad et al., 2014; Zamaninejad et al., 2013). کاربرد سیلیکون به‌طور چشمگیری اثرات مخرب تنش خشکی را در بسیاری از گیاهان کاهش داده است (Gong et al., 2005; Hattori et al., 2005; Parveen and Ashraf, 2010; Ahmed et al., 2011; Cooke and Leishman, 2011; Broadley et al., 2012; Mauad et al., 2016; Ali and Hassan, 2017). در این تحقیق افزایش آنتی‌اکسیدانت‌های کاتالاز، سوپر اکسید دسموتاز، آسکوربات پراکسیداز با کاربرد سیلیکون و سایکوسل منجر به سازگاری گیاه در شرایط تنش و بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گردید. کاربرد سیلیکون می‌تواند به بهبود عملکرد گندم در شرایط تنش به‌واسطه افزایش جذب عناصر کلسیم، پتاسیم و منیزیم، افزایش محتوای نسبی آب برگ به دلیل افزایش قندهای محلول و تنظیم اسمزی، کمک کند (Tari et al., 2004). به نظر می‌رسد سایکوسل و سیلیکون در مراحل مختلف فیزیکو بیوشیمیایی گیاه نظیر فتوسنتز، تنظیم روزنه‌ها و جذب یونی نقش دارند و پتانسیل رشد گیاه را افزایش می‌دهند (Hayat et al; 2010).

غلظت قند و پروتئین محلول و تجمع عناصر معدنی

غلظت قندهای محلول در برگ پرچم تحت شرایط تنش خشکی در رقم چمران به میزان ۴۳/۸۳ درصد و در رقم سیروان به میزان ۱۹/۰۹ درصد افزایش یافت (جدول ۳). در شرایط تنش خشکی، گیاهان تیمار شده با سایکوسل و سیلیکون مقدار قند محلول بالاتری در مقایسه با گیاهان شاهد داشتند (جدول ۳) و کاربرد توأم سیلیکون و سایکوسل تأثیر بیشتری بر افزایش قندهای محلول در شرایط تنش خشکی در مقایسه با کاربرد مجزای آن‌ها داشت (جدول ۳). واکنش ارقام به کاربرد سیلیکون و سایکوسل متفاوت بود، به‌طوری‌که در رقم سیروان کاربرد سایکوسل، سیلیکون و سیلیکون+ سایکوسل منجر به افزایش قندهای محلول به میزان ۱۵/۷۱، ۱۳/۷۰ و ۲۱/۱۰ درصد و در رقم چمران به میزان ۱۵/۲۰، ۲۱/۷۵ و ۲۹/۵۷ درصد در مقایسه با عدم کاربرد آن‌ها گردید (جدول ۳).

افزایش غلظت قندهای محلول در شرایط تنش خشکی به‌عنوان یک پتانسیل اسمزی در مطالعات گزارش شده است (Shao et al, 2006). در این مطالعه افزایش قندهای محلول در رقم چمران بیشتر از رقم سیروان بود. نایار و والیا (Nayyar and Walia, 2003) بیان کردند که گیاهان مقاوم به تنش خشکی معمولاً تجمع قند محلول بیشتری از گیاهان حساس به تنش دارند. در این تحقیق قندهای محلول در برگ‌ها در شرایط تنش خشکی افزایش یافت و این افزایش در رقم چمران که مقاوم به خشکی است بیشتر از رقم حساس سیروان بود و به دلیل اثر هم‌افزایی، کاربرد توأم سیلیکون و سایکوسل تأثیر بیشتری در مقایسه با کاربرد مجزا داشت. به نظر می‌رسد افزایش سطح قندهای محلول در تحمل خشکی نقش داشته باشد زیرا قندهای محلول در ساختار آنزیم‌های دفاعی، تنظیم اسمزی، پایداری بیولوژیکی غشا و محافظت از رادیکال‌های هیدروکسیل نقش دارند (Shao et al 2006).

جدول ۳: تأثیر سیلیکون (Si) و سایکوسل (CCC) بر قندهای محلول، پروتئین محلول، پتاسیم، منیزیم و کلسیم دو رقم گندم تحت شرایط مختلف آبیاری

Table 3: Effect of Silicon (Si) and Cycocel (CCC) on soluble sugars, soluble proteins and mineral nutrients of two wheat cultivars under different irrigation regimes

تیمارهای آبیاری Irrigation treatment	تیمارهای شیمیایی Chemical treatment	قندهای محلول Soluble sugars %		پروتئین محلول Soluble proteins %		پتاسیم Potassium mg.g^{-1}FW		منیزیم Magnesium mg.g^{-1}FW		کلسیم Calcium mg.g^{-1}FW	
		Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران
آبیاری کامل 100% FC	0	43.00 ^{d}	43.12 ^{f}	16.50 ^{b}	15.50 ^{bc}	48.63 ^{e}	47.08 ^{e}	2.30 ^{c}	2.31 ^{c}	8.33 ^{b}	7.25 ^{d}
	Si	46.32 ^{c}	47.32 ^{e}	15.85 ^{b}	15.32 ^{bc}	48.52 ^{e}	48.10 ^{e}	2.31 ^{c}	2.28 ^{c}	8.10 ^{b}	7.26 ^{d}
	CCC	47.00 ^{c}	47.86 ^{e}	16.00 ^{b}	15.69 ^{bc}	52.00 ^{c}	52.01 ^{d}	2.30 ^{c}	2.29 ^{c}	8.21 ^{b}	7.15 ^{d}
	Si+ CCC	47.08 ^{c}	50.00 ^{d}	17.65 ^{a}	18.23 ^{a}	53.00 ^{c}	52.11 ^{d}	2.29 ^{c}	2.31 ^{c}	8.15 ^{b}	7.28 ^{d}
آبیاری ۴۰ درصد FC 40% FC	0	51.21 ^{b}	62.02 ^{c}	10.52 ^{d}	12.36 ^{d}	56.23 ^{c}	65.00 ^{c}	2.88 ^{b}	4.07 ^{b}	9.36 ^{a}	11.76 ^{c}
	Si	58.23 ^{b}	75.51 ^{b}	14.02 ^{c}	14.36 ^{c}	61.85 ^{b}	73.10 ^{b}	2.85 ^{b}	4.10 ^{b}	9.45 ^{a}	12.95 ^{b}
	CCC	59.26 ^{a}	71.45 ^{c}	14.00 ^{c}	14.32 ^{c}	63.15 ^{a}	78.00 ^{a}	3.02 ^{a}	4.65 ^{a}	9.27 ^{a}	12.64 ^{b}
	Si+ CCC	62.02 ^{a}	80.36 ^{a}	18.43 ^{a}	16.32 ^{b}	63.96 ^{a}	80.12 ^{a}	3.10 ^{a}	4.71 ^{a}	9.36 ^{a}	13.00 ^{a}

میانگین‌های هر عامل آزمایشی در هر ستون با حداقل یک حرف مشترک، با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
All means followed by the same letter(s) in column are not significantly different at the 5% probability level by LSD test.

تنش خشکی منجر به کاهش پروتئین‌های محلول در ارقام گردید (جدول ۳). کاربرد سیلیکون و سایکوسل در شرایط تنش باعث افزایش پروتئین‌های محلول در ارقام در مقایسه با شاهد گردید. کاربرد توأم سیلیکون و سایکوسل بر افزایش پروتئین‌های محلول بیشتر بود (جدول ۳). کاربرد توأم سیلیکون و سایکوسل در شرایط تنش منجر به افزایش پروتئین‌های محلول در رقم چمران و سیروان به میزان ۱۷/۶۱ و ۶/۹۶ درصد در مقایسه با آبیاری کامل گردید (جدول ۳). کاهش پروتئین‌های محلول در نخود در شرایط خشکی گزارش شده که با نتایج این تحقیق همسو است (Sio-Se Mardeh et al., 2014). تخریب پروتئین‌ها و انباشت برخی اسیدهای آمینه آزاد در جهت حفظ و تنظیم فشار اسمزی سلول در شرایط خشکی در گزارش‌های مختلف گزارش شده که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Ghorbanli and Niakan, 2005).

غلظت پتاسیم، منیزیم و کلسیم در شرایط تنش نسبت به شرایط نرمال در رقم چمران به ترتیب ۳۸/۰۶، ۷۶/۱۰ و ۶۲/۲۰ درصد و در رقم سیروان به ترتیب ۱۵/۶۲، ۲۵/۲۱ و ۱۲/۳۶ درصد افزایش یافت (جدول ۳). کاربرد سایکوسل و سیلیکون باعث افزایش تجمع پتاسیم، منیزیم در گیاهان تحت شرایط خشکی در مقایسه با شاهد گردید. بااین‌حال کاربرد سایکوسل و سیلیکون فقط باعث فزایش غلظت کلسیم در رقم چمران گردید (جدول ۳). در شرایط تنش خشکی غلظت پتاسیم، منیزیم و کلسیم در رقم چمران بیشتر از رقم سیروان بود (جدول ۳). جذب مقادیر مناسب پتاسیم، منیزیم و کلسیم در شرایط تنش، یک مکانیسم مهم در سازگاری به تنش است (Zhu et al, 2005). سایکوسل و سیلیکون با تنظیم روزنه‌ها و افزایش فتوسنتز منجر به افزایش جذب این عناصر در شرایط تنش خشکی می‌شوند (Zhu et al, 2005).

فعالیت آنتی اکسیدانت‌ها

تنش خشکی منجر به افزایش فعالیت پراکسیداز به میزان ۷۵/۰۶ و ۵/۴۹ درصد و افزایش فعالیت سوپراکسید دسموتاز به میزان ۶۲/۵۰ و ۳۴/۶۱ درصد به ترتیب در ارقام چمران و سیروان گردید (جدول ۴).

جدول ۴. تأثیر کاربرد سیلیکون (Si) و سایکوسل (CCC) بر فعالیت پراکسیداز (POD)، سوپراکسید دسموتاز (SOD)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، کاتالاز (CAT)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و مالون دی‌آلدئید (MDA) و محتوای نسبی آب برگ (RWC) دو رقم گندم تحت شرایط آبیاری مختلف

Table 4. Effect of Silicon (Si) and Cycocel (CCC) on activities of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX) and catalase (CAT), hydrogen peroxide (H_2O_2), malondialdehyde (MDA) and leaf relative water content (RWC) of two wheat cultivars under different irrigation regimes.

تیمارهای آبیاری Irrigation treatment	تیمارهای شیمیایی Chemical treatment	پراکسیداز POD Umg^{-1}protein		سوپراکسید دسموتاز SOD Umg^{-1}protein		آسکوربات پراکسیداز APX Umg^{-1}protein		کاتالاز CAT Umg^{-1}protein	
		Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران
آبیاری کامل 100% FC	0	25.68 d	38.02 d	5.20 d	5.12 d	1.65 d	1.18 c	3.15 d	3.12 f
	Si	24.36 d	40.32 d	5.18 d	5.15 d	1.64 d	1.22 c	3.16 d	3.10 f
	CCC	24.52 d	37.25 d	6.00 cd	5.97 c	1.75 c	1.86 c	3.15 d	3.13 ef
	Si+ CCC	25.48 d	40.98 d	6.50 c	6.02 c	1.77 c	1.83 c	3.57 c	3.89 e
آبیاری ۴۰ درصد FC 40% FC	0	27.09 c	66.56 c	7.00 bc	8.32 b	2.24 b	2.87 b	5.11 b	7.21 d
	Si	30.36 b	76.32 b	7.50 b	9.12 b	3.85 a	3.62 a	5.41 a	7.84 c
	CCC	29.39 b	71.65 b	7.50 b	9.32 b	3.92 a	3.88 a	5.55 a	8.02 b
	Si + CCC	33.87 a	82.36 a	8.01 a	10.54 a	3.87 a	3.86 a	5.84 a	8.87 a

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

تیمارهای آبیاری Irrigation treatment	تیمارهای شیمیایی Chemical treatment	مالون دی‌آلدئید MDA nmol g^{-1} FW		پراکسید هیدروژن H_2O_2 nmol g^{-1} FW		محتوای نسبی آب برگ LRWC %	
		Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران	Sirvan سیروان	Chamran چمران
آبیاری کامل 100% FC	0	5.42 e	5.54 cd	11.71 e	11.23 e	82.32 a	83.01 b
	Si	4.00 f	4.14 d	11.02 e	11.00 e	82.21 a	84.09 b
	CCC	3.47 fg	3.23 e	11.00 e	11.12 e	82.00 a	84.10 b
	Si+ CCC	3.20 g	3.14 e	10.81 e	10.00 e	82.00 a	84.00 b
آبیاری ۴۰ درصد FC 40% FC	0	17.20 a	12.36 a	56.62 a	42.71 a	40.13 d	57.02 c
	Si	14.35 b	9.23 b	38.01 b	22.23 c	45.15 c	82.32 b
	CCC	11.63 c	6.32 c	33.58 c	25.34 b	45.20 c	82.23 b
	Si + CCC	11.23 cd	6.42 c	28.78 d	15.34 d	49.40 b	88.20 a

میانگین‌های هر عامل آزمایشی در هر ستون با حداقل یک حرف مشترک، با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.
All means followed by the same letter(s) in column are not significantly different at the 5% probability level by LSD test

در هر دو رقم کاربرد سایکوسل و سیلیکون منجر به افزایش معنی‌دار پراکسیداز و سوپراکسید دسموتاز در شرایط تنش گردید و کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون دارای تأثیر بیشتری بر افزایش آن‌ها داشت (جدول ۴). علاوه بر این، در شرایط نرمال هم کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون منجر به افزایش فعالیت سوپراکسید دسموتاز در هر دو رقم گردید (جدول ۴). تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز گردید و این افزایش در رقم چمران بیشتر بود (جدول ۴). کاربرد سایکوسل و سیلیکون تأثیری بر افزایش آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز در رقم سیروان در رژیم‌های مختلف آبیاری نداشت و این در حالی بود که در رقم چمران کاربرد سایکوسل و سیلیکون هم در شرایط نرمال و هم در شرایط تنش منجر به افزایش آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز گردید (جدول ۴). افزایش معنی‌دار سطح پراکسید هیدروژن در شرایط تنش در ارقام مشاهده گردید (جدول ۴). کاربرد سایکوسل و سیلیکون منجر به کاهش سطح پراکسید هیدروژن در شرایط تنش گردید و کاربرد توأم سایکوسل و سیلیکون تأثیر بیشتری در مقایسه با کاربرد جداگانه آن‌ها داشت. در ارقام آزمایشی هم کاربرد سایکوسل و سیلیکون منجر به کاهش پراکسید هیدروژن در شرایط تنش گردید (جدول ۴). همچنین تنش خشکی باعث افزایش سطح مالون دی‌آلدئید در ارقام گردید (جدول ۴). اگرچه در شرایط نرمال اختلاف معنی‌داری در ارقام در میزان مالون دی‌آلدئید مشاهده نگردید، در شرایط تنش رقم حساس سیروان دارای مقادیر بالاتری از مالون دی‌آلدئید بود (جدول ۴). کاربرد سایکوسل و سیلیکون منجر به کاهش معنی‌دار مالون

دی‌آلدئید در تیمارهای آزمایش گردید، هرچند تأثیر آن در شرایط تنش بیشتر بود (جدول ۴). تأثیر سیلیکون در کاهش اثرات تنش خشکی در گزارش‌های مختلف به‌واسطه کاهش اثرات زیستی و غیر زیستی تنش گزارش شده است (Mauad et al., 2016). نتایج مشابهی از تأثیر سایکوسل و سیلیکون در کاهش تنش خشکی با بهبود اکسیدانت‌ها در گیاهان تحت تنش گزارش شده است (Senaranta et al., 2000). نتایج این تحقیق با یافته‌های سایر پژوهشگران مبنی بر اینکه کاربرد سیلیکون تأثیر بسیار مثبتی بر کاهش اثرات مخرب تنش‌های محیطی ازجمله خشکی در گیاه دارد همسو است (Ashraf et al., 2009; Li et al., 2009; Parveen and Ashraf, 2010; Zhang et al., 2017). خطر اکسیدانی اکسیژن فعال منجر به آسیب به چربی‌ها و پروتئین‌های غشا می‌شود (Molassiotis et al., 2006). بااین‌حال تعادل بین تولید اکسیژن فعال و حذف آن توسط آنتی اکسیدانت‌ها میزان خسارت اکسیدانت‌ها را مشخص می‌کند (Moller et al., 2007). در حقیقت ظرفیت پاک‌سازی اکسیژن فعال میزان سازگاری و تحمل گیاه به شرایط تنش را مشخص می‌کند (Tsugane et al., 1999). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت نظیر سوپراکسید دسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، منجر به افزایش سازگاری گیاه گندم در شرایط نامطلوب تنش خشکی می‌شود (Tari et al., 2004; Ashraf et al., 2009).

محتوای نسبی آب برگ

کاهش محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش در مقایسه با شاهد مشاهده گردید (جدول ۴). در شرایط تنش رقم مقاوم چمران دارای محتوای نسبی آب بیشتر در مقایسه با رقم حساس سیروان بود. کاربرد سایکوسل و سیلیکون منجر به افزایش محتوای نسبی آب در ارقام تحت تنش گردید (جدول ۴). پتانسیل آب برگ به‌عنوان یک شاخص از وضعیت رطوبتی گیاه مطرح بوده و یک نقش کلیدی در سرعت فتوسنتزی گیاه دارد (Endres et al., 2010). در مطالعات مختلف گزارش شد که سیلیکون وضعیت آبی برگ‌های تحت تنش خشکی را بهبود بخشید و به گیاه در مقابل کم‌آبی و تنش ثانویه اکسیداسیون کمک کرد (Zhu et al., 2005; Gong et al., 2005). تأثیر کاربرد سیلیکون بر بهبود پتانسیل آب ممکن است با افزایش مقاومت روزنه‌ای و حفظ مقادیر بیشتر رطوبت ازیک‌طرف و جذب بیشتر آب از طرف دیگر در ارتباط باشد (Thapa et al., 2018). بااین‌حال مکانیسم دقیق تأثیر سایکوسل و سیلیکون بر افزایش جذب آب هنوز به‌درستی مشخص نگردیده است، هرچند تأثیر آن بر تنظیم اسمزی یکی از پیشنهادها است (Isa et al., 2010). بااین‌حال افزایش اسمولیت‌ها با کاربرد سایکوسل (Hayat et al., 2010) و سیلیکون (Zhang et al., 2017) در گیاهان تحت تنش می‌تواند دلیلی بر افزایش مقاومت به خشکی گیاه باشد.

نتیجه‌گیری نهایی

کاربرد برگی سیلیکون و سایکوسل و مخصوصاً کاربرد توأم آن‌ها باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد دانه دو رقم گندم تحت شرایط کمبود آب گردید. در شرایط تنش کاربرد سیلیکون، سایکوسل و سیلیکون+ سایکوسل باعث افزایش عملکرد دانه به میزان ۱۵/۶۳، ۱۶/۶۰ و ۲۴/۳۲ درصد در رقم چمران و باعث افزایش ۱۰/۲۵، ۱۶/۰۲ و ۱۹/۲۵ درصدی عملکرد دانه در رقم سیروان گردید. نتایج این تحقیق نقش کاربرد سیلیکون و سایکوسل در تنظیم واکنش¬های گندم به تنش خشکی از طریق واکنش‌های فیزیولوژیکی را پررنگ‌تر نمود. همچنین نتایج تأثیر مثبت سیلیکون و سایکوسل را در افزایش فعالیت آنتی اکسیدانت‌ها، بهبود محتوای نسبی آب برگ را نشان داد. علاوه بر این، باعث افزایش فعالیت برخی اسمولیت‌ها در شرایط تنش خشکی گردید که منجر به بهبود تنظیم اسمزی می‌شوند. اثر هم‌افزایی کاربرد توأم سیلیکون و سایکوسل بر روی عملکرد و پارامترهای فیزیولوژیکی بیشتر از کاربرد مجزای آن‌ها بود؛ بنابراین، کاربرد سایکوسل و سیلیکون می‌تواند منجر به افزایش تولید گندم بخصوص در نواحی خشک گردد.

قدردانی

از کمک‌های مادی و معنوی ریاست و معاونت دانشگاه پیام نور استان اصفهان در اجرای این طرح، کمال تشکر را دارم.

منابع

Aebi, H., 1984. Catalase in vitro. Methodes in Enzymology. 105, 121-126

Ahmad, I., Basra, S.M.A., Wahid, A., 2014. Exogenous application of ascorbic acid, Cycocel and hydrogen peroxide improves the productivity of hybrid maize at low temperature stress. International Journal of Agriculture and Biological Sciences. 16, 825–830.

Ahmed, M., Hassen, F.U., Qadeer, U., Aslam, M.A., 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. African Journal of Agricultural Researche. 6, 594–607

Ali, E.F., Hassan, F.A.S., 2017. Water stress alleviation of Roselle plant by silicon treatment through some physiological and biochemical responses. Annual Research and Review in Biology. 21, 1 –17.

Ashraf, M., Foolad, M.R., 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. Environmental and Experimental Botany. 59, 206–216

Ashraf, M., Rahmatullah,R., Ahmad, M., Afzal,M., Tahir, A., Kanwal, S., Maqsood, M.A., 2009. Potassium and silicon improve yield and juice quality in sugarcane (*Saccharum oficinarum* L.) under salt stress. Journal of Agronomy and Crop Science. 195, 284–291.

Ashraf, M., Akram, N.A., Qurainy, F., Foolad, M.R., 2011. Drought tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. Advances in Agronomy 111, 249–296.

Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry. 72, 248–254.

Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Ma, J.F., Rengel, Z., Zhao, F., 2012. Beneficial elements. In marschners mineral nutrition of higher plants. 3rd edn (Ed. P Marschner) (Academic Press: London, UK)

Cakmak, I., Strbac, D., Marschner, H., 1993. Activities of hydrogen peroxide scavenging enzymes in germinating wheat seeds. Journal of Experimental Botany. 44, 127 –132.

Castillo, F.J., 1996. Antioxidative protection in the inducible CAM plant *Sedum album* L. following the imposition of severe water stress and recovery. Oecologia 107, 469–477.

Cooke, J., Leishman, M.R., 2011. Is plant ecology more siliceous than we realise? Trends Plant Science. 16, 61 –68.

Dehghanzadeh, H., 2019. Evaluation of some physiological growth indices effective on growth and grain yield of three wheat cultivars under drought stress. Envionmental Stress in Crop Sciences.12, 365-375. [In Persian With English summary].

Dhindsa, R.S., Matow, W., 1981. Drought tolerance in two mosses: correlated with enzymatic defense against lipid peroxidation. Journal of Experimental Botany. 32, 79 –91

Emam, Y., 2011. Cereal Crop Production. Shiraz University press. Shiraz, Iran. [In Persian].

Endres, L., Silva, J.V., Ferreira, V.M., Ver, G., Barbosa, D.S., 2010. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. The Open Agriculture Journal. 4, 31-37.

Erocli, L., Lulli, L., Mariotti, M., Masoni, A., Arduini, I., 2007. Postanthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat. Crop Science. 34, 1443–1451.

Ghorbanli, M., Niakan, M., 2005. The effect of drought stress on soluble sugar, total protein, proli, phenolic compound, cholorophyll content and nitrate reductase activity in soybean (*Glycine max* L. C.V. Gorga). Journal of Science (Kharazmi University). 5, 537-550. [In Persian with English summary].

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

Hassanli, A.M., 2000. Different methods of water measurement. Shiraz University Publication. 345 pp. [In Persian].

Hattori, T., Inanagaa, S., Arakib, H., 2005. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. Physiologia Plantarum., 123, 459–466

Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., Ahmad, A., 2010. Effect of exogenous Cycocel under changing environment. A review. Environmental and Experimental Botany. 68, 14 –25

Hodges, D.M., De Lond, J.M., Forne, C.F., Prange, P.K., 1999. Improving the thiobarbituric acid-reactive substances assay

for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. Planta. 207, 604–611

Isa, M., Bai, S., Yokoyama, T., Ma, J.F., Ishibashi, Y., Yuasa, T., Iwaya-Inoue, M., 2010. Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant. Plant and Soil. 331, 361–375.

Jalalvand, A., Andalibi, B., Tavakoli, A., Moradi, P. 2019. Effects of salicylic acid and cycocel on percentage and yield of essential oil and physiological characteristics on Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) under drought stress conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12, 865-876. [In Persian with English summary].

Khajeh, N., Emam, Y., Pakniyat, H., Kamgar Haghighi, A.A., 2008. Interaction of plant growth regulator chlormequat chloride (CCC) and drought stress on growth and grain yield of three barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.). Iranian Journal of Field Crop Science. 39, 215-224. [In Persian With English Summary].

khodabandehloo, S., Sepehri, A., Ahmadvand, G., Keshtkar, A., 2014. The effect of silicon application on grain yield of millet and water use efficiency under drought stress. Journal of Crops Improvement, 16, 399-416. [In Persian With English Summary].

Li, Q.F., Ma, C.C., Ji, J., 2009. Effect of silicon on water metabolism in maize plants under drought stress. Acta Ecologica Sinica. 29, 4163–4168.

Liang, Y., Zhu, J., Li, Z., Chu, G., Ding, Y., Zhang, J., Sun, W., 2008. Role of Si in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. Environmental and Experimental Botany. 64, 286–294.

Maghsoudi, K., Emam, Y., Ashraf, M., 2016. Foliar application of silicon at different growth stages alters growth and yield of selected wheat cultivars. Journal of Plant Nutrition. 39, 1194–1203.

Mauad, M., Cruscio, C.A.C., Nascente, A.S., Filho, H.G., Lima, G.P.P., 2016. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. Revista Ciencia Agronomica. 47, 532–539.

Molassiotis, A., Sotiropoulos, T., Tanou, G., Diamantidis, G., Therios, I., 2006. Boron-induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM9 (*Malus domestica* Borkh). Environmental and Experimental Botany. 56, 54–62.

Moller, M., Jensen, P.E., Hansson, A., 2007. Oxidative modifications to cellular components in plants. Annual Review of Plant Biology. 58, 459–481.

Nakano, Y., Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology. 22, 867–880.

Nayyar, H., Walia, D.P., 2003. Water stress induced proline accumulation in contrasting wheat genotypes as affected by calcium and abscisic acid. Biologia Plantarum. 46, 275–279

Parveen, N., Ashraf, M., 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. Pakistan Journal of Botany. 42, 1675–1684

Pessarakli, M., 2016. Handbook of Plant and Crop Physiology. Marcel Dekker, New York

Pirasteh Anosheh, H., Emam, Y., 2015. Manipulation of morpho-physiological traits in bread and durum wheat by using growth regulators at different irrigation regimes. Journal of Crop Production and Processing 2, 29-46. [In Persian with English summary].

Pourmohammad, A., Shekari, F., Soltaniband, V., 2013. Cycocel priming and foliar application affect yield components of rapeseed (*Brassica napus* L.). Cercetari Agronomice in Moldova. 47, 59-69

Senaratna, T., Touchell, D., Bunn, E., Dixon, K., 2000. Acetyl Cycocel (Aspirin) and Cycocel induce multiple stress tolerance in bean and tomato plants. Journal of Plant Growth Regulation. 30, 157–161.

Shao, H.B., Liang, Z.S., Shao, M.A., 2006. Osmotic regulation of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at soil water deficits. Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces. 47, 132–139.

Shekoofa, A., Emam., 2008. Effect of nitrogen fertilization and plant growth regulators (PGRs) on yield of wheat. Journal of Agricultural Science and Technology 10,101-108.

Sinclair, T.R., 2011. Challenges in breeding for yield increase for drought. Trends In Plant Science. 16, 289–293.

Sio-Se Mardeh, A., Gholami, S., Bahramnejad, B., Kanoun, H., Sadeghi, F., 2014. Effect of drought stress on compatible osmolytes content, enzyme activity and grain yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. Iranian Journal of Crop Science. 16, 109-124. [In Persian with English summary].

Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, A.E., Kobayashi, S., Kawamura, Y., Tanaka, K., Inanaga, S., 2010. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. Journal of Plant Nutrition. 34, 71–82.

Tale Ahmad, S., Haddad, R., 2008. Effect of silicon on drought toterance in wheat. Agricultural Research. 8, 159-170. [In Persian with English summary].

Tari, I., Simon, L.M., Deer, K.A., Csiszar, J., Bajkan, S., Kis, G., Szepesi, A., 2004. Influence of Cycocel on salt stress acclimation of tomato plants: oxidative stress responses and osmotic adaptation. Acta Physiologiae Plantarum. 26, 230–237.

Thapa, S., Reddy, S.K., Fuentealba, M.P., Xue, Q., Rudd, J.C., Jessup, K.E., Devkota, R.N., Liu, S., 2018. Physiological responses to water stress and yield of winter wheat cultivars differing in drought tolerance. Journal of Agronomy and Crop Science. 204, 347–358.

Tsugane, K., Kobayashi, K., Niwa, Y., Ohba, Y., Wada, K., Kobayashi, H., 1999. A recessive Arabidopsis mutant that grows photoautotrophically under salt stress shows enhanced active oxygen detoxification. The Plant Cell. 11, 1195–1206.

Varavipour, M., 2011. Soil Science. Payame Noor University Press. [In Persian].

Veljovic-Jovanovic, S., Noctor, G., Foyer, C.H., 2002. Are leaf hydrogen peroxide concentrations commonly overestimated? The potential influence of art factual interference by tissue phenolics and ascorbate. Plant Physiology and Biochemistry. 40, 501–507.

Zamaninejad, M., Khorasani, S.K., Moeini, M.J., Heidarian, A.R., 2013. Effect of Cycocel on morphological characteristics, yield and yield components of corn (*Zea mays* L.) under drought condition. European Journal of Experimemtal Bioligy. 3, 153–161.

Zhang, Z.J., Li, H.Z., Zhou, W.J., Takeuchi, Y., Yoneyama, K., 2006. Effect of 5-aminolevulinic acid on development and salt tolerance of potato (*Solanum tuberosum* L.) microtubers in vitro. Plant Growth Regulation. 49, 27-34.

Zhang, W., Xie, Z., Wang, L., Li, M., Lang, D., Zhang, X., 2017. Silicon alleviates salt and drought stress of Glycyrrhiza uralensis seedling by altering antioxidant metabolism and osmotic adjustment. Journal of Plant Research. 130, 611–624.