



اثر محلول پاشی نانوسیلیکون و اسید سالیسیلیک روی صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه کلزای بهاره در شرایط محدودیت آبی

کامل ساجد گلجه^۱، سعید خماری^{۲*}، پریسا شیخ زاده مصدق^۳، ناصر صباغ نیا^۴، مهدی محب الدینی^۵

^۱دانشجوی دکتری زراعت، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۳استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۴دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۵دانشیار گروه باغبانی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۳۰

چکیده

سابقه و هدف: محدودیت آب مهمترین عامل محدود کننده در تولید کلزای بهاره در نواحی مدیترانه‌ای نیمه خشک می‌باشد. استفاده از مواد مغذی با فن آوری نانو و تنظیم کننده‌های رشد ضمن تاثیر بر فرآیندهای فیزیولوژی گیاه می‌تواند در ایجاد تحمل به تنش آبی نقش مهمی ایفا کند. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات برخی صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه کلزای بهاره در واکنش به محلول پاشی برگی نانوسیلیکون و اسید سالیسیلیک تحت شرایط محدودیت آب می‌باشد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش به صورت اسپلینت پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال زراعی ۱۳۹۶ اجرا شد. تیمارهای محدودیت آب (شاهد یا آبیاری کامل، قطع آبیاری در مراحل ساقه‌روی، گلدهی و دانه‌بندی) و محلول پاشی سیلیکون به فرم نانودی‌اکسید سیلیکون ($nSiO_2$) در سه سطح (صفر، ۶۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و اسید سالیسیلیک (SA) در سه سطح (صفر، ۰/۵ و ۲/۵ میلی‌مولار) بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که اثرات اصلی فاکتورهای آزمایش روی صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه معنی‌دار می‌باشد. در تیمار آبیاری کامل، کم‌ترین سبزی‌نگی برگ (شاخص SPAD) مشاهده شد، با این حال بالاترین میزان این صفت تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی و با محلول پاشی ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ و ۲/۵ میلی‌مولار SA به دست آمد. در تیمارهای آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله دانه‌بندی، محلول پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد کوانتومی فتوسنتز (Fv/Fm) II نسبت به سطح ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ شد. محلول پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ توأم با مصرف ۰/۵ و ۲/۵ میلی‌لیتر SA منجر به کاهش معنی‌دار نشت الکتروولت از غشا (EC) در مقایسه با تیمار شاهد شد. در شرایط عدم محدودیت آب، محلول پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ بالاترین محتوای نسبی آب (RWC) برگ را موجب شد. همچنین، در بین سطوح مختلف اسید سالیسیلیک، بالاترین میزان RWC از محلول پاشی برگی ۲/۵ میلی‌لیتر SA بدست آمد. در شرایط آبیاری کامل، محلول پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ توأم با ۰/۵ میلی‌مولار SA، بالاترین عملکرد دانه (۲۸۴۷/۳)

*مستول مکاتبه: khomarisaeid1981@gmail.com

کیلوگرم در هکتار) را موجب شد، در حالی که کمترین میزان این صفت متعلق به تیمار قطع آبیاری در مرحله گلدهی و ساقه‌روی بدون محلول‌پاشی $nSiO_2$ و SA بود.

نتیجه‌گیری: محلول‌پاشی $nSiO_2$ و SA به تنهایی و یا توأم در هر دو شرایط آبیاری و محدودیت آب تاثیر مثبت بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه نشان داد، با این حال مقدار بالاتر $nSiO_2$ می‌تواند نقش بازدارنده روی اثرات مثبت SA داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: سبزینگی، عملکرد دانه، محتوای نسبی آب برگ، نشت الکترولیت.

مقدمه

عوامل زراعی متعددی در تولید کلزای بهاره دخیل هستند. یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار در تولید این گیاه به‌ویژه در نواحی مدیترانه‌ای محدودیت ناشی از کمبود آب در مراحل مختلف رشد آن می‌باشد (۲۸). زمانی که محدودیت آب در مراحل بحرانی رشد مانند ساقه‌روی، گلدهی و پرشدن دانه رخ دهد، از طریق اختلال تنظیم اسمزی، می‌تواند اثرات مخرب روی رشد و خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه از جمله تغییرات سطح برگ و سبزینگی آن، محتوای نسبی آب برگ و کارکرد کوانتومی فتوسیستم II ایجاد کند. تحت شرایط محدودیت آبی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژنی می‌تواند منجر به آفت هدایت اسمزی، افزایش نشت الکترولیت از غشا و تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی گردد (۳۲).

از جمله صفات فیزیولوژیکی تاثیرپذیر از تنش محدودیت آب می‌توان به سبزینگی برگ یا شاخص SPAD اشاره داشت که بیانگر غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ بوده و از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز می‌باشد. مطالعات نشان داده است که تحت شرایط محدودیت آب بواسطه کوچک‌تر شدن و فشرده شدن سلول برگ، شاخص SPAD در گیاه کلزا افزایش می‌یابد (۳۸). از صفات دیگر فیزیولوژیکی که در آزمایشات مربوط به تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش‌های غیرزنده مورد سنجش قرار

می‌گیرد، اندازه‌گیری نشت الکترولیت از غشای سلولی می‌باشد که می‌تواند در ارزیابی پایداری غشای سلولی و تحمل به محدودیت آب در گونه‌ها و ارقام مختلف گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد (۹). گزارش شده است که تحت شرایط تنش شدید ناشی از محدودیت آب میزان نشت الکترولیت در مقایسه با تنش ملایم و عدم تنش بیشتر بوده و قطع زودتر آبیاری به همراه کاهش محتوای نسبی آب برگ موجب افزایش نشت الکترولیت در گیاه شده است (۲۶). حداکثر عملکرد کوانتوم فتوسیستم II یا نسبت Fv/Fm نیز از دیگر خصوصیات فیزیولوژیکی است که برای ارزیابی تغییرات واکنش‌های فتوشیمیایی اولیه دستگاه فتوسنتزی پس از محدودیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. میزان این صفت در شرایط عادی در گونه‌های گیاهی بین ۰/۸۱ تا ۰/۸۳ متغیر می‌باشد (۲۷) که می‌تواند بسته به میزان و شدت تنش و عامل تنش‌زا تغییر یابد (۴۰). صفت فیزیولوژیک محتوای نسبی آب برگ نیز اغلب در آزمایشات مرتبط با تنش‌های محیطی مورد سنجش واقع می‌گردد. طی مطالعات متعدد مشاهده شده است که اعمال محدودیت آبی از طریق قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه منجر به ایجاد تغییرات معنی‌دار در صفت فیزیولوژیکی محتوای نسبی آب برگ می‌گردد (۴۰). در گیاه کلزا تحت شرایط محدودیت آبی از طریق قطع آبیاری در مراحل مختلف فنولوژیک از

استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی نیز به لحاظ تاثیرگذاری آن‌ها در تحمل به تنش‌ها و بهبود رشد گیاهان مورد توجه است. از جمله کاربردی‌ترین آن‌ها بر روی گیاهان زراعی، اسید سالیسیلیک یا اسید اوروتو هیدروکسی بنزوئیک می‌باشد که می‌تواند بر رشد و خصوصیات فیزیولوژیک گیاه به خصوص تحت شرایط تنش محدودیت آبی اثرگذار باشد (۴۲). مطالعات متعدد نشان داده است که کاربرد اسید سالیسیلیک باعث افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل در گیاه می‌شود (۳۳). اسید سالیسیلیک می‌تواند موجب تعدیل فعالیت برخی آنزیم‌های مهم درگیر در شرایط تنش‌زا باشد (۳۳) و با بهبود روابط آبی، فرآیندهای فتوسنتزی و مکانیسم‌های موثر در تحمل به تنش، نقش کلیدی در افزایش مقاومت گیاهان در معرض تنش ایجاد نماید (۱۳) و (۱۸). در مطالعه‌ای محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط تنش کم آبی باعث افزایش میزان کلروفیل شد و غلظت ۳۰۰ میکرومول SA در مقایسه با سایر غلظت‌ها، باعث کاهش محتوای کلروفیل کلزا در تیمارهای رطوبتی گردید و مشخص شد که اسید سالیسیلیک از پتانسیل بالایی در ایجاد واکنش‌های متابولیکی و تاثیر بر مولفه‌های فتوسنتزی و روابط آبی گیاه برخوردار است (۱۹). با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیوشیمیایی متمایز سیلیکون و نقشی که اسید سالیسیلیک در سیگنال‌دهی تحمل به تنش ایفا می‌کند، این آزمایش با هدف بررسی اثرات عنصر سیلیکون در شکل نانوذرات و ماده شبه هورمون SA روی برخی خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد دانه کلزا تحت شرایط محدودیت آبی آبیاری و در راستای کاهش آب مصرفی در کشت بهاره این گیاه اجرا شد.

مواد و روش‌ها

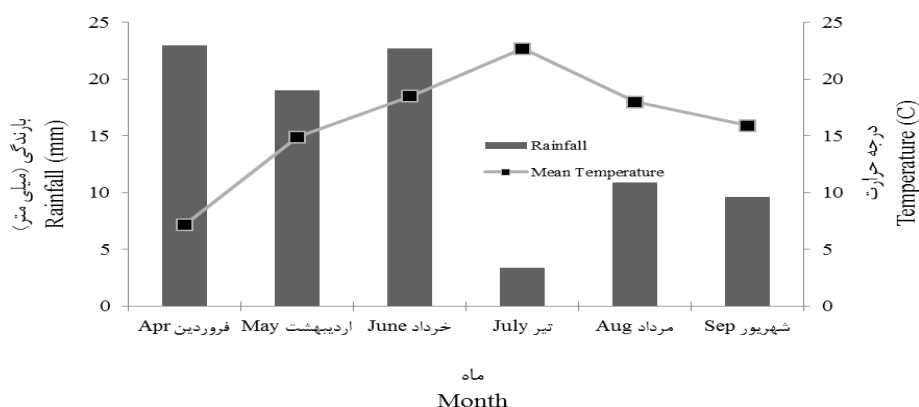
این آزمایش در سال ۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی

جمله گلدهی و دانه‌بندی کاهش معنی‌دار در محتوای نسبی آب برگ اتفاق افتاده است (۲۳ و ۳۱). مطالعات نشان داده است که در کنار استفاده از ارقام و هیبریدهای متحمل به محیط‌های تنش‌زا، به‌کارگیری صحیح شیوه‌های به‌زراعی مانند تغذیه مناسب، مصرف تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی و عناصر دخیل در بهبود مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی می‌توانند در بهبود رشد کلزا و استفاده بهینه آب آبیاری، ایفای نقش کنند (۷ و ۱۷).

سیلیکون دومین عنصر فراوان در زمین پس از اکسیژن بوده و به عنوان یک ماده مغذی مفید برای رشد گیاه و تحمل آن در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده شناخته شده است (۱۰). سیلیکون با کاهش نفوذپذیری غشای سلولی، ممانعت از پراکسیداسیون غشای پلاسمایی، افزایش استحکام برگ‌ها و تاخیر پیری برگ که به دنبال آن میزان کلروفیل و فعالیت آنزیم روبیسکو افزایش یافته و بر سرعت فتوسنتز اضافه می‌گردد (۲۵). همچنین، محققین دریافته‌اند که مصرف سیلیکون به همراه آب آبیاری به دلیل وجود روابط سینرژیستی بین آن‌ها، موجب افزایش ثبات گیاه در برابر محدودیت آبی می‌شود (۳). در این بین استفاده از فرم نانو مواد مغذی از جمله نانو ذرات سیلیکون در حال حاضر زمینه‌های جالب پژوهش در علوم مختلف بالاحص کشاورزی است (۲۱)، به‌طوری‌که بیان می‌شود بسته به خصوصیات نانوذرات، این مواد با گیاهان ارتباط برقرار کرده و موجب تغییرات معنی‌دار در صفات فیزیولوژیکی گیاه می‌شوند. در میان نانوذرات، نانو سیلیکون در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه بوده است، به‌طوری‌که محلول‌پاشی نانوذرات دی اکسید سیلیکون می‌تواند توسعه کانوپی، پوشش سطح و بسته شدن سریع کانوپی را تحت محدودیت آبی در نواحی نیمه‌خشک بهبود و یک گزینه زراعی قابل توصیه باشد (۱۵).

مزرعه حاوی ۱/۲۴ درصد ماده آلی با pH ۷/۹ و هدایت الکتریکی ۳/۳ دسی‌زیمنس بر متر بود. همچنین، با دارا بودن ۴۷ درصد شن، ۳۰/۸ درصد ماسه و ۲۲/۲ درصد رس جزو خاک‌های با بافت لومی بود.

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی با موقعیت جغرافیایی ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۳۱۰ متر از سطح دریا اجرا گردید. براساس تجزیه خاک بین عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر، خاک



شکل ۱- متوسط دما و بارندگی منطقه آزمایش در طول دوره رشد گیاه کلزا.

Figure 1- Mean temperatures and rainfall of the experiment region during the period of rapeseed plant growth.

مقادیر اسید سالیسیلیک (SA) (به صورت محلول‌پاشی برگی ۰/۵ و ۲/۵ میلی‌مولار و شاهد (آب مقطر)) به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی پیاده شدند. محلول‌پاشی دوبار در دوره گلدهی (ده درصد و انتهای مرحله گلدهی) انجام گرفت. به منظور چسبندگی بهتر محلول به برگ‌های کلزا و کارایی بهتر از Tween-20 (۰/۱ درصد) استفاده شد.

بذر هیبرید کلزا (RGS × Okapi) از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شد. هر کرت آزمایش دارای ۵ ردیف کاشت به طول ۵ متر بود. فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۵ سانتی‌متر و فاصله بین دو پشته ۶۰ سانتی‌متر با تراکم ۲۵ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. فواصل آبیاری هر ده روز یک بار در طی دوره رشد در نظر گرفته شد (با توجه به آماری هواشناسی (شکل ۱) بارندگی موثر در طول آزمایش رخ نداد). عملیات تنک‌کاری بوته‌ها در زمانی که ارتفاع بوته‌ها به ۱۵ سانتی‌متر رسیده بود،

آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده فاکتوریل (Split-plot factorial) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با چهار تکرار انجام گرفت. سطوح آبیاری به‌عنوان فاکتور اصلی شامل آبیاری کامل (I.1)؛ قطع آبیاری در مرحله دانه‌بندی (I.2)؛ قطع آبیاری در مرحله گلدهی (I.3) و قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی (I.4) در کرت‌های اصلی پیاده شدند. مراحل رشد ذکر شده در بالا با استفاده از سیستم کدبندی مقیاس BBCH برای گیاه کلزا شناسایی شد (باتوجه به اینکه آبیاری کامل به عنوان شاهد در نظر گرفته شد، لذا کدبندی تیمارهای آبیاری براساس شدت تنش محدودیت آبی انجام یافت). ماده نانودی اکسید سیلیکون (nSiO₂) از شرکت نانوپیشگام مشهد تهیه شد. محلول‌پاشی سطوح مختلف نانودی اکسید سیلیکون (nSiO₂) (تعلیق شده در مقدار ۶۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر و شاهد (محلول‌پاشی فقط با آب مقطر)) و محلول‌پاشی

تاریکی تعیین و میزان فلورسانس متغیر و حداکثر عملکرد کواتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) با استفاده از معادله ۱ مشخص شد (۲).

معادله ۱:

$$Fv / Fm = (Fm - F0) / Fm \text{ و } Fv = Fm - F0$$

در این معادله، Fv فلورسانس متغیر، Fm فلورسانس حداکثر و F0 فلورسانس حداقل می‌باشند.

نشت الکترولیت با هدف ارزیابی پایداری غشای سلولی اندازه‌گیری شد. برای این منظور از برگ‌های جوان و توسعه یافته بالای پوشش گیاهی تعداد مساوی دیسک تهیه و در شیشه‌های درب‌دار قرار داده و مقدار ۱۰ سی‌سی آب دیونیزه ریخته شد. پس از ۲۴ ساعت قرار گرفتن شیشه‌ها در تاریکی هدایت الکتریکی توسط دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد. با قرار دادن شیشه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاو و سرد کردن، هدایت الکتریکی آن‌ها مجدد اندازه‌گیری و براساس معادله ۲ میزان نشت الکترولیت از غشای سلول محاسبه شد (۳۵).

$$\text{CMS} = (EC0 / EC1) \times 100 \quad \text{معادله ۲:}$$

در این معادله، CMS: پایداری غشای سلولی، EC0: هدایت الکتریکی بدون اتوکلاو و EC1: هدایت الکتریکی با اتوکلاو می‌باشد. برای تعیین محتوای نسبی آب برگ (Relative water content) از هر کرت، پنج برگ جوان و کامل در موقعیت یکسان به‌طور تصادفی انتخاب و در ورق آلومینیومی پیچیده شد و سپس در کیسه‌های پلاستیکی در داخل فلاسک‌های حاوی یخ قرار گرفت و بلافاصله جهت اندازه‌گیری به آزمایشگاه انتقال یافت. برای تعیین محتوای رطوبت نسبی برگ، با استفاده از دستگاه پانچ، دیسک‌های فاقد رگبرگ با قطر ۲ سانتی‌متر تهیه و بعد از توزین با ترازوی یک ده هزارم گرم، بلافاصله در آب دیونیزه شناور و در درجه حرارت اتاق (تقریباً ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و در ظروف در

انجام یافت. همچنین، کنترل علف‌های هرز در چندین نوبت به‌وسیله وجین دستی صورت گرفت. با در نظر گرفتن اثر حاشیه، نمونه‌برداری‌ها در سه ردیف وسط صورت گرفت. مصرف عنصر نیتروژن به میزان ۱۵۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار و پتاسیم به میزان ۱۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار براساس آزمون تجزیه خاک صورت گرفت. کود اوره در سه مرحله زمان کاشت (پایه)، ساقه‌روی و قبل از گلدهی و کود سولفات پتاسیم در زمان کاشت به خاک داده شد.

تغییرات شاخص‌های فیزیولوژیک در هر واحد آزمایشی اولین نمونه‌برداری ۴۸ ساعت پس از اعمال تیمارها ثبت شد (هفته اول) و برای تعیین روند تغییرات، نمونه‌برداری در ۴ مرحله به فاصله ۷-۸ روز با استفاده از بوته‌های متفاوت در هر کرت، در هفته‌های دوم، سوم و چهارم بعد از محلول‌پاشی نیز تکرار شد. ماده خشک بوته بر حسب گرم و عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. سبزیگی کل برگ (شاخص SPAD) در تیمارهای مختلف با استفاده از دستگاه SPAD یا کلروفیل‌متر مدل (SPAD-502, Konica Minolta Sensing Inc. Japan) قبل از ظهر (مابین ساعت ۸ تا ۱۰) اندازه‌گیری شد. کلروفیل‌متر جذب برگ را در مناطق قرمز و مادون قرمز اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از این دو جذب SPAD-502 متر مقدار SPAD عددی محاسبه می‌شود که متناسب با مقدار کلروفیل موجود در برگ است (۱۶).

اندازه‌گیری پارامترهای فلورسانس کلروفیل در آخرین برگ توسعه یافته با استفاده از دستگاه فلورومتر انجام گرفت. بدین منظور، برگ‌ها با استفاده از گیره‌های مخصوص برگ به مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفتند. سپس فلورسانس حداقل و فلورسانس حداکثر در برگ‌های سازگار شده به

داشتند. اثر متقابل سه جانبه محدودیت آب در $nSiO_2$ \times SA نیز در سطح احتمال یک درصد روی این صفت معنی دار بود (جدول ۱). تحت شرایط آبیاری کامل علی‌رغم کاربرد تیمارهای مختلف محلول‌پاشی کم‌ترین شاخص SPAD مشاهده شد، در حالی که بالاترین میزان این صفت (۶۴/۸) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی توأم با محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر $nSiO_2$ و ۲/۵ میلی‌مولار SA به دست آمد (شکل ۲). در شرایط محدودیت آب شاخص SPAD در کلزا نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت (۴۳). افزایش شاخص SPAD تحت شرایط تنش می‌تواند به واسطه کوچک‌تر شدن و فشرده شدن سلول برگ باشد (۳۸). افزایش محدودیت آب می‌تواند با تشدید خسارت نوری منجر به از بین رفتن ساختار سبزی‌نگی در گیاه شود، لذا حفظ سبزی‌نگی گیاه یا به عبارتی، افزایش محتوای کلروفیل یکی از مکانیسم‌های گیاه در مقابله با شرایط کمبود رطوبت می‌باشد (۲۳). اثر افزایشی SA بر رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌تواند در ارتباط با متابولیسم نیترات داخلی بافت‌ها و بیوسنتز کلروفیل و تاثیر آن بر تحریک فعالیت آنزیم روبیسکو باشد (۳۶). افزایش معنی‌دار شاخص SPAD با محلول‌پاشی SA و $nSiO_2$ نسبت به تیمار شاهد توسط محققین ثابت شده است (۱۶ و ۳۴). در این آزمایش مشاهده شد که در شدت‌های بالاتر از محدودیت آب، مقدار قرائت شده دستگاه کلروفیل‌متر دستی نسبت به تنش ملایم رطوبتی بالاتر بود. محلول‌پاشی مقادیر متفاوت از SA و $nSiO_2$ نیز موجب افزایش میزان کلروفیل کل در واحد سطح برگ شد.

بسته جهت ممانعت از تبخیر در محیط تاریک قرار گرفتند. وزن اشباع (آماس) نمونه‌های دیسک توزین شد. وزن خشک دیسک‌ها پس از خشک شدن آن‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون و به مدت ۴۸ ساعت ثبت شد. محتوای رطوبت نسبی با قرار دادن مقادیر به دست آمده در معادله ۳ محاسبه شد (۱۳). معادله ۳:

$$RWC \% = [(Fw - Dw) / (Tw - Dw)] \times 100$$

در این معادله، Fw وزن تر، Tw وزن اشباع یا آماس و Dw وزن خشک دیسک‌ها بر حسب گرم می‌باشند. تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) داده‌ها برای صفات مورد بررسی با استفاده از برنامه تحلیل آماری (SAS Institute 1988) انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد ($p < 0.05$) انجام شد. تجزیه همبستگی پیرسون بین صفات با استفاده از نرم‌افزار SPSS.21 انجام شد و برای ترسیم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

با توجه به اهمیت اولین نمونه‌برداری بعد از محلول‌پاشی، تجزیه واریانس برای میانگین داده‌های نمونه‌برداری هفته اول انجام یافت و میانگین نمونه‌برداری‌های هفته دوم، سوم و چهارم برای نمایش روند تغییرات صفات فیزیولوژیک به طور جداگانه برای تیمارهای محدودیت آب و محلول‌پاشی نانودی اکسید سیلیکون ($nSiO_2$) و اسید سالیسیلیک (SA) استفاده شد.

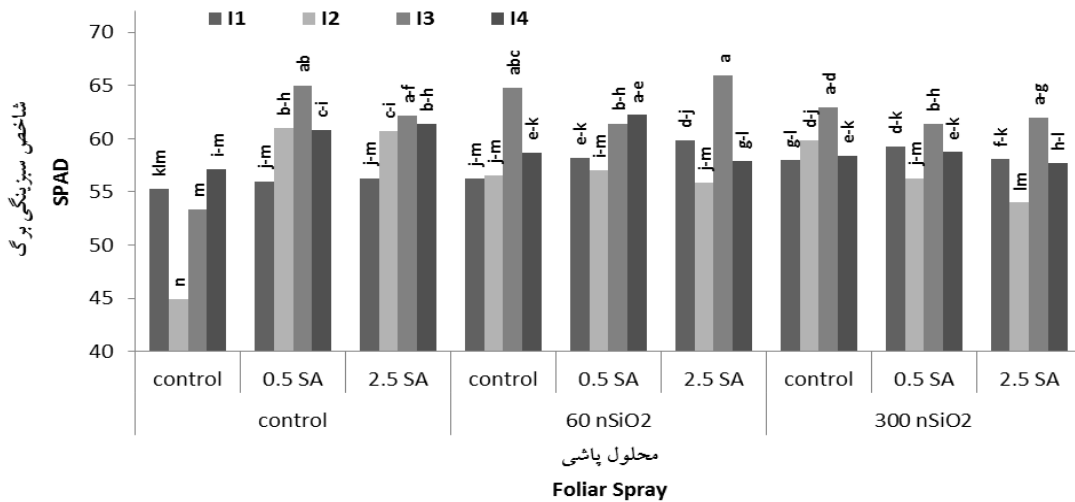
سبزی‌نگی کل برگ (شاخص SPAD): نتایج تجزیه واریانس نشان داد که محدودیت آب، محلول‌پاشی $nSiO_2$ و SA تاثیر معنی‌داری روی شاخص SPAD

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه کلزای بهاره (نمونه برداری اول بعد از محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک).

Table 1 - Analysis of variance for Physiological and seed yield of spring rapeseed (first sampling after foliar spray of nSiO₂ and SA).

منابع تغییر	درجه آزادی	شاخص سبزیگی	شاخص سبزیگی	محتوای نسبی آب برگ	نسبت الکترولیت	ماده خشک پورته	عملکرد دانه
S.O.V	df	SPAD	Fv/Fm	Relative water content	Electrolyte leakage	Plant dry matter	Seed yield
تکرار	3	112.6 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	158.9 [*]	424.9 ^{**}	92.99 ^{**}	38184.9 ^{ns}
Replication							
آبیاری	3	232.2 [*]	0.0149 ^{**}	2590.7 ^{**}	1309.7 ^{**}	2679.3 ^{**}	13642273.0 ^{**}
Irrigation (Irri.)							
خطای کرت اصلی	9	33.45	0.0004	31.80	38.58	17.81	31968.1
Error a							
نانودی اکسید سیلیکون	2	35.68 ^{**}	0.0021 ^{**}	326.1 ^{**}	613.1 ^{**}	7515.5 ^{**}	3856964.7 ^{**}
Nano-Silicon Dioxide (nSiO ₂)							
اسید سالیسیلیک	2	92.86 ^{**}	0.0037 ^{**}	293.3 ^{**}	315.5 ^{**}	655.0 ^{**}	491451.3 ^{**}
Salicylic Acid (SA)							
آبیاری × نانودی اکسید سیلیکون	6	15.18 [*]	0.0009 ^{**}	42.06 ^{**}	30.76 ^{ns}	280.6 ^{**}	302797.8 ^{**}
Irri. × nSiO ₂							
آبیاری × اسید سالیسیلیک	6	8.219 ^{ns}	0.0003 [*]	11.95 ^{ns}	6.422 ^{ns}	77.34 [*]	16865.5 ^{ns}
Irri. × SA							
نانودی اکسید سیلیکون × اسید سالیسیلیک	4	122.7 ^{**}	0.0001 ^{ns}	5.279 ^{ns}	42.47 [*]	40.79 ^{ns}	35076.9 ^{ns}
nSiO ₂ × SA							
آبیاری × نانودی اکسید سیلیکون × اسید سالیسیلیک	12	40.44 ^{**}	0.0001 ^{ns}	11.84 ^{ns}	5.397 ^{ns}	66.32 [*]	45116.9 ^{**}
Irri. × nSiO ₂ × SA							
خطای کرت فرعی	96	6.176	0.0001	10.36	16.46	26.50	16419.4
Error b							
ضریب تغییرات (درصد)		4.23	1.40	4.17	13.1	13.3	7.80

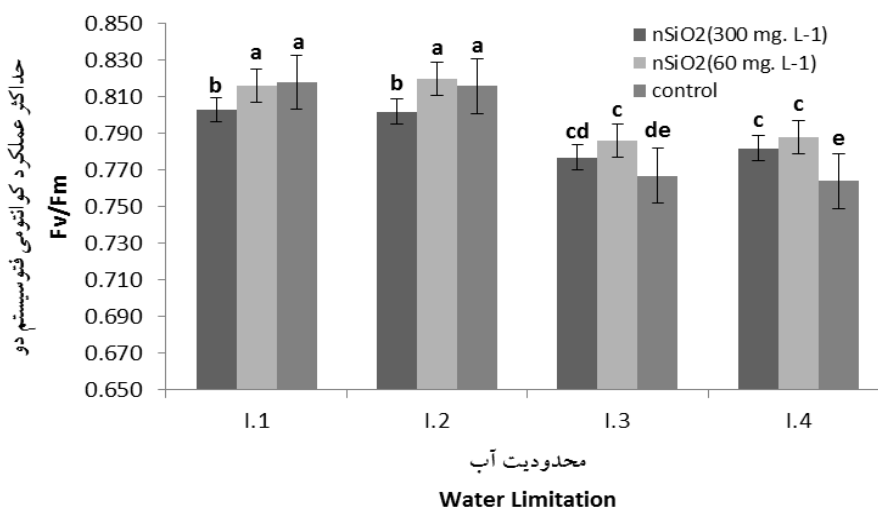
ns, *, and **, indicate the non-significant differences and significant differences at the probability level of 5% and 1%, respectively. * and ** indicate the non-significant differences and significant differences at the probability level of 5% and 1%, respectively.

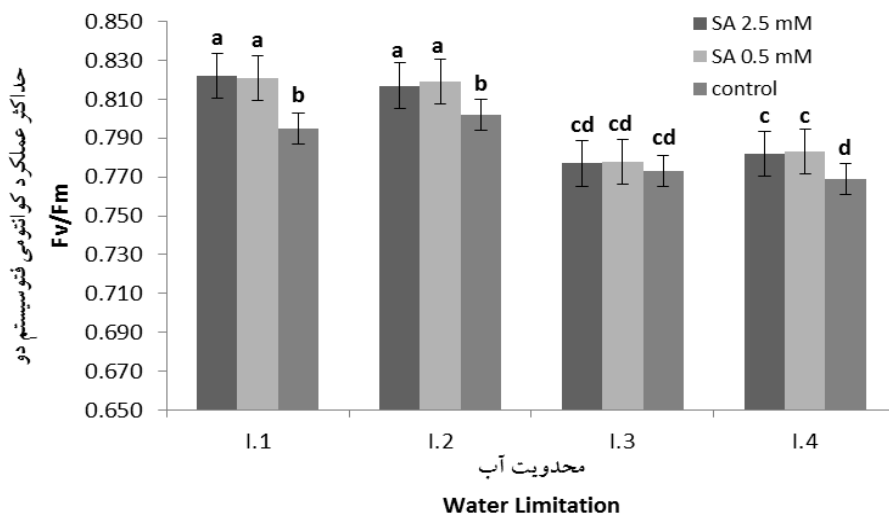


شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل محدودیت آب در محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک بر سبزیگی برگ.
Figure 2- Mean comparison interaction effects of water limitation × nSiO₂ × SA on SPADi.

۶۰ میلی گرم بر لیتر nSiO₂ و یا شاهد، بدون اختلاف آماری معنی دار، بالاترین Fv/Fm را موجب شدند، در حالی که کمترین (۰/۷۶۴) میزان Fv/Fm متعلق به قطع آبیاری در مرحله ساقه روی و بدون محلول پاشی بود. همچنین، بالاترین نسبت Fv/Fm متعلق به ترکیبات تیماری آبیاری کامل و آبیاری تا مرحله دانه بندی با کاربرد ۰/۵ یا ۲/۵ میلی مولار SA بود (شکل ۳).

حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسنتز (Fv/Fm) II اثرات اصلی محدودیت آب و محلول پاشی nSiO₂ بر عملکرد کوانتومی فتوسنتز (Fv/Fm) II در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. اثر متقابل محدودیت آب و nSiO₂ نیز محدودیت آب و SA به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد روی Fv/Fm معنی دار بودند (جدول ۱). آبیاری کامل و آبیاری تا مرحله دانه بندی در ترکیب با محلول پاشی



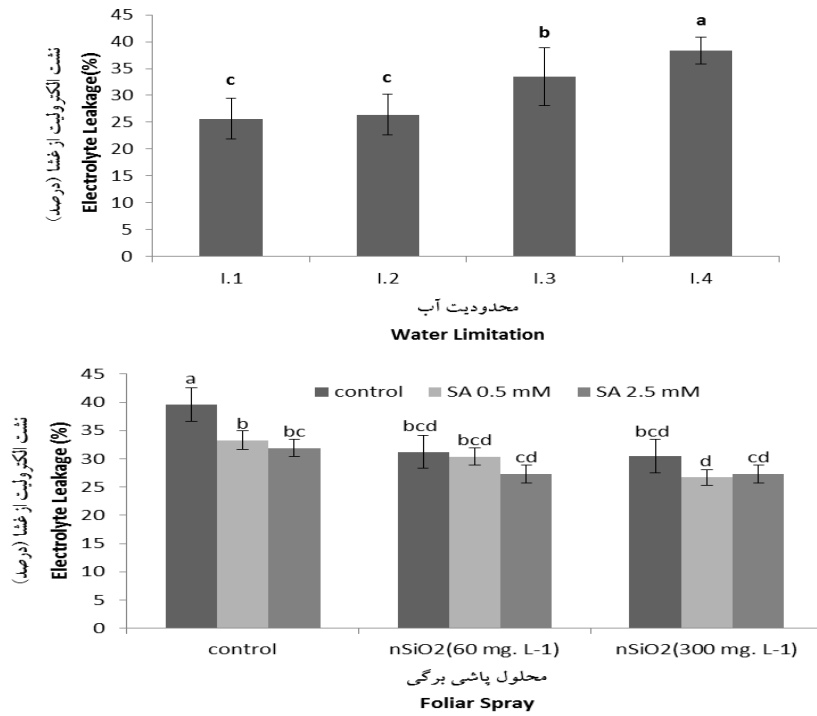


شکل ۳- اثرات متقابل محدودیت آب در نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک بر حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II. Figure 3- The interaction effects of water limitation \times nSiO₂ and water limitation \times SA on Fv/Fm.

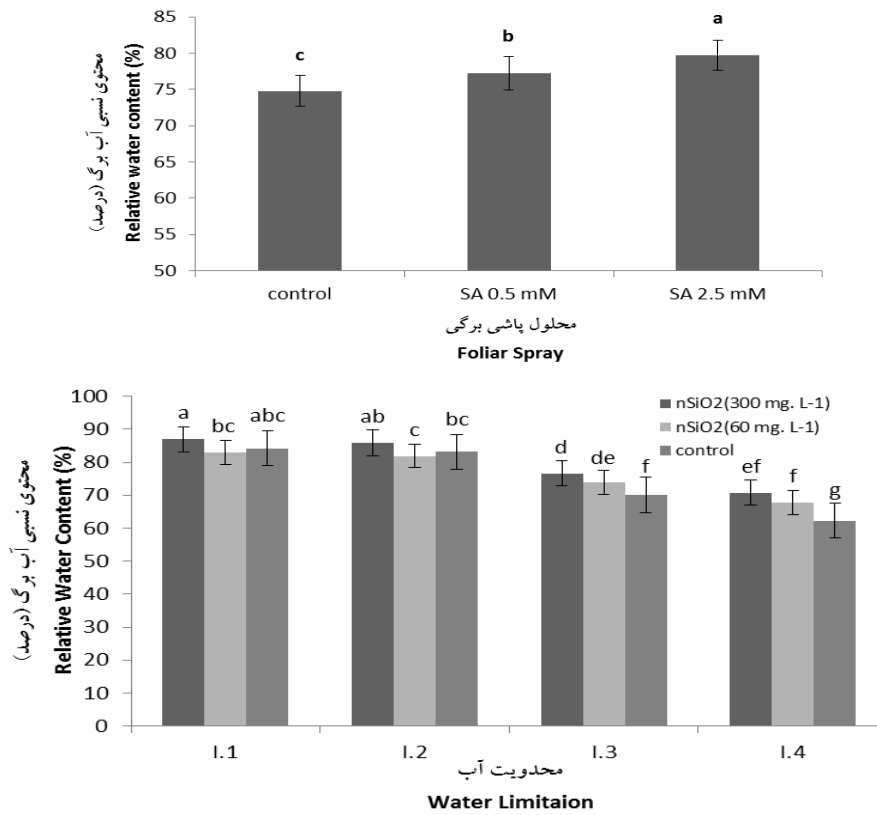
EC (۲۵/۶ درصد) به دست آمد، در حالی که بالاترین میزان EC متعلق به تیمار قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی بود، هر چند که به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با تیمار قطع آبیاری در مرحله گلدهی نشان نداد (به ترتیب ۳۸/۳ و ۳۳/۵ درصد). عدم محلول‌پاشی منجر به بالاترین میزان EC (۳۹/۶ درصد) گردید، در حالی که ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر nSiO₂ با ۰/۵ میلی مولار SA کم‌ترین EC را موجب شد (شکل ۴). محدودیت آب در کلزا موجب افزایش معنی‌دار EC از ۱۸ درصد در تیمار بدون تنش به ۴۷ درصد در شرایط قطع آبیاری از مرحله گلدهی شد، نتیجه‌گیری شد تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و تغییر در ساختار غشا از طریق پراکسیداسیون چربی‌ها موجب افزایش نشت الکتروولیت از غشا تحت شرایط تنش می‌گردد (۳۱). در این آزمایش، بالاترین اختلاف نشت الکتروولیت بین دو تیمار شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی مشاهده شد (۳۳/۲ درصد). در این آزمایش مشاهده شد که محلول‌پاشی توأم nSiO₂ و SA باعث کاهش ۳۲/۶ درصدی نشت الکتروولیت از غشا در رقم کلزای بهاره گردید.

مطالعه بر روی آراییدوپسیس نشان داد که کمبود SA باعث کاهش نسبت Fv/Fm شد (۵). نسبت و میزان Fv/Fm توسط تنش‌های محیطی قابل تغییر است (۴۰). کاربرد سیلیکون باعث بهبود حداکثر عملکرد کوانتومی PSII تحت شرایط تنش محیطی شد (۴). در این آزمایش مشخص شد که محدودیت آب یکی از عوامل اثرگذار بر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II می‌باشد و تغییرات حاصل در نسبت Fv/Fm بسته به شدت تنش به‌ویژه تحت شرایط کمبود سایر عوامل دخیل در رشد از جمله اسید سالیسیلیک می‌تواند متفاوت باشد. به نظر می‌رسد محلول‌پاشی nSiO₂ و SA در مقادیر بالاتر در شرایط عدم محدودیت آب می‌تواند تاثیر منفی در عملکرد کوانتومی فتوسیستم II داشته باشد.

نشت الکتروولیت از غشا (EC): اثرات اصلی محدودیت آب و محلول‌پاشی نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک بر صفت نشت الکتروولیت از غشا (EC) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثرات متقابل محلول‌پاشی nSiO₂ و SA نیز به لحاظ آماری در سطح احتمال پنج درصد روی این صفت معنی‌دار بود (جدول ۱). تحت شرایط آبیاری کامل کم‌ترین



شکل ۴- اثر محدودیت آب و اثر متقابل محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک بر نشت الکترولیت از غشا.
 Figure 4. The effect of water limitation and interaction effects of nSiO₂ × SA on electrolyte leakage.



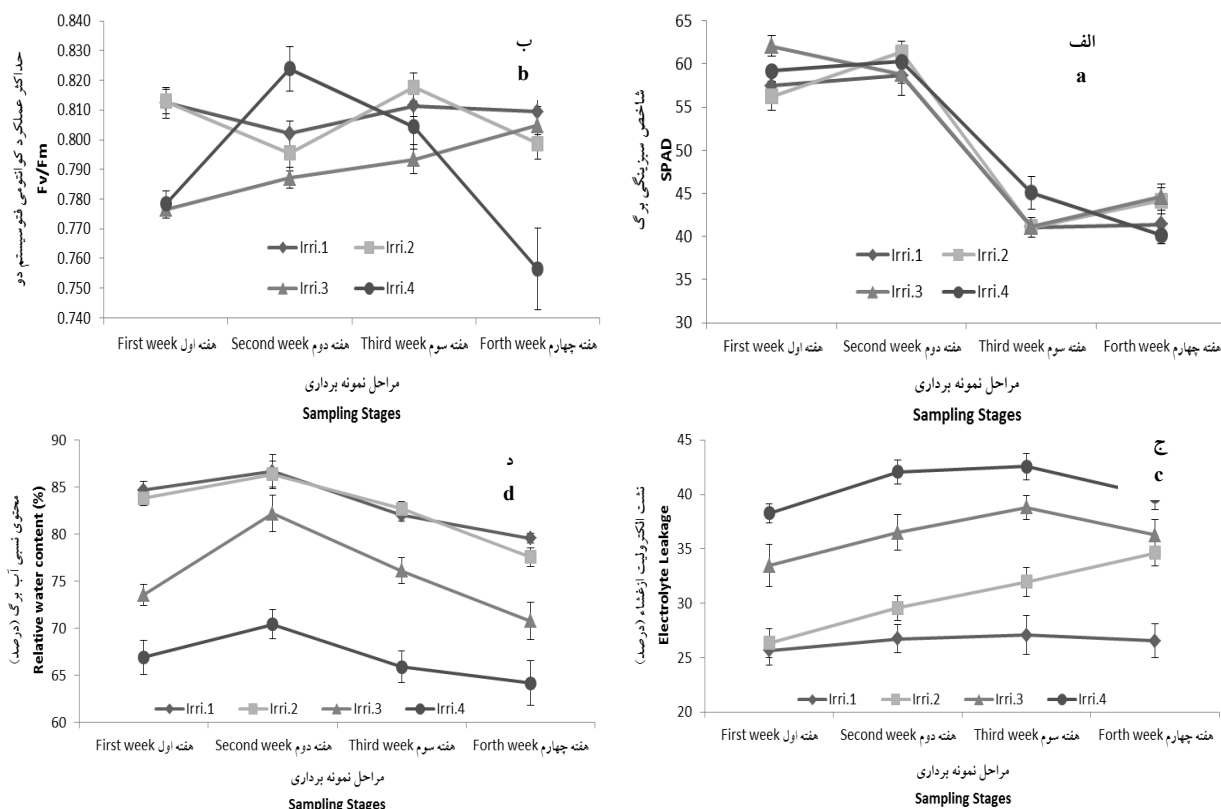
شکل ۵- اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل محدودیت آب در نانودی اکسید سیلیکون بر محتوای نسبی آب برگ.
 Figure 5- The effect of SA and interaction effects of water limitation × nSiO₂ on relative water content.

روی و عدم محلول‌پاشی به میزان ۲۸/۳ درصد RWC را بهبود بخشید.

روند تغییرات صفات فیزیولوژیک: در تیمارهای محدودیت آب، شاخص SPAD در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی نسبت به بقیه تیمارها اختلاف معنی‌دار نشان داد. روند نزولی در شاخص SPAD بین هفته دوم و سوم پس از محلول‌پاشی مشاهده شد (شکل ۶). افزایش معنی‌دار شاخص SPAD در مراحل مختلف رشد کلزا تحت شرایط محدودیت آب نسبت به آبیاری کامل گزارش شده است (۱۴ و ۳۷). تغییرات در روند Fv/Fm در تیمار آبیاری کامل کم‌ترین و در شرایط قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی بیشترین مقدار را به‌ویژه در هفته چهارم نشان داد (شکل ۶). کوچوا و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که تغییرات Fv/Fm تحت تاثیر RWC قرار گرفته و با کاهش RWC برگ، افزایش معنی‌دار نشان داد (۲۴). بالاترین میزان EC در کلیه مراحل نمونه‌برداری در شرایط قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی و گلدهی مشاهده شد (شکل ۶). میزان RWC در هفته چهارم در هر شرایط آبیاری عادی به زیر ۸۰ درصد رسید، اما نسبت به قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی و گلدهی معنی‌دار بود (شکل ۶). محققین گزارش کردند که قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه منجر به ایجاد تغییرات معنی‌دار در RWC در گیاهان مختلف زراعی (۴۱ و ۴۳) از جمله در گیاه کلزا می‌گردد (۲۳ و ۳۱).

محتوای نسبی آب برگ (RWC): اثرات اصلی فاکتورهای آزمایش و نیز اثر متقابل محدودیت آب و محلول‌پاشی nSiO₂ بر صفت فیزیولوژیک RWC در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). عدم محلول‌پاشی SA منجر به کم‌ترین (۷۴/۸ درصد) RWC در کلزا شد، در حالی‌که بالاترین (۷۹/۷ درصد) RWC از کاربرد بالاترین سطح SA (۲/۵ میلی‌مولار) به‌دست آمد. ترکیب تیماری آبیاری کامل (شاهد) توأم با محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر nSiO₂ بالاترین (۸۶/۹ درصد) RWC را موجب شد. کم‌ترین (۶۲/۳ درصد) RWC نیز تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی و بدون محلول‌پاشی nSiO₂ به‌دست آمد (شکل ۵).

محدودیت آب در مراحل بحرانی رشد مانند ساقه‌روی، گلدهی و پرشدن دانه می‌تواند از طریق اختلال تنظیم اسمزی و افزایش گونه‌های فعال اکسیژنی منجر به تنزل هدایت اسمزی و کاهش RWC گردد (۳۲). گزارش شده است که کاربرد سیلیکون به‌ویژه در شرایط تنش رطوبتی، منجر به افزایش RWC در حد شرایط آبیاری کامل می‌گردد (۱۲). بهبود RWC با کاربرد SA بویژه در شرایط تنش رطوبتی در گیاهان گزارش شده است (۳۷ و ۴۱). محلول‌پاشی ۰/۵ و ۲/۵ میلی‌مولار SA به ترتیب ۳/۱ و ۶/۲ درصد RWC را نسبت به شاهد بهبود داد. ترکیب تیماری آبیاری کامل توأم با ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر nSiO₂ نیز نسبت به قطع آبیاری در مرحله ساقه

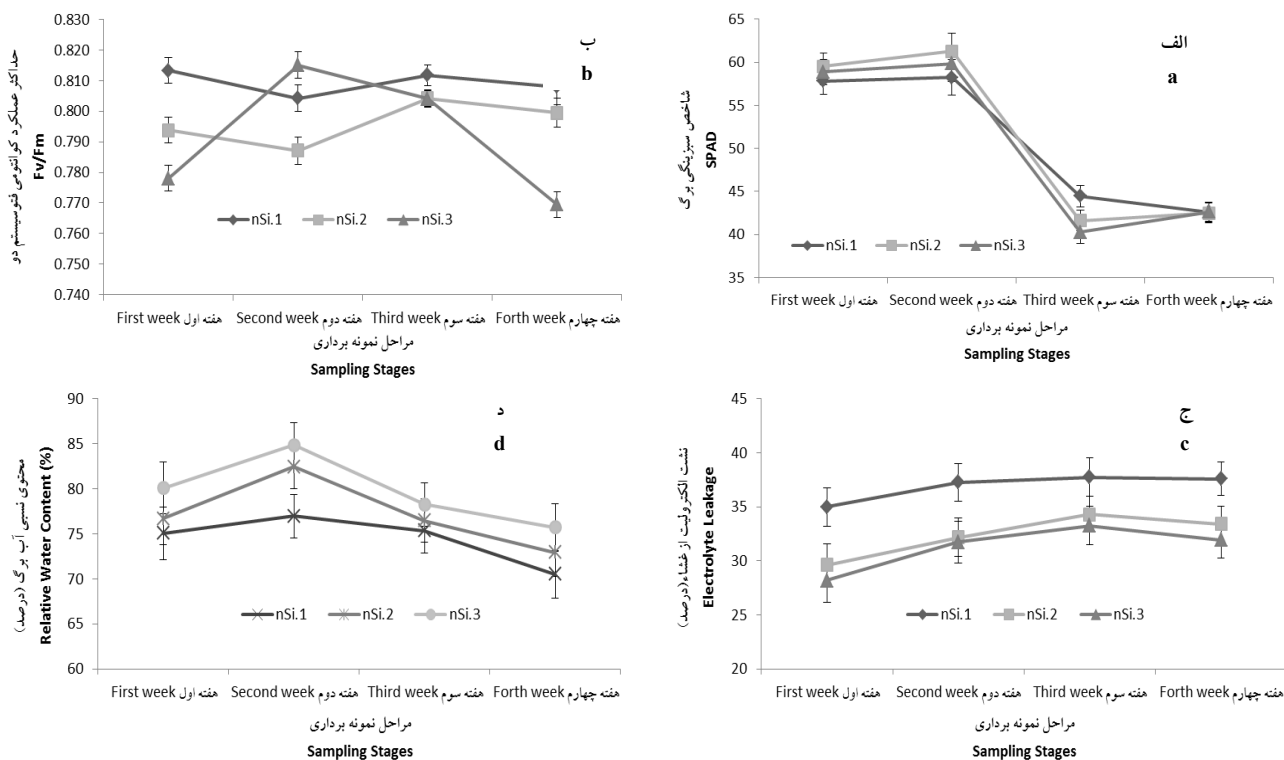


شکل ۶- تغییرات سبزیگی برگ (الف)، حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسنتز II (ب)، نشت الکترولیت (ج) و محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای محدودیت آب (آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله دانه بندی، قطع آب در مرحله گلدهی و قطع آبیاری در مرحله ساقه روی).

Figure 6- Changing of SPADi (a), Fv/Fm (b), Electrolyte leakage (c) and relative water content (d) under water limitation (I.1: full irrigation, I.2: withholding irrigation at seed formation, I.3: withholding irrigation at flowering and I.4: withholding irrigation at stem elongation) treatments.

سوم و کاهش نسبی در هفته چهارم را شاهد بودیم (شکل ۷). بهبود پایداری غشای پلاسمایی با مصرف سیلیکون تحت شرایط تنش گزارش شده است (۱۲). سیلیکون با کاهش نفوذپذیری غشای سلولی، مانع از پراکسیداسیون غشای پلاسمایی می شود (۲۵). روند تغییرات RWC نشان داد که در هفته دوم محلول پاشی برگی، سطوح ۶۰ و ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر $nSiO_2$ بالاترین میزان را داشتند (۸۵ درصد) و در هفته های بعدی در هر سه سطح، RWC کاهش نشان داد (شکل ۷). کاربرد سیلیکون در هر دو شرایط تنش و عدم تنش ضمن کاهش EC منجر به پایداری غشا و بهبود RWC می گردد (۴).

کاربرد ۶۰ و ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر $nSiO_2$ در مقایسه با شاهد باعث ایجاد تغییرات معنی دار به خصوص در هفته اول و دوم نمونه برداری از شاخص SPAD شد (شکل ۷). ایجاد تغییرات معنی دار در محتوای کلروفیل کلزا با کاربرد سیلیکون توسط محققین متعدد گزارش شده است (۸ و ۱۱). در خصوص روند Fv/Fm، بیشترین تغییرات با محلول پاشی ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر $nSiO_2$ مشاهده شد، به طوری که با اختلاف معنی دار در هفته اول کم ترین، در هفته دوم بیشترین و مجدد در هفته آخر پایین ترین میزان را نسبت به سایر تیمارها داشت (شکل ۷). در کلیه سطوح محلول پاشی افزایش مقدار EC در هفته

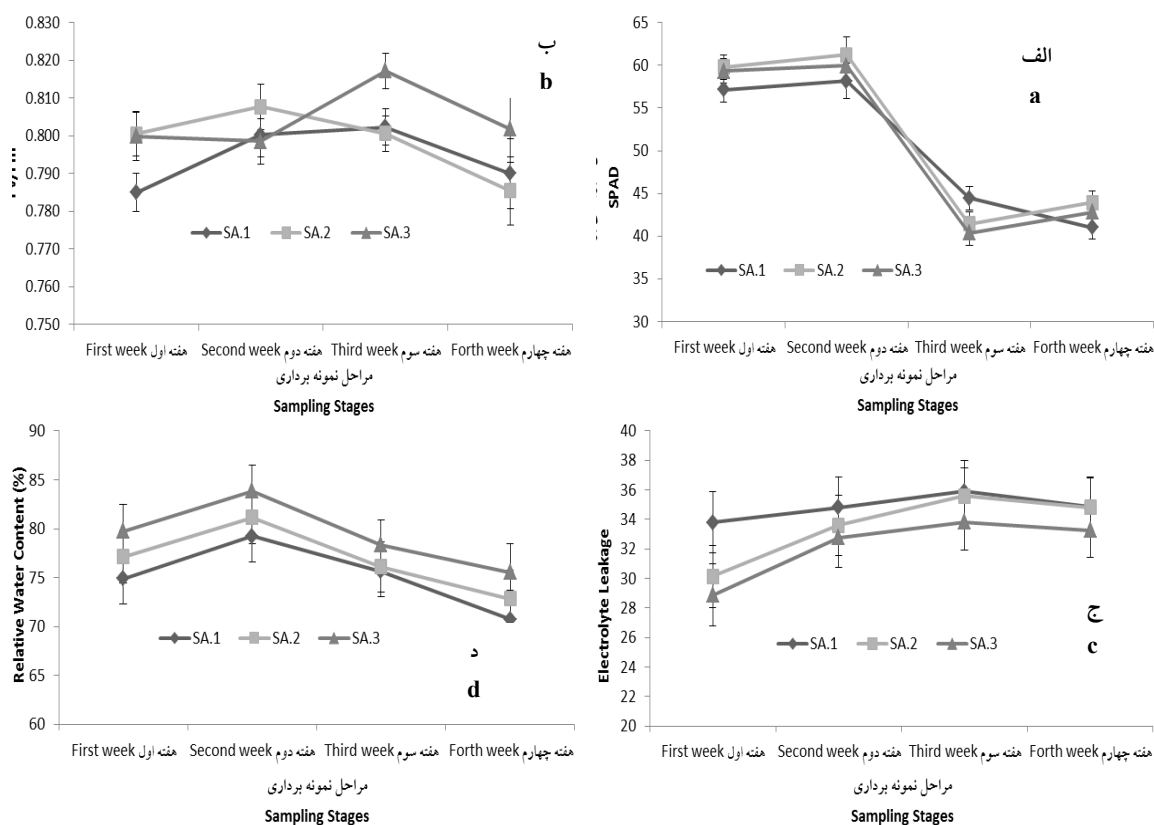


شکل ۷- تغییرات سبزیگی برگ (الف)، حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسنتز II (ب)، نشت الکترولیت (ج) و محتوای نسبی آب برگ (د) تیمارهای محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون (شاهد، ۶۰ میلی گرم بر لیتر و ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر).

Figure 7- Changing of SPADi (a), Fv/Fm (b), Electrolyte leakage (c) and relative water content (d) on foliar spray of Nano-Silicon Dioxide (nSi.1: control; nSi.2: 60 mg.L⁻¹ and nSi.3: 300 mg.L⁻¹) treatments.

EC در طول نمونه برداری مشاهده شد (شکل ۸). از کارکردهای فیزیولوژیک مثبت اسید سالیسیلیک حفظ فشار ترگر و کاهش EC به علت انباشت مقدار قابل توجه از مواد اسمزی در شرایط محدودیت آب است (۱). میزان RWC در هفته اول در تیمارهای محلول پاشی SA نسبت به شاهد بالاتر بود و در هفته دوم روند افزایشی داشت (بین ۸۰ تا ۸۳ درصد). در هفته های آخر نیز RWC در کلیه تیمارها کاهش یافت (شکل ۸). برخی محققین دریافتند که SA از پتانسیل بالایی در ایجاد واکنش های متابولیکی و روابط آبی گیاه در شرایط محدودیت آب برخوردار است (۱۹).

محلول پاشی SA دارای روند مشابهی از نظر شاخص SPAD نشان داد، با این تفاوت که میزان این شاخص با محلول پاشی ۰/۵ و ۲/۵ میلی لیتر SA در مقایسه با شاهد در هفته اول و دوم نمونه برداری بالاتر بود (شکل ۸). افزایش معنی دار در نسبت Fv/Fm با کاربرد ۲/۵ میلی مولار SA در هفته سوم و چهارم نمونه برداری نسبت به شاهد و سطح ۰/۵ میلی مولار SA وجود داشت (شکل ۸). همچنین، میزان EC در هفته اول محلول پاشی در تیمار شاهد در بالاترین و در سطح ۰/۵ و ۲/۵ میلی مولار SA در کمترین سطح قرار داشت، با این حال روند افزایشی

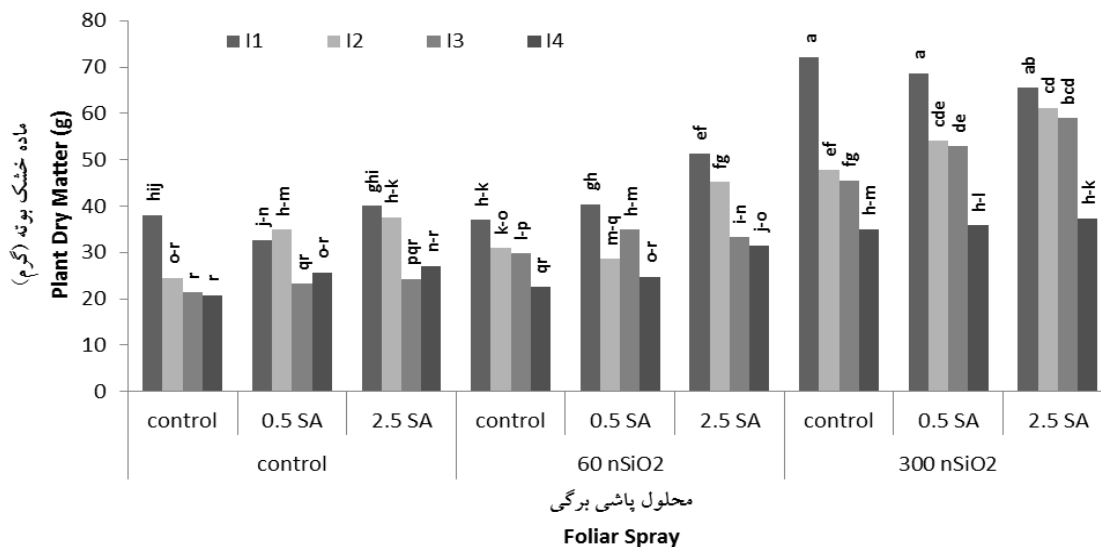


شکل ۸- تغییرات سبزیگی برگ (الف)، حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم دو (ب)، نشت الکترولیت (ج) و محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک (شاهد، ۰/۵ میلی‌مولار و ۲/۵ میلی‌مولار).

Figure 8- Changing of SPADi (a), Fv/Fm (b), electrolyte leakage (c) and relative water content (d) on foliar spray of Salicylic acid (SA.1: control, SA.2: 0.5 mM and SA.3: 2.5 mM) treatments.

آزمایش، محلول‌پاشی nSiO₂ و SA به تنهایی یا توأم در کلیه سطوح محدودیت آب باعث بهبود ماده خشک کلزا بهاره گردید، به طوری که کاربرد بالاترین سطوح محلول‌پاشی nSiO₂ توأم با SA نسبت به شاهد در تیمارهای آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله دانه‌بندی، گلدهی و ساقه‌روی به ترتیب ۴۱/۸، ۶۰، ۶۳/۷ و ۴۴/۲ درصد ماده خشک بوته را افزایش داد. کاربرد سیلیکون و اسید سالیسیلیک باعث حفظ ماده خشک اندام هوایی بالاتر در هر دو شرایط محدودیت و عدم محدودیت آب می‌گردد (۱۱) و (۱۸).

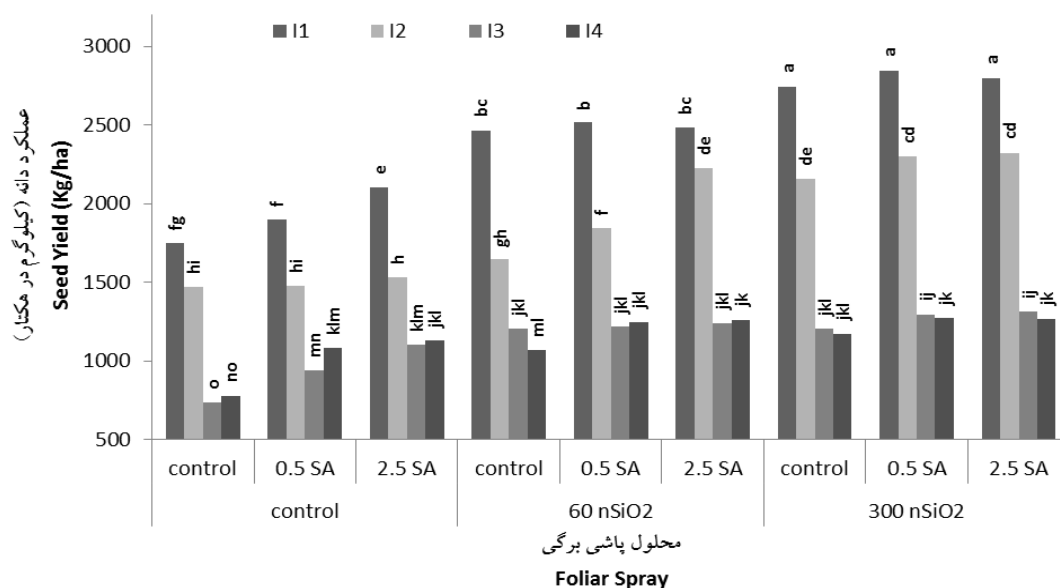
ماده خشک بوته: اثرات اصلی و متقابل سه جانبه فاکتورهای آزمایش بر ماده خشک بوته در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). ترکیبات تیماری آبیاری کامل توأم با محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر nSiO₂ بدون مصرف SA بالاترین میزان ماده خشک بوته (۷۲/۲ گرم) را موجب شد. کم‌ترین میزان این صفت نیز بدون اختلاف معنی‌دار آماری، تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی و گلدهی بدون محلول‌پاشی به‌دست آمد (شکل ۹). اثرات مفید نانوسیلیکون در رشد و نمو گیاهان زراعی (۳۸) به‌ویژه در افزایش ماده خشک تحت شرایط محدودیت آب گزارش شده است (۸). در این



شکل ۹: مقایسه میانگین اثرات متقابل محدودیت آب و محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک بر ماده خشک بوته. Figure 9- Mean comparison interaction effects of water limitation × nSiO₂ × SA on plant dry matter.

پاشی nSiO₂ و SA (به ترتیب با ۷۳۵/۲ و ۷۸۰/۰ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (شکل ۱۰). احمدی و بحرانی (۲۰۰۹) مهم‌ترین عامل در محدود ساختن عملکرد دانه کلزا را محدودیت آب به‌ویژه در مراحل رویشی و ابتدای گلدهی دانستند (۲). اثر مثبت سیلیکون بر عملکرد دانه کلزا در شرایط محدودیت آبیاری توسط محققین گزارش شده است (۸ و ۳۰). کالته و همکاران (۲۰۱۴) بیان داشتند که محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون با افزایش تجمع آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و افزایش کارایی دستگاه‌های فتوسنتزی، رشد و عملکرد گیاهان را بهبود می‌بخشد (۲۰). سیلیکون از طریق کاهش تخریب رنگدانه‌ها و افزایش فتوسنتز منجر به بهبود عملکرد دانه در کلزا به‌ویژه در شرایط محدودیت آبی می‌گردد (۸).

عملکرد دانه: اثر محدودیت آب، محلول پاشی nSiO₂ و SA بر عملکرد دانه کلزای بهاره معنی‌دار شد. همچنین، اثرات متقابل فاکتورهای آزمایش نیز روی این صفت به لحاظ آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بالاترین عملکرد دانه (۲۸۴۷/۳) کیلوگرم در هکتار) تحت شرایط آبیاری کامل (شاهد) توأم با محلول پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر nSiO₂ و ۰/۵ میلی‌مولار SA بدست آمد، هرچند به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با مصرف ۲/۵ میلی‌مولار SA و یا عدم مصرف آن نشان نداد. ترکیب تیماری آبیاری کامل با محلول پاشی توأم ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر nSiO₂ و ۰/۵ میلی‌مولار SA نیز به دنبال ترکیبات تیماری برتر و با اختلاف معنی‌دار قرار گرفت. کمترین عملکرد دانه نیز متعلق به تیمار قطع آبیاری در مرحله گلدهی و ساقه‌روی بدون محلول



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثرات متقابل محدودیت آب و محلول پاشی نانودی اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه.

Figure 10- Mean comparison interaction effects of water limitation × nSiO₂ × SA on seed yield.

وجود ندارد (۶).

ضرایب همبستگی: براساس ضرایب حاصل از تجزیه پیرسون، بین سبزیگی برگ (شاخص SPAD) و سایر خصوصیات فیزیولوژیک و همچنین، ماده خشک و عملکرد دانه رابطه معنی دار مشاهده نشد. با این حال همبستگی بین عملکرد کوانتومی (Fv/Fm) با نشت الکترولیت‌ها از غشا (EC) منفی و معنی دار و با محتوای نسبی آب برگ (RWC) و عملکرد دانه مثبت و معنی دار بود. ارتباط منفی و معنی دار بین EC با RWC، ماده خشک و عملکرد دانه وجود داشت، با این حال همبستگی بین RWC با ماده خشک و عملکرد دانه مثبت و معنی دار بود. ماده خشک بوته همبستگی مثبت و معنی داری با عملکرد دانه نشان داد (جدول ۳).

محلول پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط محدودیت آب به واسطه تجمع مقادیر بالاتر از اسمولیت‌ها، ترگر را حفظ و منجر به بهبود عملکرد می‌شود (۱). برخی محققین دریافتند که SA با تأثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه، سبب افزایش عملکرد کلزا شد (۲۲) و مشخص شد که هنگام محلول پاشی nSiO₂ بویژه در مقادیر بالا، کاربرد SA توانست تأثیر معنی دار روی این صفت داشته باشد، با این حال محلول پاشی اسید سالیسیلیک به تنهایی در مقایسه با عدم محلول پاشی باعث بهبود ۱۶/۹ و ۳۱/۰ درصد عملکرد دانه به ترتیب در تیمار آبیاری کامل و قطع آبیاری در مرحله ساقه‌روی شد. اگرچه اثر تعدیل کنندگی SA مورد پذیرش کلی قرار گرفته، ولی هنوز در مورد غلظت بهینه برای محلول پاشی آن اتفاق نظر

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه در گیاه کلزای بهاره.

Table 3- Correlation coefficient between physiological and seed yield of spring rapeseed.

شاخص سبزیگی برگ SPAD	شاخص سبزیگی برگ SPAD	حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسنتز Fv/Fm	نشت الکترولیت Electrolyte Leakage	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	ماده خشک بوته Plant dry matter
شاخص سبزیگی برگ SPAD	1				
حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسنتز Fv/Fm	- 0.28 ^{ns}	1			
نشت الکترولیت Electrolyte Leakage	0.05 ^{ns}	- 0.75 ^{**}	1		
محتوای نسبی آب برگ Relative water content	- 0.27 ^{ns}	0.81 ^{**}	- 0.89 ^{**}	1	
ماده خشک بوته Plant dry matter	- 0.01 ^{ns}	0.32 ^{ns}	- 0.75 ^{**}	0.68 ^{**}	1
عملکرد دانه Seed yield	- 0.28 ^{ns}	0.69 ^{**}	- 0.86 ^{**}	0.83 ^{**}	0.75 ^{**}

ns, * و ** به ترتیب نشان‌دهنده غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

ns, *, and ** indicate the non-significant differences and significant differences at the probability level of 5% and 1%, respectively.

شاخص SPAD و نفوذپذیری نسبی غشا با RWC و عملکرد دانه رابطه منفی و معنی‌دار مشاهده شد (۴۲). طی آزمایشی همبستگی منفی و معنی‌دار بین شاخص SPAD و RWC در نمونه‌برداری اول بعد از اعمال تنش محدودیت آب مشاهده شد. نشت الکترولیت نیز ارتباط منفی و معنی‌دار با عملکرد دانه داشت، اما محتوای نسبی آب برگ همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه نشان داد (۲۶) که با یافته‌های این آزمایش مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

به دلیل توسعه کمتر برگ در شرایط محدودیت آب، احتمال قرائت میزان SPAD بالاتر نسبت به شرایط آبیاری کامل وجود دارد، با این حال تغییرات خصوصیات فیزیولوژیک در پاسخ به سطوح مختلف محدودیت آب متفاوت بود. محلول‌پاشی نانودی

عدم ارتباط معنی‌دار بین شاخص SPAD با محتوای نسبی آب، عملکرد کوانتومی و عملکرد دانه می‌تواند در نتیجه بالاتر بودن مقادیر قرائت شده از آن در شرایط محدودیت آب و پایین بودن مقادیر این صفات تحت این شرایط باشد. با این حال در شرایط عدم محدودیت آب، به دلیل مناسب بودن روابط آبی گیاه، فرآیندهای فتوسنتزی و جذب نیز بهبود یافته و این امر منجر به افزایش ماده خشک و عملکرد نهایی می‌گردد که نتیجه آن وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین Fv/Fm و RWC با عملکرد دانه می‌باشد. از طرفی، افزایش نشت الکترولیت به معنی نقص در پایداری و نفوذپذیری نسبی غشا و در نتیجه کاهش جذب عناصر و آب می‌باشد که این امر اثر مستقیم بر کاهش ماده خشک و تولید نهایی می‌تواند داشته باشد. در مطالعه‌ای روی گیاه کلزا بین محتوای نسبی آب برگ با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار و بین

محدودیت آب بود. با این حال، مشخص شد که محلول پاشی $nSiO_2$ در مقادیر بالا موجب خنثی سازی اثر SA روی عملکرد دانه می گردد. همچنین، مشخص شد که بین نسبت Fv/Fm با RWC و عملکرد دانه ارتباط مثبتی وجود دارد.

اکسید سیلیکون و اسید سالیسیلیک در کلیه سطوح آبیاری اثر مثبت بر خصوصیات فیزیولوژیک در گیاه کلزا نشان دادند. افزایش عملکرد کواتومی فتوسیستم II، بهبود محتوای رطوبت نسبی و کاهش نشت الکترولیت از اثرات مثبت محلول پاشی $nSiO_2$ به صورت تنها و یا توأم با SA به ویژه در شرایط

منابع

- Ahmad, M.A., Murali, P.V., and Marimuthu, G. 2014. Impact of salicylic acid on growth, photosynthesis and compatible solute accumulation in *Allium Cepa* L. subjected to drought stress. *Inter. J. Agri & Food Sci.* 4: 1. 22-30.
- Ahmadi, M., and Bahrani, M.J. 2009. Yield and yield components of rapeseed as influenced by water stress at different growth stages and nitrogen levels. *Am-Eur. J. Agric. Environ. Sci.* 5: 6. 761-775.
- Ahmed, M., Ul-Hassen, F., and Khurshid, Y. 2011. Does silicon and irrigation have impact on drought tolerance mechanism of sorghum? *Agri. Water Man.* 98: 12. 1808-1812.
- Arouiee, H., Nasser, M., Neamati, H., and Kafi, M. 2012. Effect of silicon on salinity tolerance in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Agron. J. (Pajouhesh & Sazandegi).* 27: 104. 165-172.
- Asensi-Fabado, M., and Munne-Bosch, S. 2011. The aba3-1 mutant of *Arabidopsis thaliana* withstands moderate doses of salt stress by modulating leaf growth and salicylic acid levels. *J Plant Growth Regul.* 30: 456-466.
- Ashraf, M., and Harris, P.J.C. 2013. Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica.* 51: 2. 163-190.
- Assefa, Y., Vara-Prasad, P.V., Foster, C., Wright, Y., Young, S., Bradley, P., Stamm, M., and Ciampitti, I.A. 2017. Major management factors determining spring and winter canola yield in North America. *Crop Sci.* 58: 1-16.
- Bybordi, A. 2016. Influence of zeolite, selenium and silicon upon some agronomic and physiologic characteristics of canola grown under salinity. *Comm. Soil Sci. Plant Analysis.* 47: 7. 832-850.
- Farhoudi, R., Hussain, M., and Lee, D.J. 2012. Modulation of enzymatic antioxidants improves the salinity resistance in canola (*Brassica napus* L.). *Inter. J. Agric. Bio.* 14: 3. 465-468.
- Guntzer, F., Keller, CA., and Meunier, J.D. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review, *Agron. Sustain. Dev.* 32: 1. 201-213.
- Habibi, G. 2015. Contrastive response of *Brassica napus* L. to exogenous salicylic acid, selenium and silicon supplementation under water stress. *Arch. Biol. Sci. Belgrade.* 67: 2. 397-404.
- Hassibi, S., Farahbakhsh, H., and KhajooiNezhad, Gh.R. 2016. The effect of silicon on some Morpho-physiologicla characteristics and grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under salt stress. *Iranian J. Field Crops Res.* 14: 3. 503-513. (In Persian)
- Hayat, S., Hasan, S.A., Yusuf, M., Hayat, Q., and Ahmad, A. 2010. Effect of 28-homobrassinolide on photosynthesis, fluorescence and antioxidant system in the presence or absence of salinity and temperature in *Vigna radiate*. *Environ. Exp. Bot.* 69: 105-112.
- Jabbari, H. 2014. Identification of water deficit tolerance mechanisms in vegetative and reproductive stages in rapeseed (*Brassica napus* L.). A thesis for the degree of Ph.D in Agronomy (Crop Physiology). Department of Agronomy and Plant Breeding College of Aburairhan. Thehran. Iran. 175 p. (In Persian)

15. Janmohammadi, M., Amanzadeh, T., Sabaghnia, N., and Ion, V. 2016. Effect of nano-silicon foliar application on safflower growth under organic and inorganic fertilizer regimes. *Botanica Lithuanica*. 22: 1. 53- 64.
16. Janmohammadi, M., Yousefzadeh, S., Dashti, Sh., and Sabaghnia, N. 2017. Effects of exogenous application of nano particles and compatible organic solutes on sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Botanica Serbica*. 41: 1. 37-46.
17. Jones, C., and Olson-Rutz, K. 2016. Soil nutrient management for canola. EB0224. Montana State Univ. Ext., Bozeman, MT.
18. Kadioglu, A., Saruhan, N., Saglam, A., Terzi, R., and Acet, T. 2011. Exogenous salicylic acid alleviates effects of long term drought stress and delays leaf rolling by inducing antioxidant system. *Plant Growth. Regul.* 64: 27-37.
19. Kalantar Ahmadi, S.A., Ebadi, A., Daneshian, J., Siadat, S.A., and Jahanbakhsh, S. 2017. Effect of drought stress and foliar application of growth regulators on photosynthetic pigments and seed yield of rapeseed (*Brassica napus* L. cv. Hyola 401. *Iranian J. Crop Sci.* 18: 3. 196-217. (In Persian)
20. Kalteh M., Alipour Z.T., Ashraf S., Aliabadi M.M., and Nosratabadi A.F., 2014: Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress. *J. Chem. Health Risks.* 4: 3. 49-55.
21. Karunakaran G., Suriyaprabha R., Manivasakan P., Yuvakk Umar R., Rajendran V., Prabu P., and Kannan N. 2013. Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination. *IET Nano biotechnol.* 7: 3. 70-77.
22. Keshavarz, H., and Modarres Sanavy, S.A.M. 2014. Effect of salicylic acid on chlorophyll, some growth characteristics and yield of two canola varieties. *EJCP.* 7: 4. 167-178. (In Persian)
23. Khan M.A., Ashraf, M.Y., Mujtaba, S.M., Shirazi, M.U., Khan, M.A., Shereen, A., Mumtaz, S. Siddiqui, M.A., and Kaler, G.M. 2010. Evaluation of high yielding canola type brassica Genotypes/ mutants for drought tolerance using Physiological indices as screening tool. *Pak J. Bot.* 42: 6. 3807-3816.
24. Kocheva, K., Lambrev, P., Georgiev, G., Goltsev, V., and Karabaliev, M. 2004. Evaluation of chlorophyll fluorescence and membrane injury in the leaves of barley cultivars under osmotic stress. *Bio Electrochem.* 63: 121- 124.
25. Liang, Y., Zhu, Y. and Christie, P. 2006. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A Review. *Environ Pollut.* 147: 2. 422-428.
26. Moosavifar, B.E., Behdani, M.A., Jami Alahmadi, M., and Hosaini Bojd, M.S. 2012. Changes of chlorophyll index (SPAD), relative water content, electrolyte leakage and seed yield in spring safflower genotypes under irrigation termination. *Iran J. Field Crops Res.* 9: 3. 525-534. (In Persian)
27. Murchie, E.H., and Lawson, T. 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *J. Exp Bot.* 64: 13. 3983-3998.
28. Oweis, T., and Hachum, A. 2012. Supplemental irrigation, a highly efficient water-use practice. *ICARDA, Aleppo, Syria.* IV + 28 p.
29. Pask, A.J.D., Pietragalla, J., and Mullan, Reynolds, M.P. 2012. Physiological breeding II: A field guide to wheat phenol-typing. Mexico, DF: international wheat and maize improvement Centre (CIMMYT). IV, 132 p.
30. Pei, Z.F., Ming, D.F., Liu, D., Wan, G.L., Geng, X.X., Gong, H.J., and Zhou, W.J. 2010. Silicon improves the tolerance of water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *J. Plant Growth Reg.* 29: 106-115.
31. Rashidi, S., Shirani Rad, A.H., Ayene B., and A., Javidfar, F., and Lak, S. 2012. Study of relationship between droughts stresses tolerances with some physiological parameters in canola genotypes (*B. napus* L.). *Ann. Bio. Res.* 3: 1. 564-569.
32. Raza M.A.S., Shahid, A.M., Saleem M.F., Khan, I.H., Ahmad, S., Ali, M.,

- and Iqbal, R. 2017. Effects and management strategies to mitigate drought stress in oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. *Zemdirbyste-Agric.* 104: 1. 85-94.
33. Ruelland, E., Pokotylo, I., Djafi, N., Cantrel, C., Repellin, A., and Zachowski, A. 2014. Salicylic acid modulates levels of phosphoinositide dependent-phospholipase C substrates and products to remodel the Arabidopsis suspension cell transcriptome. *Plant Sci.* 5: 608. 1-19.
34. Sabaghnia, N., Janmohammadi, M., and Mohebodini, M. 2017. GGE-Biplot Analysis of Nano-Titanium Dioxide and Nano-Silica Effects on Sunflower. *Inter. J. Bio. Biom. Agri. Food. Bio. Eng.* 11: 7. 457-460.
35. Sairam, R.K., and Srivastava, G.C. 2001. Water stress tolerance of wheat *Triticum aestivum* susceptible genotypes. *J. Agro. Crop Sci.* 186: 1. 63-70.
36. Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., Ying, Q., and Qian, Q. 2006. Effects of different treatments of salicylic acid on heat tolerance, chlorophyll fluorescence and antioxidant enzyme activity in seedlings of *Cucumis sativa* L. *Plant Growth Reg.* 39: 137-141.
37. Shirani Bidabadi, S., Mahmood, M., Baninasab, B., and Ghobadi, C. 2012. Influence of salicylic acid on morphological and physiological responses of banana (*Musa acuminata* cv. 'Berangan') shoot tips to in vitro water stress induced by polyethylene glycol. *Plant Osmotic J.* 5: 1. 33-39.
38. Siddique, Z.S., Ajmal Khan, M., Gikim, B., and Hunag, J.S. 2008. Physiological responses of brassica napus genotypes to combines drought and salt stress. *Plant Stress.* 2: 1. 78-83.
39. Siddiqui M.H., Al-Whaibi M.H., Firoz M., and Al- Khaishany M.Y. 2015. Role of Nanoparticles in plants. In: *Nanotechnol. Plant Sci.* 2: 19- 35.
40. Takahashi, S., and Murata, N. 2008. How do environmental stresses accelerate photo inhibition? *Trends in Plant Sci.* 13: 4. 178-182.
41. Ullah F., Bano A., and Nosheen A. 2012. Effects of plant growth regulators on growth and oil quality of canola (*Brassica napus* L.) under drought stress. *J. Bot.* 44: 6. 1873-1880.
42. Wang, L.J., Fan, L., Loescher, W., Duan, W., Liu, G.J., and Cheng. J.S. 2010. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. *BMC Plant Biol.* 10: 34. 2-10.
43. Yousefi, F., Hassibi, P., Roshanfekar, H., and Meskarbashee, M. 2015. Study of drought and salinity stress effect on some physiological characters of two canola (*Brassica napus* L.) varieties in Ahvaz. *J. Plant Pro.* 38: 4. 25-34. (In Persian)