اثر محلول‌پاشی نانو ذرات (آهن و سیلیکون) بر عملکرد، مؤلفه‌های پر شدن دانه و برخی صفات فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

رئوف سیدشریفی[۱]، صابر سیف‌امیری[۲] و حامد نریمانی[۳]

۱) استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲) مربی پژوهشی، بخش زراعی باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، اردبیل، ایران.
۳) دانشجوی دکتری گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

نویسنده مسئول: **raouf_ssharifi@yahoo.com**

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی می‌باشد.

تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۰۶/۰۲ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱**

چکیده

خشکی یکی از شدیدترین تنش‌های محیطی است که نقش به‌سزایی در کاهش عملکرد در مناطق خشک و نیمه خشک دارد. در این راستا، کاربرد سیلیکون در ترکیب با عناصر ریزمغذی مانند آهن و آبیاری تکمیلی یک استراتژی جدید و نوآورانه برای غلبه بر اثرات مخرب خشکی است. از این رو به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی نانوذرات (آهن و سیلیکون) بر عملکرد، مؤلفه‌های پرشدن دانه و برخی صفات فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل (آلاروق) در سال زراعی ۰۱-۱۴۰۰ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی سطوح آبیاری (عدم آبیاری یا کشت دیم، آبیاری تکمیلی در ۵۰ درصد مراحل تکمه‌دهی و گل‌دهی به‌ترتیب معادل کد ۵۵ و ۶۵ مقیاس BBCH) و محلول‌پاشی نانوذرات (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسیدآهن، محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم درلیتر نانوسیلیکون، محلول‌پاشی هم‌زمان ۰/۵ گرم در لیتر نانواکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون) شامل می‌شدند. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات (آهن و سیلیکون) در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی شاخص کلروفیل (۳۵/۴۴ درصد)، محتوای نسبی آب (۴۴/۲۵ درصد)، هدایت روزنه‌ای برگ (۳۲/۹۳ درصد)، سرعت و طول دوره مؤثر پر شدن دانه (به‌ترتیب ۷/۴۷ و ۳۶/۳۳ درصد)، تعداد دانه در طبق (۴۵/۰۶ درصد)، وزن هزاردانه (۵۳/۰۶ درصد) و عملکرد دانه (۴۳/۷۷ درصد) را نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم افزایش داد. بر اساس نتایج این بررسی، به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی نانوذرات و انجام آبیاری تکمیلی می‌تواند به‌عنوان یک روش آسان، سریع و مؤثر در کاهش صدمات ناشی از خشکی در گلرنگ تحت شرایط دیم به‌واسطه بهبود مؤلفه‌های پرشدن دانه و برخی صفات فیزیولوژیک (همچون شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای برگ) استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: سرعت پر شدن دانه، شاخص کلروفیل، عملکرد کوانتومی و محتوای نسبی آب .

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

مقدمه

گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی است که ضمن برخورداری از مقادیر بالایی از روغن و اسیدهای چرب غیراشباع، در صنایع مختلف رنگرزی، تهیه صابون و مواد آرایشی، سوخت بیودیزل کاربرد داشته (Nogales-Delgado *et al*., 2019) و به لحاظ مقاومت به خشکی، در سطح وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت شرایط دیم کشت می‌شود. در همچون مناطقی تنش آبی یکی از عوامل محدودکننده عملکرد گیاهان زراعی بوده (Debaeke and Abdellah, 2004) و نقش مهمی را در تسریع پیری برگ‌ها و کاهش مؤلفه‌های پر شدن دانه گلرنگ ایفا می‌کند (سیدشریفی و سیدشریفی، ۱۳۹۸).

یکی از راه‌کارهای تعدیل یا کاهش اثر ناشی از محدودیت آبی در زراعت دیم، انجام آبیاری تکمیلی یا کاربرد اندازه محدودی آب در زمان توقف بارندگی و یا در شرایط محدودیت آبی به‌خصوص در انتهای دوره رشد گیاه و زمان پر شدن دانه است تا با تأمین آب کافی برای تداوم رشد بوته‌ها، امکان دستیابی به عملکردی پایدار و رضایت‌بخش در شرایط دیم فراهم شود (عبادی و همکاران، ۱۴۰۰). به بیانی دیگر انجام آبیاری تکمیلی یکی از روش‌های مؤثر در جبران کمبود رطوبت خاک، بالا بردن کارآیی مصرف آب و دست‌یابی به تولیدی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که ضمن ثبات تولید و عملکرد در سال‌های مختلف، به بهبود شرایط برای استفاده از ارقام اصلاح شده، کودهای شیمیایی و علف‌کش‌ها بدون توجه به پراکنش بارندگی‌های فصلی کمک می‌کند (تدین و امام، ۱۳۸۵).

در بیش‌تر مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت شرایط دیم، جذب عناصر غذایی کم مصرف و غیرمتحرک همانند آهن به‌دلیل محدودیت آبی، پایین است. آهن از عناصر ریز مغذی ضروری است که کاربرد آن به‌صورت محلول‌پاشی می‌تواند با مشارکت در فرآیند ساخت کلروفیل و فعالیت برخی آنزیم‌ها، در تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی و بهبود عملکرد مؤثر واقع شود (Hochmuth, 2011). در این راستا نریمانی و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند که محلول‌پاشی نانواکسید آهن در هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در گندم، با افزایش محتوای کلروفیل و بهبود سرعت و طول دوره پر شدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه شد. سیدشریفی و سیدشریفی (۱۳۹۸) گزارش کردند که کاربرد نانواکسید آهن و روی در شرایط محدودیت شدید و ملایم آبی (قطع آبیاری در مراحل تکمه‌دهی و گل‌دهی)، توانست با بهبود محتوای کلروفیل و مؤلفه‌های پرشدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه گلرنگ شود.

سیلیکون دومین عنصر فراوان در خاک و سطح پوسته زمین است که به شکل مونوسالیسیلیک‌اسید قابل جذب گیاهان می‌باشد اما این فرم سیلیسیوم در خاک موجود نیست. از این‌رو کاربرد آن به شکل نانوذرات به‌دلیل حلالیت بیش‌تر، سبک و کوچک بودن، سرعت جذب و انتقال راحت‌تر در مقایسه با شکل متداول و مرسوم آن، می‌تواند اثرگذاری بیش‌تر این

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

ذرات را توجیه نماید (El-Saadony *et al*., 2022; Monica and Cremonini., 2009). از این‌رو محلول‌پاشی نانوسیلیکون یکی از راه‌کارهای مؤثر در بهبود عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط تنش، حفظ آب در بافت‌های گیاهی و کاهش تلفات بیش از حد آب توسط تعرق است (Etesami and Jeong, 2018). کاربرد سیلیکون با افزایش رشد و جذب عناصر ضروری، در افزایش کارایی فتوسنتز، فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش میزان متابولیت‌های ثانویه مربوط به مقاومت به تنش، و تنظیم بیان ژن‌های درگیر در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی مؤثر است (Liu *et al*., 2019). گزارش شده است که محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط خشکی با بهبود محتوای نسبی آب، شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (نظری و همکاران، ۱۴۰۰).

گستردگی کشت گلرنگ در مناطق تحت شرایط دیم در کشور و مواجه شدن بخشی از دوران رشدی آن با محدودیت آبی، و نقش آبیاری تکمیلی و نانوذرات (آهن و سیلیکون) در تعدیل بخشی از اثرهای ناشی از تنش و بررسی‌های محدود انجام شده در این راستا، از جمله مواردی بودند که موجب شد تا اثر این عوامل بر عملکرد، مؤلفه‌های پرشدن دانه و برخی صفات فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آلاروق اردبیل در سال زراعی ۰۱-۱۴۰۰ اجرا شد. محل اجرای آزمایش با مختصات جغرافیایی ۴۸° و ′۲۰ طول شرقی و ۳۸° و ′۱۵ عرض شمالی، دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد با ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا بود. خاک منطقه آزمایشی جزء خاک‌های لوم رسی بوده که pH آن حدود ۷/۷ و عمق خاک نیز حدود ۷۰ سانتی‌متر است. نتایج حاصل از تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ و شرایط اقلیمی منطقه مورد کشت در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

مشخصه	شن	سیلت	رس		فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب		آهک	کربن آلی	نیتروژن
				pH			هدایت الکتریکی (دسی-زیمنس برمتر)			
مقدار	درصد				میلی‌گرم بر کیلوگرم			درصد		
	۳۱	۳۰	۳۹	۷/۷۶	۱۲/۲	۴۹۵	۱/۵۴	۵	۰/۸۵	۰/۰۸

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۲: مشخصات جوی در طول دوره رشدی گلرنگ در سال زراعی ۰۱-۱۴۰۰

ماه‌های سال / پارامترهای اقلیمی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
میزان بارندگی (میلی‌متر)	۵	۲۸	۱۶/۵	۶۴/۱	۱۹/۹	۲۵/۲
میانگین دما (سانتی‌گراد)	۱۲	۷/۱	۶/۹	-۰/۴	-۰/۴	۳/۹
جمع ساعات آفتابی	۷۳	۷۱	۶۲	۷۳	۷۶	۷۳
متوسط رطوبت نسبی (درصد)	۱۶۴	۱۶۶/۵	۱۹۰/۱	۱۶۱/۵	۱۹۴/۲	۱۴۹
ماه‌های سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
میزان بارندگی (میلی‌متر)	۴۴	۵۲/۱	۶/۱	۰/۱	۰/۵	-
میانگین دما (سانتی‌گراد)	۸/۴	۱۲/۳	۱۷/۳	۱۸/۹	۱۹/۶	-
جمع ساعات آفتابی	۱۷۶/۳	۱۶۰/۶	۲۸۷/۵	۳۴۶	۲۶۷/۷	-
متوسط رطوبت نسبی (درصد)	۶۴	۷۶	۶۵	۶۳	۶۸	-

فاکتورهای مورد بررسی شامل سطوح آبیاری (عدم آبیاری یا کشت دیم، آبیاری تکمیلی در ۵۰ درصد مراحل تکمه‌دهی و گل‌دهی به‌ترتیب معادل با کد ۵۵ و ۶۵ مقیاس BBCH[1]) و محلول‌پاشی نانوذرات (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسید آهن، محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول‌پاشی هم‌زمان ۰/۵ گرم در لیتر نانواکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون) بودند. محلول‌پاشی نانوذرات به‌وسیله سم‌پاش دستی دو لیتری در دو مرحله از رشد ساقه گلرنگ معادل با کد ۳۱ و ۳۹ بر اساس مقیاس BBCH[2] انجام شد. برای حل بهتر، ابتدا نانو اکسیدآهن و سیلیکون در آب دی‌یونیزه قرار داده شدند و با استفاده از لرزش و ارتعاشات دستگاه اولتراسونیک (۱۰۰ وات و۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه) این مواد پخش شده و محلول گردید (Prasad *et al*., 2012). نانوسیلیکون (SiO_2-Nano) محصول شرکت Nanomaterial US Research بود که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان و نانواکسیدآهن از تجهیزات آزمایشگاهی و شیمیایی جهان کیمیای ارومیه تهیه شد. مشخصات آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول۳: مشخصات نانواکسیدآهن و نانوسیلیکون

نوع نانوذرات	وزن (گرم)	خلوص (درصد)	میانگین اندازه ذرات (نانومتر)	سطح ویژه ذرات	رنگ
نانواکسید آهن	۱	۹۹	<۳۰	>۳۰ (میلی لیتر بر گرم)	پودری قرمز
نانوسیلیکون	۰/۰۵	۹۹	۲۰-۳۰	>۳۰(میلی لیتر بر گرم)	پودری سفید

هر واحد آزمایشی شامل شش ردیف کاشت دو متری با فاصله بین ردیفی ۳۰ سانتی‌متر بود. در این بررسی از گلرنگ رقم صفه استفاده شد. این رقم حاصل انتخاب تک بوته از توده محلی گلرنگ اصفهان است که با استفاده از روش گزینش لاین‌های خالص و تاکید بر یکنواختی رنگ قرمز گلچه‌ها، تعداد و اندازه غوزه، زودرسی، درشتی غوزه‌ها و ارتفاع مناسب بوته برای برداشت مکانیزه تولید شده، و مناسب کشت در مناطق معتدل سرد است. عملیات کاشت در ۲۰ آبان ماه ۱۴۰۰ و

[1] - **B**iologische **B**undesanstalt, Bundessortenamt and **CH**emical industry; **BBCH**
[2] - **B**iologische **B**undesanstalt, Bundessortenamt and **CH**emical industry; **BBCH**

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

برداشت در ۲۵ مرداد ۱۴۰۱ انجام شد. پس از استقرار و در مرحله ۴ تا ۵ برگی، گیاهچه‌ها براساس فاصله هشت سانتی‌متر (تراکم حدود ۴۰ بوته در مترمربع) تنک شدند. اندازه‌گیری برخی صفات فیزیولوژی، دو هفته بعد از آبیاری تکمیلی در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی انجام شد. در هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی روی چهار برگ توسعه یافته، شاخص کلروفیل با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (مدل SPAD-502، شرکت Konica Minolta، ژاپن) و هدایت روزنه‌ای برگ با استفاده از دستگاه پورومتر (Porometer AP4, Delta-T Devices ltd., Cambridge, UK) اندازه‌گیری شدند. همچنین عملکرد کوانتومی برگ با دستگاه فلورسانس کلروفیل (مدل OS-30p، شرکت OPTI SCIENCES، آمریکا) از بین خطوط اصلی هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی روی شش برگ توسعه یافته (در فاصله زمانی ساعت ۱۰-۸ صبح) انتخاب و بعد از ۱۵ دقیقه تاریکی توسط کلیپس‌های مخصوص، اندازه‌گیری شد (Kheirizadeh Arough *et al*., 2016). برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) در هر واحد آزمایشی پنج برگ توسعه یافته به‌طور تصادفی انتخاب و بعد از قرار دادن در فویل‌های آلومینیومی، داخل کیسه‌های پلاستیکی و روی یخ قرار داده و خیلی سریع به آزمایشگاه منتقل و وزن تر آن‌ها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد، سپس تمامی نمونه‌ها در آب مقطر به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا وزن آماس یافته برگ-ها اندازه‌گیری شود. در مرحله بعد وزن خشک برگ‌ها بعد از قرارگیری در آون در دمای ۵±۷۰ درجه سانتی‌گراد اندازه گیری شد. سپس محتوای نسبی آب با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Tambussi *et al*., 2005):

رابطه ۱: $$RWC\ (\%) = [(FW-DW)/(TW-DW)] \times 100$$

RWC= درصد محتوای نسبی آب برگ، FW= وزن تر برگ، DW= وزن خشک برگ و TW= وزن آماس یافته یا به حالت تورم برگ است.

به‌منظور تعیین مؤلفه‌های پر شدن دانه از ۱۰ روز پس از تکمه‌دهی و شروع دوره پر شدن دانه، در فواصل زمانی هر چهار روز یک‌بار، سه بوته از بین بوته‌های رقابت‌کننده و با رعایت اثرحاشیه‌ای به‌طور تصادفی برداشت و پس از انتقال به آزمایشگاه، ابتدا دانه‌ها از طبق جدا و شمارش شدند. بعد از قرارگیری در آون، وزن خشک تک بذر از محاسبه وزن خشک کل به تعداد بذر برآورد شد (Ronanini *et al*., 2004). به‌منظور برآورد، تجزیه و تحلیل و تفسیر پارامترهای مربوط به پر شدن دانه از یک مدل رگرسیون خطی دو تکه‌ای بر اساس رویه DUD نرم‌افزار SAS توسط رابطه ۲ محاسبه شد.

رابطه ۲: $$GW = \begin{cases} a + bt_0 & t < t_0 \\ a + bt & t > t_0 \end{cases}$$

در این رابطه GW وزن دانه، t زمان و b سرعت پر شدن دانه، t_0 پایان دوره پر شدن دانه و a عرض از مبدأ است. این مدل تغییرات وزن دانه نسبت به زمان را به دو مرحله تفکیک می‌کند: مرحله اول که در حقیقت مرحله خطی پر شدن دانه

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

است، وزن دانه تا رسیدن به حداکثر مقادیر خود در زمان t_0 که در حقیقت زمان رسیدگی وزنی است، به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. شیب خط رگرسیون در این مرحله ($t < t_0$) سرعت پر شدن دانه را نشان می‌دهد (Ellis and Pieta-Filho, 1992). با پردازش این مدل بر کلیه داده‌ها ابتدا دو پارامتر مهم پر شدن دانه یعنی سرعت پر شدن دانه (b) و زمان رسیدگی وزنی (t_0) به‌دست آمده و سپس مقدار عددی t_0 در قسمت دوم رابطه قرار داده شد و GW که وزن دانه است محاسبه شد. دوره مؤثر پرشدن دانه از تقسیم حداکثر وزن دانه به شیب خط (سرعت پرشدن دانه) محاسبه شد (Ellis and Pieta-Filho, 1992). برای برآورد اجزای عملکرد و برخی دیگر از صفات از جمله ارتفاع بوته، از خطوط اصلی هر واحد آزمایشی با رعایت اثر حاشیه‌ای، هشت بوته به‌طور تصادفی و از بین بوته‌های رقابت‌کننده برداشت و میانگین داده‌های حاصل به‌عنوان ارزش آن صفت در تجزیه واریانس مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد دانه با برداشت از سطحی معادل ۰/۵ مترمربع از خطوط اصلی هر کرت بعد از حذف اثر حاشیه‌ای برآورد شد. برای تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها از نرم افزارهای SAS (نسخه ۹/۱) و Excel (۲۰۰۷) استفاده شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر محلول‌پاشی نانوذرات (آهن و سیلیکون) و آبیاری تکمیلی بر هدایت الکتریکی برگ، عملکرد کوانتومی، طول دوره پر شدن دانه و ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش هم-زمان این دو عامل بر شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، هدایت روزنه‌ای برگ، حداکثر وزن دانه، سرعت و طول دوره مؤثر پر شدن دانه در سطح احتمال یک درصد اما بر تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

شاخص کلروفیل

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی، از بیش‌ترین شاخص کلروفیل (۷۰/۲) و از افزایش ۳۵/۴۴ درصدی نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). مطابق نتایج جدول‌های ۲ و ۵ کاهش نزولات، افزایش دما و طول ساعات آفتابی در طول دوره رشدی گلرنگ ضمن کاهش فاکتورهای لازم جهت سنتز کلروفیل، به‌دلیل بسته نگه داشتن روزنه‌ها در طی روز و کاهش هدایت روزنه‌ای و اختلال در انتقال الکترون در فتوسیستم II، موجب می‌شود الکترون اضافی ناشی از تجزیه آب در چنین شرایطی با تولید گونه‌های فعال اکسیژنی همانند پراکسید هیدروژن، و خسارت به غشاء سلولی از طریق پراکسیداسیون چربی و پروتئین‌ها، به کاهش کلروفیل منجر شود (Simova-Stoilova *et al.*, 2008;Schutz *et al.*, 2001). در چنین شرایطی محلول‌پاشی نانواکسید آهن به‌دلیل نقش این عنصر در سنتز اجزای کلروپلاست به‌ویژه

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

پروتئین‌های انتقال الکترون، فعال‌سازی مسیر بیوسنتز کلروفیل و برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز، در حفاظت از تخریب کلروفیل توسط رادیکال‌های فعال اکسیژن و افزایش شاخص کلروفیل مؤثر است (Zayed *et al*., 2011). بخش دیگری از افزایش شاخص کلروفیل به‌واسطه محلول‌پاشی نانوسیلیکون را می‌توان به نقش سیلیکون در کاهش گونه‌های فعال اکسیژن نسبت داد که ضمن کاهش هدایت الکتریکی برگ، کاهش تخریب غشا و تولید پراکسید هیدروژن، موجب افزایش فعالیت بیوفسفات کربوکسیلاز و فتوسنتز برگ‌ها و مقدار کلروفیل می‌شود (Al-Aghabary *et al*., 2005; Gong *et al*., 2003) (جدول ۶).

عملکرد کوانتومی برگ

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی هم‌زمان نانو اکسیدآهن و سیلیکون و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی، موجب افزایش به‌ترتیب ۲۶/۸۵ و ۳۵/۵۲ درصدی عملکرد کوانتومی برگ نسبت به تیمارهای عدم محلول‌پاشی نانوذرات و کشت دیم شد (جدول ۶). به نظر می‌رسد افزایش دما و محدودیت آبی ناشی از کاهش نزولات در شرایط رشدی با ایجاد اختلال در فعالیت فتوسیستم II و همچنین تخریب ساختمان پروتئین D_1 موجود در فتوسیستم، موجب کاهش عملکرد کوانتومی برگ شده است (جدول ۲) (Rahbarian *et al*., 2011). از طرفی بالا بودن دما و کاهش نزولات با تشدید شرایط تنش آبی و کاهش هدایت روزنه‌ای، منجر به بسته شدن روزنه‌ها و آسیمیلاسیون CO_2 می‌گردد (جدول‌های ۲و ۵). در چنین وضعیتی مصرف نشدن محصولات حاصل از زنجیره انتقال الکترون (NADPH وATP)، موجب افزایش میزان فردوکسین احیاء و تولید رادیکال‌های فعال شده، و از این طریق تغییر و یا تخریب پروتئین‌های غشاء تیلاکوئیدی موجب افزایش هدایت الکتریکی برگ می‌شود (جدول ۶). تخریب پروتئین‌های غشاء تیلاکوئید، مانع انتقال الکترون از جایگاه پذیرنده فتوسیستم II می‌گردد و این امر موجب کاهش سرعت انتقال الکترون، افزایش فلورسانس کلروفیل و کاهش عملکرد کوانتومی می‌شود (Passioura, 2007). بخشی از بهبود عملکرد کوانتومی در شرایط محلول‌پاشی نانواکسید آهن و سیلیکون می‌تواند با بهبود محتوای نسبی آب، افزایش هدایت روزنه‌ایی و شاخص کلروفیل مرتبط باشد (جدول ۵). Balakrishnan و همکاران (۲۰۰۰) دلیل اصلی کاهش عملکرد کوانتومی فتوسیستم II را به کمبود عناصر ریز مغذی همچون آهن، روی و منیزیم نسبت دادند. در این راستا نظری و همکاران (۱۴۰۰) بیان کردند که محلول‌پاشی نانوسیلیکون با افزایش پایداری غشاء و بهبود محتوای نسبی آب و شاخص کلروفیل، موجب افزایش عملکرد کوانتومی در تریتیکاله شد. نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز افزایش عملکرد کوانتومی تریتیکاله به‌واسطه محلول‌پاشی با نانوسیلیکون را، به افزایش محتوای نسبی آب، بهبود هدایت روزنه‌ای و شاخص کلروفیل نسبت دادند.

.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

جدول ۴: تجزیه واریانس اثر محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون بر برخی صفات فیزیولوژیک، مؤلفه‌های پر شدن دانه و عملکرد گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات											
		شاخص کلروفیل برگ	محتوای نسبی آب برگ	هدایت روزنه‌ای برگ	هدایت الکتریکی برگ	عملکرد کوانتومی برگ	حداکثر وزن دانه	سرعت پر شدن دانه	طول دوره پر شدن دانه	دوره مؤثر پر شدن دانه	ارتفاع بوته	تعداد دانه در طبق	وزن هزار دانه	عملکرد دانه
تکرار	۲	۳۴/۰۲*	۲۴۳/۶۳**	۷۳/۶۸**	۶۸۴/۵۳**	۰/۰۱۹**	۰/۰۰۰۰۱۵*	۵/۷۶×۱۰$^{-۹}$**	۹/۲۹*	۱۲/۹**	۱۵۱/۸۸**	۳۲۳/۳**	۳۹/۷۴**	۳۳۶/۹۹**
نانوذرات (N)	۳	۱۸۴/۰۸**	۵۱۹/۷۱**	۵۴/۴**	۷۲۷/۸۱**	۰/۰۶۶**	۰/۰۰۰۰۸۵**	۲/۱۱×۱۰$^{-۹}$ ns	۲۹/۹۹**	۶۰/۷۳**	۵۳۷/۶۱**	۱۷۵/۲۷**	۱۲۴/۶۵**	۶۸۳/۷**
آبیاری تکمیلی (I)	۲	۸۵/۰۵**	۱۹۵/۴۴**	۳۴/۹۹**	۲۹۳/۴۳**	۰/۰۵**	۰/۰۰۰۰۳۹**	۱/۶۷×۱۰$^{-۹}$ ns	۱۴/۱۲**	۲۴/۴۵**	۱۳۱/۱۵**	۱۰۴/۷۶**	۵۰/۹۵**	۲۵۸/۶۴**
N×I	۶	۲۸/۱۵**	۳۰/۸۷*	۶/۱۸*	۲۳/۳۴ns	۰/۰۰۳۱ns	۰/۰۰۰۰۱*	۲/۴×۱۰$^{-۹}$**	۶/۲۷ns	۶/۷۴*	۳۰/۱۵ns	۲۳/۴۴*	۸/۹*	۳۵/۶۶*
خطا	۲۲	۶/۸	۱۱/۶۹	۱/۷۴	۱۸/۵۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۳۴	۶/۳۳×۱۰$^{-۱۰}$	۲/۵۳	۲/۲	۱۴/۲۲	۷/۵۴	۲/۹۲	۱۳/۳۷
ضریب تغییرات (٪)		۴/۲۳	۵/۲۱	۴/۳۹	۸/۷	۵/۵۴	۵/۸۶	۲/۲	۴/۶۳	۵/۳۷	۴/۵۳	۵/۳۶	۵/۵۴	۴/۴

* , **به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیرمعنی‌دار.

جدول ۵: مقایسه میانگین اثر اصلی محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون بر دوره پر شدن دانه گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

تیمار	شاخص کلروفیل	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	هدایت روزنه‌ای برگ (میلی‌مول بر مترمربع ثانیه)	حداکثر وزن دانه (گرم)	سرعت پر شدن دانه (گرم در روز)	دوره مؤثر پر شدن دانه (روز)	تعداد دانه در طبق	وزن هزار دانه (گرم)	عملکرد دانه (گرم در متر مربع)	معادله برازش شده
$I_1 \times N_1$	۶۱/۸۶^{cde}	۶۲/۹^{d}	۳۰/۴۳^{cd}	۰/۰۲۹۷^{de}	۰/۰۰۱۱۴^{ab}	۲۶^{de}	۵۰/۰۸^{de}	۳۰/۱۵^{de}	۸۴/۰۳۳^{cd}	Y=0.00114x-0.00782
$I_1 \times N_2$	۶۴/۸^{bcd}	۷۲/۵۶^{ab}	۳۴/۰۶^{a}	۰/۰۳۳۵^{bc}	۰/۰۰۱۱۳^{b}	۲۹/۶۷^{ab}	۵۳/۸۷^{bcd}	۳۴/۷۸^{ab}	۸۷/۴^{bc}	Y=0.00113x-0.00719
$I_1 \times N_3$	۶۷/۲۳^{ab}	۷۶/۷۳^{a}	۳۱/۸۶^{abc}	۰/۰۳۵۶^{ab}	۰/۰۰۱۱۳^{b}	۳۱/۵۲^{a}	۵۶/۰۸^{abc}	۳۵/۵۷^{ab}	۹۳/۸^{a}	Y=0.00114x-0.00701
$I_1 \times N_4$	۷۰/۲^{a}	۷۵/۱^{a}	۳۳/۱^{ab}	۰/۰۳۶۷^{a}	۰/۰۰۱۱۵^{ab}	۳۱/۹۷^{a}	۵۹/۰۴^{a}	۳۶/۷۲^{a}	۹۵/۱۳۳^{a}	Y=0.00112x-0.00635
$I_2 \times N_1$	۶۱/۱^{de}	۶۱/۱۶^{d}	۲۶/۱۶^{fg}	۰/۰۳۰۷^{cde}	۰/۰۰۱۱۵^{ab}	۲۶/۴۷^{cde}	۴۹/۸۳^{de}	۲۸/۸^{de}	۷۷/۱۶۷^{ef}	Y=0.00113x-0.00852
$I_2 \times N_2$	۵۶/۶۶^{f}	۶۳/۰۳^{d}	۲۹/۵^{de}	۰/۰۳۱^{cde}	۰/۰۰۱۱۷^{ab}	۲۶/۵۶^{cde}	۴۸/۷۹^{e}	۲۷/۵۴^{e}	۸۲/۴۳۳^{cde}	Y=0.00116x-0.00839
$I_2 \times N_3$	۵۸/۷۳^{ef}	۶۹/۱^{bc}	۳۱/۲۶^{bcd}	۰/۰۳۳۴^{bc}	۰/۰۰۱۱۶^{ab}	۲۸/۷۴^{bc}	۵۰/۸۳^{de}	۳۱/۱۱^{cd}	۸۳/۷۳۳^{cd}	Y=0.00115x-0.00776
$I_2 \times N_4$	۶۵/۶۳^{bc}	۷۱/۱۶^{ab}	۳۲/۴۶^{abc}	۰/۰۳۳۶^{abc}	۰/۰۰۱۱۳^{ab}	۲۹/۶۸^{ab}	۵۷/۴۱^{ab}	۳۳/۷۳^{bc}	۹۱/۴^{ab}	Y=0.00113x-0.00716
$I_3 \times N_1$	۵۱/۸۳^{g}	۵۲/۰۶^{e}	۲۴/۹^{g}	۰/۰۲۵۱^{f}	۰/۰۰۱۰۷^{c}	۲۳/۴۵^{f}	۴۰/۷^{f}	۲۳/۹۹^{f}	۶۶/۱۶۷^{g}	Y=0.00107x-0.00816
$I_3 \times N_2$	۵۹/۹۳^{ef}	۶۳/۹۳^{cd}	۲۹/۱۳^{de}	۰/۰۳۲۱^{cd}	۰/۰۰۱۱۷^{a}	۲۷/۳۵^{bcd}	۴۸/۴۹^{e}	۲۹/۸^{de}	۸۱/۱۶۷^{de}	Y=0.00117x-0.00914
$I_3 \times N_3$	۶۱/۴^{cde}	۵۸/۵۶^{d}	۳۰/۵۶^{cd}	۰/۰۲۷۹^{ef}	۰/۰۰۱۱۳^{b}	۲۴/۷۲^{ef}	۵۱/۵۸^{cde}	۲۸/۵۴^{de}	۷۳/۰۳۳^{f}	Y=0.00113x-0.00833
$I_3 \times N_4$	۶۰/۷^{def}	۵۸/۲۳^{d}	۲۷/۹۳^{ef}	۰/۰۲۹۴^{de}	۰/۰۰۱۱۴^{ab}	۲۵/۷۱^{def}	۴۷/۹۱^{e}	۲۹/۳۹^{de}	۷۹/۸۳۳^{de}	Y=0.00114x-0.0079
LSD	۴/۴۱۷	۵/۷۹۱	۲/۲۳۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۰۴۲۶	۲/۵۱۹	۴/۶۵۱	۲/۸۹۴	۶/۱۹۳	-

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی، آبیاری تکمیلی در گلدهی و عدم آبیاری یا کشت دیم

N_1، N_2، N_3 و N_4 به‌ترتیب محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۱ گرم در لیتر نانواکسید آهن، محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول‌پاشی توام ۰/۵ گرم درلیتر نانواکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم درلیتر نانوسیلیکون.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

برخی محققان اظهار داشتند در شرایط تنش، اختلال در جذب برخی عناصر ضروری مؤثر در سنتز کلروفیل نظیر آهن و منیزیم، با کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، تخریب ساختار کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، فتواکسیداسیون کلروفیل‌ها، تخریب پیش ماده‌های سنتز کلروفیل و جلوگیری از بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و فعال شدن آنزیم‌های تجزیه کننده کلروفیل از جمله کلروفیلاز، منجر به کاهش کارایی عملکرد کوانتومی می‌شود (Neocleous and Vasilakakis, 2007).

جدول ۶: مقایسه میانگین اثر اصلی نانوذرات و سطوح آبیاری بر هدایت الکتریکی برگ، عملکرد کوانتومی، طول دوره پر شدن دانه و ارتفاع بوته گلرنگ

تیمارهای آزمایشی	سطوح تیمارها	هدایت الکتریکی برگ (میکروزیمنس بر مترمربع)	عملکرد کوانتومی برگ	دوره پر شدن دانه (روز)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)
محلول‌پاشی نانوذرات (آهن و سیلیکون)	N_1	۸۵/۲۵^{a}	۰/۵۰۱^{c}	۳۲/۵۴^{b}	۷۸/۲۵^{c}
	N_2	۷۷/۵۸^{b}	۰/۶۰۲^{b}	۳۴/۸۵^{a}	۸۲/۸۴^{b}
	N_3	۷۵/۶۹^{b}	۰/۶۲۵^{b}	۳۴/۵۹^{a}	۸۴/۴۶^{ab}
	N_4	۷۱/۵۵^{c}	۰/۶۷۹^{a}	۳۵/۴^{a}	۸۷/۳۸^{a}
LSD		۴/۲۰۷	۰/۰۴۴۷	۱/۵۵۵	۳/۶۸۵
سطوح آبیاری	I_1	۷۱/۰۷^{c}	۰/۶۸۵^{a}	۳۵/۶۷^{a}	۸۹/۶۶^{a}
	I_2	۷۵/۴۸^{b}	۰/۵۸^{b}	۳۴/۷۷^{a}	۸۳/۷۴^{b}
	I_3	۸۶/۲۱^{a}	۰/۵۴^{c}	۳۲/۵۹^{b}	۷۶/۳^{c}
LSD		۳/۶۴۳	۰/۰۳۸۷	۱/۳۴۶	۳/۱۹۳

I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی، آبیاری تکمیلی در گلدهی و عدم آبیاری یا کشت دیم

N_1، N_2، N_3 و N_4 به‌ترتیب محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی ۱ گرم در لیتر نانواکسید آهن، محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول‌پاشی توام ۰/۵ گرم درلیتر نانواکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم درلیتر نانوسیلیکون.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

محتوای نسبی آب برگ

محلول‌پاشی نانواکسیدآهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی با دارا بودن بالاترین محتوای نسبی آب (۷۶/۷۳ درصد)، از افزایش ۴۷/۳۸ درصدی نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد سیلیکون از طریق بهبود هدایت هیدرولیکی ریشه و رسوب در سطح خارجی سلول‌های اپیدرم برگ، موجب کاهش اتلاف آب از روزنه‌ها و متعاقباً افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (Liu *et al.*, 2015). به بیانی دیگر اگرچه افزایش دما، طول ساعات آفتابی و کاهش نزولات در طول دوره رشدی می‌تواند از دلایل اصلی کاهش محتوای نسبی آب برگ باشد، اما گزارش شده است که در شرایط تنش، انتقال سیلیکون به اپیدرم برگ‌ها، موجب کاهش قطر روزنه‌ها و تنگ‌تر شدن آن‌ها می‌شود این حالت کارایی روزنه‌ها را افزایش داده و موجب اتلاف کم‌تر آب یا بهبود محتوای نسبی آب گیاه می‌شود (جدول ۲) (هادی و همکاران ۱۳۹۵). به بیانی دیگر محلول‌پاشی نانوسیلیکون با افزایش غلظت سیلیکون داخل سلول، رسوب در اپیدرم سلول‌ها و همچنین در بخش بالایی کوتیکول برگ و تشکیل لایه

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

دوگانه کوتیکول-سیلیس و در نتیجه افزایش ضخامت لایه کوتیکول و موم آن، با کمک به حفظ ساختار سلولی و کاهش نشت مواد، موجب افزایش کارایی روزنه‌ها و بهبود محتوای نسبی آب می‌شود (Avestan *et al*., 2019). نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان مبنی بر افزایش محتوای نسبی آب برگ لوبیا (Sarah *et al*., 2021) و باقلا (Qados and Moftah., 2015) به‌واسطه محلول‌پاشی با سیلیکون گزارش شده است.

هدایت روزنه‌ای برگ

بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای برگ (۳۴/۰۶ mmol $H_20.m^{-2}.s^{-1}$) در محلول‌پاشی نانوسیلیکون و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی مشاهده شد که از افزایش ۳۶/۷۸ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد بالا بودن دما، کمی نزولات در شرایط دیم با کاهش محتوای نسبی آب برگ‌ها، موجب کاهش هدایت روزنه‌ای شده است (جدول‌های ۲ و ۵). بخشی از افزایش هدایت روزنه‌ای به‌واسطه محلول‌پاشی با نانوسیلیکون را می‌توان به بهبود محتوای نسبی آب برگ (جدول ۵) نسبت داد، در این راستا بیان شده است که نانوسیلیکون با افزایش جذب آب و بهبود محتوای نسبی آب برگ، و همچنین با رسوب در سلول‌های نگهبان روزنه، موجب افزایش سختی دیواره و باز ماندن روزنه می‌شود، و در چنین شرایط با بهبود سرعت باز و بسته شدن روزنه‌ها، موجب افزایش هدایت روزنه‌ای می‌شود (Zarooshan *et al*., 2020). نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز بهبود هدایت روزنه‌ای برگ تریتیکاله به‌واسطه محلول‌پاشی با نانوسیلیکون را به بهبود ساختار غشاء، محتوای نسبی آب و عملکرد کوانتومی نسبت دادند که با یافته‌های این پژوهش هم‌خوانی دارد. هادی و همکاران (۱۳۹۵) اظهار داشتند که در شرایط تنش، انتقال سیلیکون به اپیدرم برگ‌ها، موجب کاهش قطر روزنه‌ها و تنگ‌تر شدن آن‌ها می‌شود و این حالت کارایی روزنه‌ها را افزایش داده و موجب اتلاف کم‌تر آب و بهبود هدایت روزنه‌ایی گیاه می‌شود.

هدایت الکتریکی برگ

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که عدم محلول‌پاشی نانوذرات و کشت دیم به‌ترتیب موجب افزایش ۱۹/۱۴ و ۲۱/۳ درصدی هدایت الکتریکی برگ نسبت به محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی شد (جدول ۶). محدودیت آبی ناشی از شرایط دیم موجب می‌شود به‌دلیل کاهش هدایت روزنه‌ایی و بسته‌شدن روزنه‌ها، تثبیت دی‌اکسید کربن کاهش یابد در حالی‌که انتقال الکترون و واکنش‌های نوری ادامه پیدا می‌کنند (جدول ۵). تحت چنین شرایطی $NADP^+$ کمی جهت پذیرش راحت الکترون یافت می‌شود و اکسیژن به‌عنوان گیرنده الکترون عمل می‌کند و موجب ساخته‌شدن گونه‌های فعال اکسیژن مانند رادیکال‌های پراکسید، سوپراکسید و رادیکال هیدروکسید می‌شود. افزایش گونه‌های فعال اکسیژن موجب خسارت اکسیداتیو در بسیاری از اجزای سلولی مانند پروتئین‌ها، لیپیدها و

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

کربوهیدرات‌ها می‌شود و در نهایت منجر به افزایش نشت الکترولیت و تخریب غشای سلولی می‌گردد (Jiang and Huang, 2001). کاربرد آهن از طریق افزایش فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان در تعدیل رادیکال‌های آزاد و اثرات تخریبی آن‌ها در سیستم‌های غشایی نقش به‌سزایی ایفا می‌کند (Zago and Oteiza, 2001). شاید به‌همین دلیل است که محلول‌پاشی آهن تحت چنین شرایطی موجب کاهش نشت الکترولیت و هدایت الکتریکی برگ می‌شود. از طرفی سیلیکون به‌دلیل نقش استحکام و پایداری که در گیاه دارد میزان نشت الکترولیت را در گیاه کاهش می‌دهد (Liang *et al.*, 2007). بخش دیگری از کاهش هدایت الکتریکی به‌واسطه محلول‌پاشی نانواکسید آهن و نانوسیلیکون را می‌توان به بهبود عملکرد کوانتومی و افزایش محتوای نسبی آب برگ نسبت داد، که در این راستا نظری و همکاران (۱۴۰۰) بیان کردند که محلول‌پاشی نانوسیلیکون از طریق بهبود محتوای نسبی آب و عملکرد کوانتومی، موجب کاهش آسیب به غشاء و در نهایت کاهش هدایت الکتریکی برگ تریتیکاله شد (جدول ۵).

مؤلفه‌های پر شدن دانه

بررسی روند تغییرات پر شدن دانه نشان داد که ابتدا وزن دانه به‌صورت خطی افزایش یافته و به حداکثر خود رسید (رسیدگی وزنی)، پس از این مرحله وزن دانه از تغییرات چندانی برخوردار نبوده و به‌صورت یک خط افقی در آمد (شکل ۱). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی توأم نانو ذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی موجب افزایش حداکثر وزن دانه (۴۶/۲۱ درصد)، سرعت پر شدن دانه (۰/۰۰۱۱۷ گرم در روز) و دوره مؤثر پر شدن دانه (۳۶/۳۳ درصد) در مقایسه با عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم شد (جدول ۵). طول دوره پر شدن دانه در کاربرد توأم نانوذرات آهن و سیلیکون (۸/۷۸ درصد) و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی (۹/۴۵ درصد) نسبت به تیمارهای عدم محلول‌پاشی نانوذرات و شرایط دیم افزایش داشت (جدول ۶). از آنجایی‌که وزن دانه به مقدار زیادی وابسته به دوره پر شدن دانه است، بنابراین محدودیت آبی که موجب کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه می‌شود، به‌طور معنی‌داری وزن دانه و مؤلفه‌های پر شدن دانه را کاهش می‌دهد (احمدی نورالدین و همکاران، ۱۴۰۰). به نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی تعادل تغذیه‌ای گیاه برهم می‌خورد در چنین شرایطی با محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی، به سهولت می‌توان این مواد را در دسترس گیاه قرار داد و انجام فرآیند فتوسنتز و کارآیی آن را افزایش و به‌واسطه‌ی افزایش طول دوره پر شدن دانه‌ها، میزان انتقال مواد به سمت دانه‌ها را بهبود بخشید (بابایی و همکاران، ۱۳۹۶). بخش دیگری از بهبود مؤلفه‌های پر شدن دانه در کاربرد نانواکسید آهن و سیلیکون می‌تواند ناشی از تأثیر این عناصر در افزایش شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ایی باشد (جدول ۵). در این راستا داداش‌زاده و سیدشریفی (۱۳۹۷) در جو اظهار داشتند که نانواکسید آهن به‌دلیل نقشی که در ساختار کلروفیل و انتقال الکترون در فتوسنتز دارد، با افزایش سطح سبز و دوام آن

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

در گیاه، موجب تولید مواد فتوسنتزی بیش‌تر و افزایش اجزای پر شدن دانه در شرایط محدودیت آبی می‌شود.

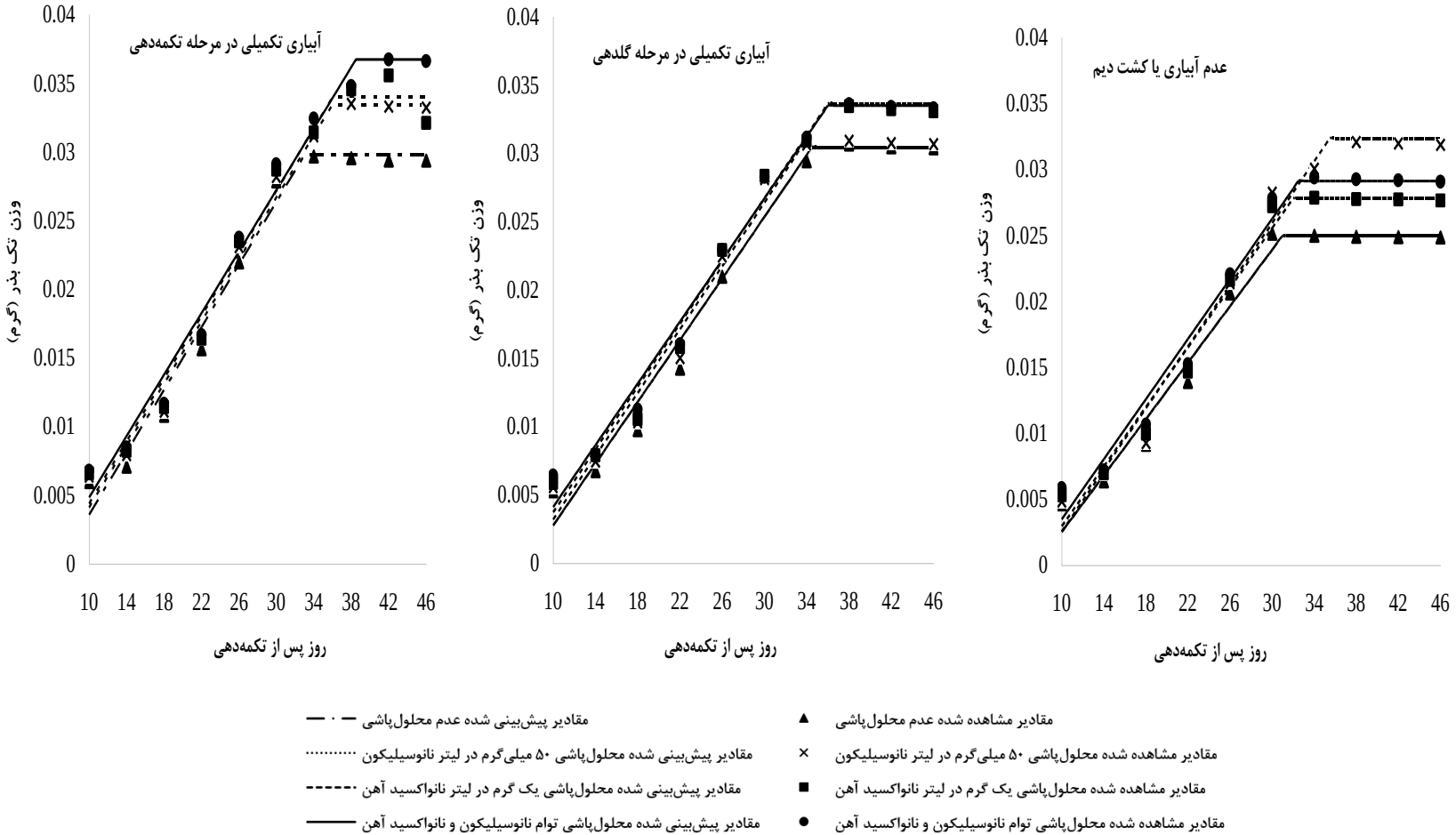
ارتفاع بوته

مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیش‌ترین ارتفاع بوته در محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون (۸۷/۳۸ سانتی‌متر) و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی (۸۹/۶۶ سانتی‌متر) به‌دست آمد که به‌ترتیب از افزایش ۱۱/۶۶ و ۱۷/۵ درصدی این صفت نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات و کشت دیم برخوردار بود (جدول ۶). کاهش فشار آماس سلولی و رشد سلول از حساس‌ترین فرآیندهای فیزیولوژیک به محدودیت آبی است. فرآیند رشد در نتیجه تقسیم سلول‌های مریستمی و به‌دنبال آن بزرگ شدن سلول‌های جوان اتفاق می‌افتد. خشکی در اثر اختلال در جریان آب از آوندهای چوب به سلول‌های در حال رشد، می‌تواند طویل شدن سلول‌های گیاهان عالی را متوقف کرده و منجر به کاهش رشد و ارتفاع بوته شود (Anjum *et al*., 2011). بخشی از افزایش ارتفاع بوته به‌واسطه محلول‌پاشی نانواکسیدآهن را می‌توان به بهبود شاخص کلروفیل و افزایش تولیدات فتوسنتزی نسبت داد که موجب افزایش ارتفاع بوته می‌شود (جدول ۵) (داداش‌زاده و سیدشریفی، ۱۳۹۷). نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش تولید مواد فتوسنتزی و ارتفاع بوته کدو در محلول‌پاشی سیلیکون توسط دیگر محققان گزارش شده است (Salim *et al*., 2021).

تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه

مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیش‌ترین تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه (به‌ترتیب ۵۹/۰۴ عدد و ۳۶/۷۲ گرم) در محلول‌پاشی نانو ذرات آهن و سیلیکون و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی مشاهده شد که از افزایش به‌ترتیب ۴۵/۰۶ و ۵۳/۰۶ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). به نظر می‌رسد افزایش دمای هوا و کاهش نزولات در طول دوره رشد زایشی در شرایط دیم، با اثر منفی که بر گرده‌افشانی، عقیم شدن دانه‌های گرده و اختلال در فتوسنتز جاری و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها دارد و موجب کاهش تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه می‌شود(جدول ۲) (امیری ده احمدی و همکاران، ۱۳۸۹). بخش دیگری از کاهش تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه در شرایط دیم می‌تواند به اثر محدودیت آبی بر کاهش شاخص کلروفیل و اجزای پرشدن دانه نسبت داده شود (جدول ۵). در این راستا سیدشریفی و همکاران (۱۴۰۰) نیز کاهش وزن هزار دانه و تعداد دانه طبق در شرایط محدودیت ملایم و شدید آبی در طول فاز زایشی در گیاه گلرنگ را، به کاهش محتوای کلروفیل، سرعت و طول دوره پر شدن دانه نسبت دادند. کاربرد نانواکسید آهن و سیلیکون موجب بهبود تعداد دانه در طبق و وزن هزاردانه در هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی و گل‌دهی شد (جدول ۵).

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]



شکل ۱: اثر محلول‌پاشی نانوذرات آهن و سیلیکون بر روند پر شدن دانه گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

بخشی از افزایش این صفات بواسطه کاربرد نانوذرات می‌تواند ناشی از افزایش محتوای نسبی آب تحت چنین شرایطی باشد (جدول ۵) که ضمن افزایش شاخص کلروفیل و هدایت روزنه‌ایی، منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی و طول دوره پرشدن دانه می‌شود و با انتقال بیشتر مواد فتوسنتزی به اندام زایشی ، موجب افزایش تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه شود (جدول‌های ۵ و ۶) (Epstein and Bloom, 2005). در این راستا داداش‌زاده و سید شریفی (۱۳۹۷) بیان کردند که محلول‌پاشی نانواکسید آهن در شرایط خشکی با بهبود محتوای کلروفیل، سرعت و طول دوره پر شدن دانه، موجب افزایش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه جو شد.

عملکرد دانه

بیش‌ترین عملکرد دانه (۹۵/۱۳۳ گرم در مترمربع) در محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی مشاهده شد که از افزایش ۴۳/۷۷ درصدی نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). بخشی از کاهش عملکرد در شرایط دیم می‌تواند ناشی از اثر افزایش دما و کاهش نزولات بر کوتاهی طول دوره پر شدن دانه باشد زیرا زمانی‌که گیاه در مرحله پر شدن دانه با محدودیت آبی مواجه است، به دلیل فرار از چنین شرایطی طول دوره پر شدن دانه را کاهش داده و همین امر منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود(جدول-های ۲ و ۵). به بیانی دیگر هرقدر محدودیت آبی افزایش یابد، به‌دلیل فرصت کم‌تر گیاه برای انتقال مواد فتوسنتزی به سمت بخش اقتصادی، عملکرد دانه کاهش می‌یابد (Karmolachab *et al*., 2014). در چنین شرایطی حضور و تجمع سیلیکون موجب می‌شود تا گیاه بتواند آب از طریق تبخیر به حداقل رسانده و در عوض میزان آب بیش‌تری را به تعرق اختصاص دهد در چنین شرایطی در کنار افزایش میزان تولید به‌دلیل فراهمی بیش‌تر دی اکسیدکربن، مقادیر جذب عناصر غذایی از خاک نیز بیش‌تر شده و همین عوامل می‌تواند از دلایل افزایش عملکرد گیاهان به کاربرد منابع خارجی سیلیکون باشد (هادی و همکاران ۱۳۹۵). همچنین کاربرد سیلیکون به‌همراه محلول‌پاشی با عناصر ریزمغذی همانند آهن با کمک به بهبود شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب و عملکرد کوانتومی و بهبود صفات مورفوفیزیولوژیکی می‌تواند منجر به افزایش عملکرد دانه شود (جدول‌های ۵ و ۶) (Muhammad *et al* .,2022). نتایج مشابهی نیز توسط نظری و همکاران (۱۴۰۰) گزارش شده است، مبنی براینکه محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط محدودیت آبی از طریق افزایش محتوای نسبی آب، شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی برگ، ضمن بهبود فرآیندهای فتوسنتزی گیاه، موجب افزایش عملکرد دانه تریتیکاله شد.

نتیجه‌گیری

محلول‌پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی از بیش‌ترین شاخص

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

کلروفیل، محتوای نسبی آب و هدایت روزنه‌ای برگ برخوردار بود، که این ترکیب تیماری ضمن افزایش تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه، موجب افزایش ۴۳/۷۷ درصدی عملکرد دانه نسبت به عدم محلول‌پاشی نانوذرات در شرایط دیم شد. به‌نظر می‌رسد کاربرد نانوذرات و انجام آبیاری تکمیلی می‌تواند با بهبود مؤلفه‌های پر شدن دانه و دیگر صفات فیزیولوژیک، عملکرد دانه گلرنگ تحت شرایط دیم را افزایش دهد.

منابع

احمدی نوالدین‌وند، ف.، سیدشریفی، ر.، سیادت، س.، خلیل‌زاده، ر. ۱۴۰۰. اثر غلظت‌های نانوسیلیکون و کودهای زیستی بر عملکرد و دوره پر شدن دانه گندم در رژیم‌های مختلف آبیاری. پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۹(۱): ۹۱-۱۰۵.

امیری ده احمدی، م.، پارسا، ر.، گنجعلی، ع. ۱۳۸۹. تأثیر تنش خشکی در مراحل مختلف فنولوژی بر خصوصیات مورفولوژیک و اجزای عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L.) در شرایط گلخانه. پژوهش های زراعی ایران. ۸ (۱): ۱۶۶-۱۵۷.

بابایی، خ.، سید شریفی، ر. و پیرزاد، ع.ر. ۱۳۹۶ .تأثیر کاربرد کودهای بیولوژیک و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و روی بر محتوای کلروفیل، پر شدن دانه و عملکرد گندم در شرایط محدودیت آبی. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی. ۹ (۳۱) :۶۷-۸۵

تدین، م.ر. و امام، ی. ۱۳۸۵. اثر آبیاری تکمیلی و نیتروژن بر میانگین وزن دانه، وزن حجمی و عملکرد دانه گندم در شرایط دیم. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۳۹ (۱): ۱۱۲-۹۹.

داداش‌زاده، س.، سیدشریفی، ر. ۱۳۹۷. برهمکنش قطع آبیاری، کودهای زیستی و محلول‌پاشی آهن بر عملکرد و برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی جو. فیزیولوژی گیاهان زراعی. ۹(۳۶): ۲۵-۵.

سیدشریفی، ر.، سیدشریفی، ر. ۱۳۹۸. تاثیر قطع آبیاری و کاربرد میکوریز و نانواکسید آهن و روی بر عملکرد، سرعت و طول دوره پر شدن دانه گلرنگ. اکوفیزیولوژی گیاهی. ۱۱ (۳۶): ۱۶۴-۱۵۲.

عبادی، ن.، سیدشریفی، ر.، نریمانی، ح. و خلیل‌زاده، ر. ۱۴۰۰. تاثیر آبیاری تکمیلی و کاربرد میکوریزا و ازتوباکتر بر اجزای پر شدن دانه جو دیم (*Hurdeum vulgare* L.). فیزیولوژی محیطی گیاهی. ۱۶(۶۱): ۶۴-۷۹.

نریمانی، ح.، سیدشریفی، ر.، خلیل‌زاده، ر.، امین‌زاده، غ. ۱۳۹۸. تاثیر آبیاری تکمیلی و نانواکسید آهن بر محتوای کلروفیل و مؤلفه‌های پر شدن دانه گندم (*Triticunm aestivum* L.) تحت شرایط دیم. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۲(۳): ۷۳۵-۷۴۶.

نظری، ژ.، سیدشریفی، ر. و نریمانی، ح. ۱۴۰۰. اثر مایکوریزا، ورمی‌کمپوست و نانوسیلیکون بر صفات زراعی و فیزیولوژیکی تریتیکاله تحت شدت‌های مختلف تنش خشکی. تولید گیاهان زراعی. ۱۴(۴): ۴۶-۲۱.

هادی، ه.، سیدشریفی، ر. و نامور، ع. ۱۳۹۵. محافظ‌های گیاهی و تنش‌های غیر زیستی. انتشارات دانشگاه ارومیه. ۲۸۲ صفحه.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

Al-Aghabary, K., Zhu, Z. and Shi, Q. 2005. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and anti-oxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. Journal Plant Nutrition, 27: 2101-2115.

Anjum, S.A., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M.F., Man, C. and Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal of Agricultural Research. 6: 9. 2026-2032.

Avestan S, Ghasemnezhad, M., Esfahani, M. and Byrt, C.S. 2019. Application of nano silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. Agronomy, 9(5), p.246.

Balakrishnan, K., Rajendran, C. and Kulandaivelu, G. 2000. Differential responses of iron, magnesium, and zinc deficiency on pigment composition, nutrient content, and photosynthetic activity in tropical fruit crops. Photosynthetica 38: 477-479.

Debaeke, P. and Abdellah, A. 2004. Adaptation of crop management to waterlimited environments. European Journal of Agronomy. 21: 433-446.

Ellis, R.H. and Pieta-Filho, C. 1992. The development of seed quality spring and winter cultivars of barley and wheat, Seed Science Research, 2, 19-25.

Epstein, E. and Bloom, A. 2005. Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. 2nd ed. Sinecure Associates, Sunderland, Mass: Sinauer Associates, Inc.

El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Soliman, S.M., Salem, H.M., Desoky, E-SM., Babalghith, A.O., El-Tahan, A.M., Ibrahim, O.M., Ebrahim, A.A.M, Abd El-Mageed, T.A., Elrys, A.S., Elbadawi, A.A., El-Tarabily, K.A. and AbuQamar, S.F .2022. Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. Front of Plant Science. 13:1-31.

Etesami, H. and Jeong, B.R. 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. Ecotoxicology and Environmental Safely. 147:881-896.

Gong, H.J., Chen, K.M., Chen, G., Wang, S. and Zhang, C. L. 2003. Effects of silicon on growth of wheat under drought. Journal of Plant Nutrition 26 (5): 1055-1063

Hochmuth, G. 2011. Iron (Fe) Nutrition of Plants. University of Florida If as Extension. Sl 353. P: 1-8.

Jiang, Y. and Huang, N. 2001. Drought and heat stress injury to two cool season turf grasses in relation to antioxidant metabolism and lipid peroxidation. Crop Science 41: 436-442.

Karmolachab, A., Bakhshandeh, A. M., Gharineh, M. H., Moradi-Talavat, M. R. and Fathi, Gh. 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.

Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M. and Barmaki, M. 2016. Effect of zinc and bio fertilizers on antioxidant enzymes activity, chlorophyll content, soluble sugars and proline in *Triticale* under salinity condition. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 44 (1): 116-124.

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. and Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants- a review. Environmental Pollution 147: 422-428.

Liu, B., Soundararajan, P. and Manivannan, A. 2019. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. Plants 8: 307.

Liu, P., Yin, L., Wang, S., Zhang, M., Deng, X., Zhang, S. and Tanaka, K. 2015. Enhanced root hydraulic conductance by aqua Orin regulation accounts for silicon alleviated salt induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. Environmental and Experimental Botany 111: 42 -51.

Monica, R.C. and Cremonini, R. 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia. International Journal of Cytology, Cytosystematics and Cytogenetics, 62(2), 161-165.

Muhammad, A., Zahoor, A., Muhammad Imran, J. and Fahim, N. 2022. Foliar spray of silicon confers drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by enhancing morpho-physiological and antioxidant potential .Silicon. 14(2): 1-15.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]

Neocleous, D. and Vasilakakis, M. 2007. Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. "Autumn Bliss"). Scientia Horticulturae 112: 282-289.

Nogales-Delgado, S., Encinar, J.M. and González, J.F. 2019. Safflower Biodiesel: Improvement of its Oxidative Stability by Using BHA and TBHQ. Energies 12, 1940.

Passioura, J. 2007. The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. Journal of Experimental Botany 58(2): 113-117.

Prasad, T.N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T.S. and Sajanlal, P.R. 2012. Effect of nanoscale zinc-oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition 35: 905-927.

Qados, A. and Moftah, A.E. 2015. Influence of silicon and nano-silicon on germination, growth and yield of *faba bean* (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. American Journal of Experimental Agriculture 5: 509-524.

Rahbarian, R., Khavari-Nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri, A. and Najafi, F. 2011. Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica 53(1):47-56.

Ronanini, D., Savin, R. and Hal, A. J. 2004. Dynamic of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief interval of high temperature during grain filling, Field Crop Research 83: 79-90.

Salim, B.B.M., El-Yazied, A.A., Salama, Y.A.M., Raza, A. and Osman, H.S. 2021. Impact of silicon foliar application in enhancing antioxidants, growth, flowering and yield of squash plants under deficit irrigation condition. Annals of Agricultural Sciences 66(2): 176-183.

Sarah, M.S., Prado, R.D., Júnior, J.P.D., Texeira, G.C., Duarte, J.C.D. and Medeiros, R.L. 2021. Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. Scientific Reports 11: 190-196.

Schutz, M., and Fangmeir, E. 2001. Growth and yield responses of spring wheat to elevated CO_2 and water limitation. Environmental Pollution 114: 187-194.

Simova-Stoilova, L., Demirevska, K., Petrova, T., Tsenov, N. and Feller, U. 2008. Antioxidative protection in wheat varieties under severe recoverable drought at seedling stage. Plant Soil Environment, 54: 529-536.

Tambussi, E.A., Nogués, S. and Araus, J.L. 2005. Ear of durum wheat under water stress: water relations and photosynthetic metabolism. Planta 221:446–458.

Taheri, G., Ajam Norozi, H. and Namni, M. 2000. Study of time and type of micronutrient on phenology, yield and yield components of soybean as the second crop in Golestan province. Plant Ecophysiology 2: 56-46.

Zago, M.P. and Oteiza, P.I. 2001. The antioxidant properties of zinc: Interactions with iron and antioxidants. Free Radical Biology and Medicine 31: 266-274.

Zarooshan, M., Abdilzadeh, A., Sadeghipour, H. R. and Mehrabanjoubani, P. 2020. Comparison of the effect of silicon and nano-silicon on some biochemical and photosynthetic traits of *Zea mays* L. under salinity stress. Journal of Plant Environmental Physiology 15(57): 23-38.

Zayed, B.A., Salem, A.K. and El-Sharkawy, H. 2011. Effect of different micronutrient treatments on rice (*Oryza sativa* L.) growth and yield under saline soil conditions. World Journal of Agricultural Sciences 7: 179-184.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-10-30]