

اثر محلول پاشی 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 پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲

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 محلول پاشی نانوذرات (آهن و سیلیکون) بر عملکرد، مؤلفه‌های پر شدن 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 ۱۴۰۰-۰۱ 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 محلول پاشی نانوذرات (محلول پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول پاشی یک گرم در لیتر نانوآکسید آهن، محلول پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون، محلول پاشی هم‌زمان ۰/۵ گرم در لیتر نانوآکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون) شامل می‌شدند. نتایج نشان داد که محلول پاشی 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 محلول پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم افزایش داد. بر اساس نتایج این بررسی، به‌نظر می‌رسد محلول پاشی 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 پر شدن 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.

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 کارایی 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 به دلیل محدودیت آبی، پایین است. آهن از عناصر ریز مغذی ضروری است که کاربرد آن به‌صورت محلول پاشی 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 محلول پاشی نانو اکسید 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 نانو اکسید آهن و روی در شرایط محدودیت شدید و ملایم آبی (قطع آبیاری در مراحل تکمه‌دهی و گل‌دهی)، توانست با بهبود محتوای کلروفیل و مؤلفه‌های پر شدن دانه، موجب افزایش عملکرد دانه گلرنگ شود.

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

ذرات را توجیه نماید (El-Saadony *et al.*, 2022; Monica and Cremonini., 2009). از این رو محلول پاشی نانوسیلیکون یکی از راه کارهای مؤثر در بهبود عملکرد گیاهان زراعی تحت شرایط تنش، حفظ آب در بافت های 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، فعال سازی سیستم های آنتی اکسیدانی، افزایش میزان متابولیت های ثانویه مربوط به مقاومت به تنش، و تنظیم بیان ژن های درگیر در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی مؤثر است (Liu *et al.*, 2019). گزارش شده است که محلول پاشی نانوسیلیکون در شرایط خشکی با بهبود محتوای نسبی آب، شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی، موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (نظری و همکاران، ۱۴۰۰).

گسترده گی 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 بررسی های محدود انجام شده در این راستا، از جمله مواردی بودند که موجب شد تا اثر این عوامل بر عملکرد، مؤلفه های پرشدن دانه و برخی صفات فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آلاروق اردبیل در سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ اجرا شد. محل اجرای آزمایش با مختصات جغرافیایی ۴۸° و ۲۰' طول شرقی و ۳۸° و ۱۵' عرض شمالی، دارای اقلیم نیمه خشک و سرد با ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا بود. خاک منطقه آزمایشی جزء خاک های لوم رسی بوده که pH آن حدود ۷/۷ و عمق خاک نیز حدود ۷۰ سانتی متر 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	هدایت الکتریکی (دسی-زیمنس بر متر)	آهک	کربن آلی	نیترژن	
مقدار	درصد	میلی گرم بر کیلوگرم	pH	میلی گرم بر کیلوگرم	میلی گرم بر کیلوگرم	درصد	درصد	درصد	درصد	
	۳۱	۳۰	۳۹	۷/۷۶	۱۲/۲	۴۹۵	۱/۵۴	۵	۰/۱۸۵	۰/۰۸

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

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

فاکتورهای مورد بررسی شامل سطوح آبیاری (عدم آبیاری یا کشت دیم، آبیاری تکمیلی در ۵۰ درصد مراحل تکمیدهی و گل‌دهی به ترتیب معادل با کد ۵۵ و ۶۵ مقیاس BBCH) و محلول پاشی نانوذرات (محلول پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول پاشی یک گرم در لیتر نانو اکسید آهن، محلول پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون، محلول پاشی هم‌زمان ۰/۵ گرم در لیتر نانو اکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانو سیلیکون) بودند. محلول پاشی نانوذرات به‌وسیله سم‌پاش دستی دو لیتری در دو مرحله از رشد ساقه گلرنگ معادل با کد ۳۱ و ۳۹ بر اساس مقیاس^۱ BBCH انجام شد. برای حل بهتر، ابتدا نانو اکسید آهن و سیلیکون در آب دی‌یونیزه قرار داده شدند و با استفاده از لرزش و ارتعاشات دستگاه اولتراسونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه) این مواد پخش شده و محلول گردید (Prasad et al., 2012). نانو سیلیکون (SiO₂-Nano) محصول شرکت Nanomaterial US Research بود که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان و نانو اکسید آهن از تجهیزات آزمایشگاهی و شیمیایی جهان کیمیای ارومیه تهیه شد. مشخصات آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات نانو اکسید آهن و نانو سیلیکون

نوع نانوذرات	وزن (گرم)	خلوص (درصد)	میانگین اندازه ذرات (نانومتر)	سطح ویژه ذرات	رنگ
نانو اکسید آهن	۱	۹۹	<۳۰	۳۰ (میلی لیتر بر گرم) >	پودری قرمز
نانو سیلیکون	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 صفا 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، درستی 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 - Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry; BBCH

² - Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry; BBCH

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 5 ± 70 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. سپس محتوای نسبی آب با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Tambussi *et al.*, 2005):

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

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.

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

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

است، وزن دانه تا رسیدن به حداکثر مقادیر خود در زمان t_0 که در حقیقت زمان رسیدگی وزنی است، به صورت 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) به دست آمده و سپس مقدار عددی t_0 در قسمت دوم رابطه قرار داده شد و GW که وزن دانه است محاسبه شد. دوره مؤثر پر شدن دانه از تقسیم حداکثر وزن دانه به شیب خط (سرعت پر شدن 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 محلول پاشی 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 محلول پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمدهی، از بیش‌ترین شاخص کلروفیل (۷۰/۲) و از افزایش ۳۵/۴۴ درصدی نسبت به شرایط عدم محلول پاشی 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، به دلیل 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 محلول پاشی نانو اکسید آهن به دلیل نقش این عنصر در سنتز اجزای کلروپلاست به‌ویژه

پروتئین‌های انتقال الکترون، فعال‌سازی مسیر بیوسنتز کلروفیل و برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوکاتایون 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 بیوفسففات 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 اکسید آهن 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 D₁ 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 CO₂ می‌گردد (جدول‌های ۲ و ۵). در چنین وضعیتی مصرف نشدن محصولات حاصل از زنجیره انتقال الکترون (ATP و NADPH)، 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 نانو اکسید 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 تربیت‌کاله شد. نظری و همکاران (۱۴۰۰) نیز افزایش عملکرد کوانتومی تربیت‌کاله به‌واسطه محلول‌پاشی با نانوسیلیکون را، به افزایش محتوای نسبی آب، بهبود هدایت روزنه‌ای و شاخص کلروفیل نسبت دادند.

جدول ۴: تجزیه واریانس اثر محلول پاشی 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	شاخص کلروفیل برگ	محتوای نسبی آب برگ	هدایت روزنه‌ای برگ	هدایت الکتریکی برگ	عملکرد کوانتومی برگ	حداکثر وزن دانه	سرعت پر شدن	طول دوره پر شدن دانه	دوره مؤثر پر شدن دانه	ارتفاع بوته	تعداد دانه در طبق	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	میانگین مربعات	
															تکرار	نانوذرات (N)
۲	۲۴/۰۲*	۳۴/۰۲*	۲۴۳/۶۳**	۷۳/۶۸**	۶۸۴/۵۳**	۰/۰۰۱۹**	۵/۱۶×۱۰ ^{-۰۰۱}	۰/۰۰۰۰۱۵*	۹/۲۹*	۱۲/۹**	۱۵۱/۸۸**	۳۲۳/۳**	۳۹/۷۴**	۳۳۶/۹۹**	۲	تکرار
۳	۱۸۴/۰۸**	۱۸۴/۰۸**	۵۱۹/۷۱**	۵۴/۴**	۷۲۷/۸۱**	۰/۰۰۶۶**	۲/۱۱×۱۰ ^{-۰۰۱} ns	۰/۰۰۰۰۸۵**	۲۹/۹۹**	۶۰/۷۳**	۵۳۷/۶۱**	۱۷۵/۲۷**	۱۲۴/۶۵**	۶۸۳/۷**	۳	نانوذرات (N)
۲	۸۵/۰۵**	۸۵/۰۵**	۱۹۵/۴۴**	۳۴/۹۹**	۲۹۳/۴۳**	۰/۰۰۵**	۱/۶۷×۱۰ ^{-۰۰۱} ns	۰/۰۰۰۰۳۹**	۱۴/۱۳**	۲۴/۴۵**	۱۳۱/۱۵**	۱۰۴/۷۶**	۵۰/۹۵**	۲۵۸/۶۴**	۲	آبیاری تکمیلی (I)
۶	۲۸/۱۵**	۲۸/۱۵**	۳۰/۸۷*	۶/۱۸*	۲۳/۳۴**	۰/۰۰۰۳۱**	۲/۴×۱۰ ^{-۰۰۱} ns	۰/۰۰۰۰۰۱*	۶/۲۷**	۶/۷۴*	۳۰/۱۵**	۲۳/۴۴*	۸/۹*	۳۵/۶۶*	۶	N×I
۲۲	۶/۸	۶/۸	۱۱/۶۹	۱/۷۴	۱۸/۵۲	۰/۰۰۰۲	۶/۳۳×۱۰ ^{-۰۰۱}	۰/۰۰۰۰۰۳۴	۲/۵۳	۲/۲	۱۴/۲۲	۷/۵۴	۲/۹۲	۱۳/۳۷	۲۲	خطا
	۴/۲۳	۴/۲۳	۵/۲۱	۴/۳۹	۸/۷	۵/۵۴	۴/۶۳	۵/۸۶	۲/۲	۵/۳۷	۴/۵۳	۵/۳۶	۵/۵۴	۴/۴		ضریب تغییرات (%)

* , ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیرمعنی دار.

جدول ۵: مقایسه میانگین اثر اصلی محلول پاشی 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 (میلی مول 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 ×N ₁	۶۱/۸۶ ^{cd}	۶۲/۹ ^d	۳۰/۴۳ ^{cd}	۰/۰۰۲۹ ^{de}	۰/۰۰۱۱۴ ^{ab}	۲۶ ^{de}	۵۰/۰۸ ^{de}	۳۰/۱۵ ^{de}	۸۴/۰۳۳ ^{cd}	Y=0.00114x-0.00782
I ₁ ×N ₂	۶۴/۸ ^{bcd}	۷۲/۵۶ ^{ab}	۳۴/۰۶ ^d	۰/۰۰۳۳ ^{bc}	۰/۰۰۱۱۳ ^b	۲۹/۶۷ ^{ab}	۵۳/۸۷ ^{bcd}	۳۴/۷۸ ^{ab}	۸۷/۴ ^{bc}	Y=0.00113x-0.00719
I ₁ ×N ₃	۶۷/۲۳ ^{ab}	۷۶/۷۳ ^d	۳۱/۸۶ ^{abc}	۰/۰۰۳۵ ^{ab}	۰/۰۰۱۱۳ ^b	۳۱/۵۲ ^d	۵۶/۰۸ ^{abc}	۳۵/۵۷ ^{ab}	۹۳/۸ ^d	Y=0.00114x-0.00701
I ₁ ×N ₄	۷۰/۲ ^a	۷۵/۱ ^a	۳۳/۱ ^{ab}	۰/۰۰۳۶ ^a	۰/۰۰۱۱۵ ^{ab}	۳۱/۹۷ ^a	۵۹/۰۴ ^a	۳۶/۷۳ ^a	۹۵/۱۳ ^a	Y=0.00112x-0.00635
I ₂ ×N ₁	۶۱/۱ ^{de}	۶۱/۱ ^{de}	۲۶/۱۶ ^{fg}	۰/۰۰۳۰ ^{de}	۰/۰۰۱۱۵ ^{ab}	۲۶/۴۷ ^{cde}	۴۹/۸۳ ^{de}	۲۸/۸ ^{de}	۷۷/۱۶۷ ^{ef}	Y=0.00113x-0.00852
I ₂ ×N ₂	۵۶/۶۶ ^f	۶۳/۰۳ ^d	۲۹/۵ ^{de}	۰/۰۰۳۱ ^{cde}	۰/۰۰۱۱۷ ^{ab}	۲۶/۵۶ ^{cde}	۴۸/۷۹ ^e	۲۷/۵۴ ^e	۸۲/۴۳۳ ^{cde}	Y=0.00116x-0.00839
I ₂ ×N ₃	۵۸/۷۳ ^{ef}	۶۹/۱ ^{bc}	۳۱/۲ ^{gcd}	۰/۰۰۳۳ ^{bc}	۰/۰۰۱۱۶ ^{ab}	۲۸/۷۴ ^{bc}	۵۰/۸۳ ^{de}	۳۱/۱۱ ^{cd}	۸۳/۷۳۳ ^{cd}	Y=0.00115x-0.00776
I ₂ ×N ₄	۶۵/۶۳ ^{bc}	۷۱/۱ ^{ab}	۳۲/۴ ^{abc}	۰/۰۰۳۳ ^{bc}	۰/۰۰۱۱۳ ^{ab}	۲۹/۶۸ ^{ab}	۵۷/۴۱ ^{ab}	۳۳/۷۳ ^{bc}	۹۱/۴ ^{ab}	Y=0.00113x-0.00716
I ₃ ×N ₁	۵۱/۸۳ ^g	۵۲/۰۶ ^e	۲۴/۹ ^g	۰/۰۰۲۵ ^{1f}	۰/۰۰۱۰۷ ^c	۲۳/۴۵ ^f	۴۰/۷ ^f	۲۳/۹۹ ^f	۶۶/۱۶۷ ^g	Y=0.00107x-0.00816
I ₃ ×N ₂	۵۹/۹۳ ^{ef}	۶۳/۹ ^{cd}	۲۹/۱۳ ^{de}	۰/۰۰۳۲ ^{1cd}	۰/۰۰۱۱۷ ^a	۲۷/۳۵ ^{bcd}	۴۸/۴۹ ^e	۲۹/۸ ^{de}	۸۱/۱۶۷ ^{de}	Y=0.00117x-0.00914
I ₃ ×N ₃	۶۱/۳ ^{de}	۵۸/۵ ^{de}	۳۰/۵ ^{cd}	۰/۰۰۲۷ ^{9ef}	۰/۰۰۱۱۳ ^b	۲۴/۷۲ ^{ef}	۵۱/۵۸ ^{cde}	۲۸/۵۳ ^{de}	۷۳/۰۳۳ ^f	Y=0.00113x-0.00833
I ₃ ×N ₄	۶۰/۷ ^{def}	۵۸/۲۳ ^d	۲۷/۹ ^{cd}	۰/۰۰۲۹ ^{4ef}	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	۲/۳۲۹	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۰۰۴۲۶	۲/۵۱۹	۴/۶۵۱	۲/۸۹۴	۶/۱۹۳	-

I₁, I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه دهی، آبیاری تکمیلی در گلدهی و عدم آبیاری یا کشت دیمN₁, N₂, N₃ و N₄ به ترتیب محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۱ گرم در لیتر نانو اکسید آهن، محلول پاشی ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو سیلیکون، محلول پاشی توام ۰/۵ گرم در لیتر نانو اکسید آهن و ۲۵

میلی گرم در لیتر نانو سیلیکون.

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

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

ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	دوره پر شدن دانه (روز)	عملکرد کوانتومی برگ	هدایت الکتریکی برگ (میکروزیمنس بر مترمربع)	سطوح تیمارها	تیمارهای آزمایشی
۷۸/۲۵ ^c	۳۲/۵۴ ^b	۰/۵۰۱ ^c	۸۵/۲۵ ^a	N ₁	محلول پاشی نانوذرات (آهن و سیلیکون)
۸۲/۸۴ ^b	۳۴/۸۵ ^a	۰/۶۰۳ ^b	۷۷/۵۸ ^b	N ₂	
۸۴/۴۶ ^{ab}	۳۴/۵۹ ^a	۰/۶۲۵ ^b	۷۵/۶۹ ^b	N ₃	
۸۷/۳۸ ^a	۳۵/۴ ^a	۰/۶۷۹ ^a	۷۱/۵۵ ^c	N ₄	
۳/۶۸۵	۱/۵۵۵	۰/۰۴۴۷	۴/۲۰۷		LSD
۸۹/۶۶ ^a	۳۵/۶۷ ^a	۰/۶۸۵ ^a	۷۱/۰۷ ^c	I ₁	سطوح آبیاری
۸۳/۷۴ ^b	۳۴/۷۷ ^a	۰/۵۸ ^b	۷۵/۴۸ ^b	I ₂	
۷۶/۳ ^c	۳۲/۵۹ ^b	۰/۵۴ ^c	۸۶/۲۱ ^a	I ₃	
۳/۱۹۳	۱/۳۴۶	۰/۰۳۸۷	۳/۶۴۳		

I₁، I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی، آبیاری تکمیلی در گلدی و عدم آبیاری یا کشت دیم N₁، N₂، N₃ و N₄ به ترتیب محلول پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول پاشی ۱ گرم در لیتر نانوآکسید آهن، محلول پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول پاشی توام ۰/۵ گرم در لیتر نانوآکسید آهن و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

محتوای نسبی آب برگ

محلول پاشی نانوآکسید آهن 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 محلول پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). به نظر 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 محلول پاشی نانوسیلیکون با افزایش غلظت سیلیکون داخل سلول، رسوب در اپیدرم سلول‌ها و همچنین در بخش بالایی کوتیکول برگ و تشکیل لایه

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 Mofteh., 2015) به واسطه محلول پاشی با سیلیکون گزارش شده است.

هدایت روزنه‌ای برگ

بیش‌ترین هدایت روزنه‌ای برگ ($34/06 \text{ mmol H}_2\text{O.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) در محلول پاشی نانوسیلیکون و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی مشاهده شد که از افزایش $36/78$ درصدی نسبت به عدم محلول پاشی نانوذرات تحت شرایط دیم برخوردار بود (جدول ۵). به نظر 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 به واسطه محلول پاشی 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 به واسطه محلول پاشی 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 روزنه‌ای گیاه می‌شود.

هدایت الکتریکی برگ

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که عدم محلول پاشی نانوذرات و کشت دیم به ترتیب موجب افزایش $19/14$ و $21/3$ درصدی هدایت الکتریکی برگ نسبت به محلول پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون و آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی شد (جدول ۶). محدودیت آبی ناشی از شرایط دیم موجب می‌شود به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای و بسته شدن روزنه‌ها، تثبیت دی‌اکسید کربن کاهش یابد در حالی که 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 ساخته شدن 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

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 نانوآکسید 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 آنجایی که 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 کارایی 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 نانوآکسید 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 نانوآکسید آهن به‌دلیل نقشی که در ساختار کلروفیل و انتقال الکترون در فتوسنتز دارد، با افزایش سطح سبز و دوام آن

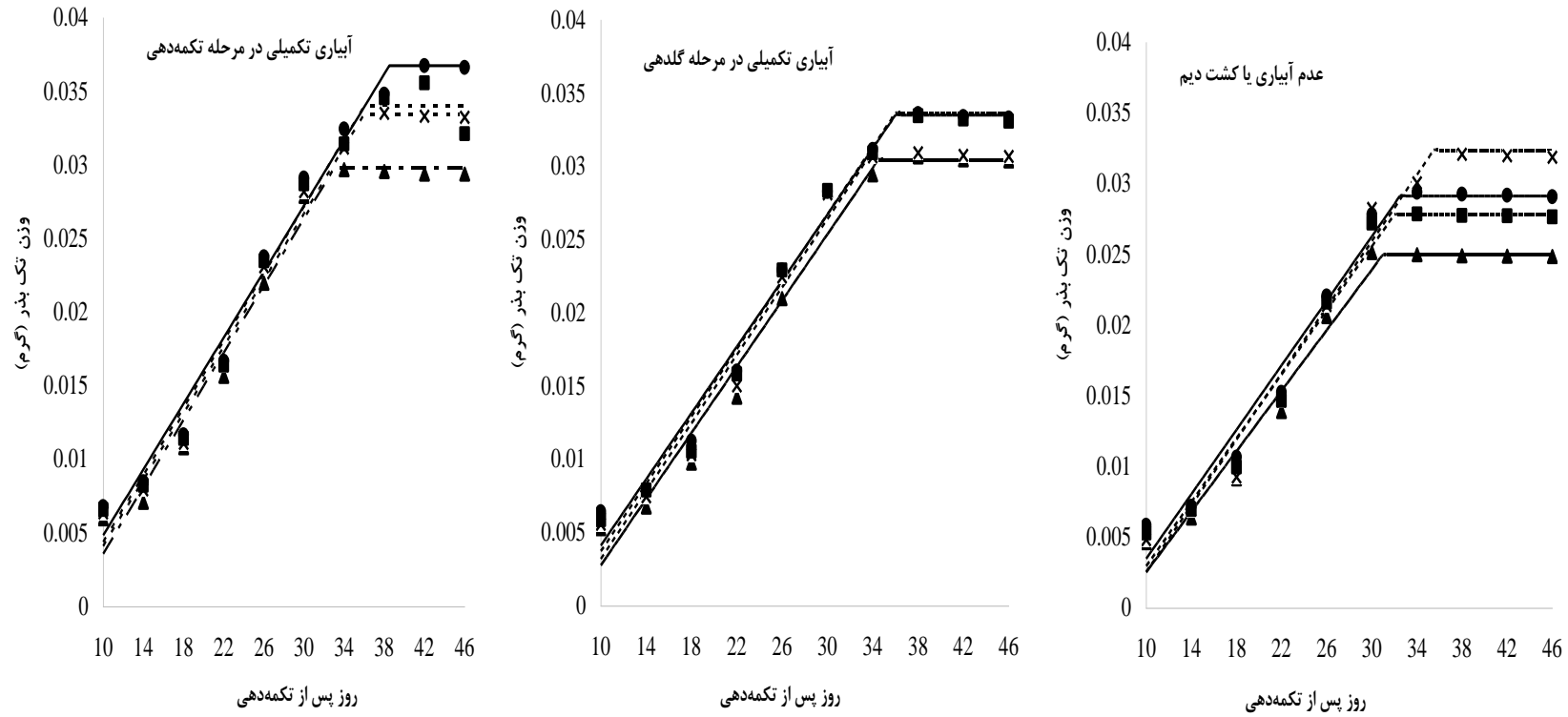
در گیاه، موجب تولید مواد فتوسنتزی بیش‌تر و افزایش اجزای پر شدن دانه در شرایط محدودیت آبی می‌شود.

ارتفاع بوته

مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیش‌ترین ارتفاع بوته در محلول پاشی 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 محلول پاشی 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 طولی 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 محلول پاشی نانو اکسید آهن را می‌توان به بهبود شاخص کلروفیل و افزایش تولیدات فتوسنتزی نسبت داد که موجب افزایش ارتفاع بوته می‌شود (جدول ۵) (داداش‌زاده و سیدشیرینی، ۱۳۹۷). نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش تولید مواد فتوسنتزی و ارتفاع بوته کدو در محلول پاشی 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 محلول پاشی 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 محلول پاشی 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 پر شدن دانه نسبت داده شود (جدول ۵). در این راستا سیدشیرینی 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 نانو اکسید 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).



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

- - - - - - مقادیر پیش‌بینی شده عدم محلول پاشی
- × مقادیر پیش‌بینی شده محلول پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون
- - - - - - مقادیر پیش‌بینی شده محلول پاشی یک گرم در لیتر نانوآکسید آهن
- ▲ - - - - - مقادیر مشاهده شده محلول پاشی توام نانوسیلیکون و نانوآکسید آهن
- - - - - - مقادیر مشاهده شده محلول پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون
- - - - - - مقادیر مشاهده شده محلول پاشی یک گرم در لیتر نانوآکسید آهن
- - - - - - مقادیر مشاهده شده محلول پاشی توام نانوسیلیکون و نانوآکسید آهن

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 روزنه‌ای، منجر به افزایش فعالیت فتوسنتزی و طول دوره پر شدن 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 محلول پاشی 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 محلول پاشی هم‌زمان نانوذرات آهن و سیلیکون در شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله تکمه‌دهی مشاهده شد که از افزایش ۴۳/۷۷ درصدی نسبت به عدم محلول پاشی 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 زمانی که 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 هر قدر محدودیت آبی افزایش یابد، به دلیل 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 به دلیل 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 محلول پاشی 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 بر اینکه محلول پاشی 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

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

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. پژوهش‌های زراعی ایران. ۸(۱): ۱۶۶-۱۵۷.
- بابایی، خ.، سید شریفی، ر. و پیرزاد، ع. ر. ۱۳۹۶. تأثیر کاربرد کودهای بیولوژیک و محلول‌پاشی با نانوآکسید 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): ۹۹-۱۱۲.
- 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. تأثیر قطع آبیاری و کاربرد میکوریز و نانوآکسید 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. تأثیر 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. تأثیر آبیاری تکمیلی و نانوآکسید آهن بر محتوای کلروفیل و مؤلفه‌های پر شدن دانه گندم (*Triticum 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 تریپتیکاله 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.

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 Safety*. 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. SI 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 morphophysiological and antioxidant potential. *Silicon*. 14(2): 1-15.

- 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 Sajanalal, 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 CO₂ 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.