

اثر اسید سالیسیلیک بر برخی صفات آگروفیزیولوژیک و بیوشیمیایی ژنوتیپ‌های سویا در شرایط تنش کم‌آبی

نسرین رزمی^{۱*}، علی عبادی^۲، جهانفر دانشیان^۳ و سدابه جهانبخش^۴

(۱) بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل (پارس آباد مغان)، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پارس آباد، ایران.

(۲ و ۴) گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۳) سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: n.razmi@areeo.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

چکیده

به منظور بررسی اثر کاربرد اسید سالیسیلیک در ایجاد مقاومت به تنش کم‌آبی، پژوهشی در مزرعه‌ی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مغان به صورت اسپلیت فاکتوریل در سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی تیمارهای آبیاری براساس تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، در سه سطح آبیاری پس از ۱۰۰، ۱۳۵ و ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر (به ترتیب شرایط بدون تنش، تنش متوسط و تنش شدید کم-آبی) و تیمارهای فرعی شامل ژنوتیپ‌های سویا (Williams، L17 و D42X19) و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در سه سطح (صفر، ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار) بود. نتایج تجزیه مرکب نشان داد تنش کم‌آبی ارتفاع بوته، تعداد گره در ساقه، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی را در ژنوتیپ‌های سویا به طور معنی‌داری کاهش داد. میزان کاهش عملکرد دانه ۳۸ درصد در تنش متوسط و ۴۶ درصد در تنش شدید نسبت به تیمار عدم تنش بود. کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک موجب بهبود صفات فوق‌بخصوص در ژنوتیپ Williams شد. افزایش فواصل آبیاری و کاربرد اسید سالیسیلیک بویژه در غلظت ۰/۴ میلی‌مولار موجب افزایش میزان غلظت اسید-های آمینه لیزین و متیونین شد. بیشترین میزان لیزین در ژنوتیپ Williams در شرایط تنش شدید و بیشترین میزان متیونین در ژنوتیپ D42X19 در شرایط تنش متوسط مشاهده شد. بیشترین فعالیت آنزیم‌های پلی‌فنل اکسیداز در ژنوتیپ D42X19 و بالاترین میزان فعالیت آنزیم گلوکاتایون رداکتاز در ژنوتیپ Williams در شرایط تنش کم‌آبی شدید مشاهده گردید و محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک (۰/۴ میلی‌مولار) موجب افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در شرایط بدون تنش و در شرایط تنش خشکی شد. تشدید تنش و کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش تجمع فلاونوئید در همه ژنوتیپ‌ها و به خصوص در ژنوتیپ L17 شد. در این بررسی ژنوتیپ Williams به دلیل افزایش غلظت تری‌هالوز، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بهتر و عملکرد دانه بیشتر نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها (۱۲ درصد عملکرد دانه بیشتر نسبت به ژنوتیپ L17 و ۶ درصد نسبت به ژنوتیپ D42X19) حساسیت کمتری به تنش خشکی نشان داد و کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط بدون تنش و تنش موجب افزایش عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های سویا شد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌فنل اکسیداز، تری‌هالوز، فلاونوئید و گلوکاتایون رداکتاز.

مقدمه

سویا (*Glycine max* L.) با داشتن ۲۰ درصد روغن با کیفیت و ۴۰ درصد پروتئین بیش‌تر یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغن به‌شمار می‌رود. سطح زیر کشت سویا در ایران حدود ۱۰۰ هزار هکتار می‌باشد و دشت مغان پس از استان مازندران در رتبه دوم تولید این محصول کلیدی قرار دارد. قسمت عمده تولید سویا در دشت مغان به صورت کشت دوم و پس از برداشت گندم انجام می‌شود. در سال‌های اخیر علی‌رغم تقاضای روز افزون برای تولید سویا، سطح زیر کشت این محصول به دلیل وقوع خشکسالی‌های اخیر کاهش یافته است (رزمی، ۱۴۰۱).

خشکسالی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی است، خشکی بر روند رشد، فتوسنتز، تنفس متابولیسم مواد پرورده، تولید عملکرد اقتصادی و سایر فعالیت‌های فیزیولوژیکی اثر می‌گذارد. در پاسخ به تنش خشکی، گیاهان مکانیسم‌های پاسخ به خشکی متعددی مانند تغییرات مورفولوژی و ساختاری، بیان ژن‌های مقاومت به خشکی، سنتز هورمون‌های القای تحمل به تنش، تولید متابولیت‌های ثانویه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و انباشت اسمولیت‌های متعدد را فعال می‌کنند (Demirelet *et al.*, 2020). در شرایط تنش خشکی میزان گونه‌های اکسیژن فعال مانند آنیون سوپراکسید ($O_2^{\bullet-}$)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، رادیکال هیدروکسیل ($HO^{\bullet}$) و اکسیژن منفرد (1O_2) که برای سلول‌ها سمی هستند به شدت افزایش می‌یابد و از طریق اختلال در سیستم انتقال الکترون و اکسیداسیون متابولیت‌ها عموماً در کلروپلاست‌ها، میتوکندری‌ها و میکروبادی‌ها موجب آسیب جدی به ساختار سلولی و ماکرومولکول‌ها و مهار نوری دستگاه فتوسنتزی می‌شود (Yang *et al.*, 2021). گونه‌های اکسیژن فعال عموماً توسط دو مسیر آنزیمی و غیرآنزیمی در سلول‌ها سم‌زدایی می‌شوند (Yang *et al.*, 2021). سیستم آنزیمی آنتی‌اکسیدان شامل آنزیم‌های چرخه آسکوربات-گلوتاتیون، مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز می‌باشد که در کلروپلاست‌ها و در سیتوزول موجب حذف گونه‌های اکسیژن فعال می‌گردد (Zhang *et al.*, 2018).

تنظیم اسمزی یک استراتژی مهم در گیاهان برای کاهش پتانسیل اسمزی در شرایط خشکی می‌باشد. تنظیم اسمزی به سه روش کاهش آب درون سلولی، کاهش حجم سلول و افزایش محتویات سلولی انجام می‌شود. تنظیم اسمزی به حفظ اختلاف پتانسیل آب بین داخل و خارج سلول کمک کرده و در نتیجه جذب آب، تورژسانس سلول، فتوسنتز و رشد در شرایط کم‌آبی ادامه پیدا می‌کند (Anjum *et al.*, 2017). گیاهان مختلف با انباشت اسمولیت‌های متعدد در برابر اثر مخرب تنش‌های غیرزیستی از خود محافظت می‌کنند. تری‌هالوز یک قند غیراحیا است که در باکتری‌ها، مخمرها و در گیاهان یافت می‌شود و توانایی بسیار خوبی در بهبود تحمل به خشکی از طریق کاهش پتانسیل اسمزی و حفظ غشای سلولی، تنظیم روابط آبی گیاه، تنظیم روزنه، فعالیت‌های فتوسنتزی، جذب مواد مغذی، تجمع اسمولیت‌ها، فعال‌کننده

پروتئین‌های استرس و کاهش آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی دارد (Sadak, 2019). از سازوکارهای مهم مدیریت زراعی جهت کاهش خسارت ناشی از کمبود آب و بهبود فعالیت‌های متابولیکی گیاهان، کاربرد مواد تنظیم‌کننده رشد می‌باشد. اسید سالیسیلیک یک ترکیب فنلی بوده و توسط سلول‌های ریشه تولید می‌شود و نقش محوری در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف مثل تحریک جوانه زنی، رشد و نمو گیاه، جذب یون‌ها و فتوسنتز داشته، تقسیم و مرگ سلولی را تنظیم کرده و در واقع بین رشد و پیری تعادل ایجاد می‌نماید و با ایجاد توازن در غلظت هورمون‌های گیاهی در کنترل پاسخ‌های گیاه در شرایط تنش‌های زنده و غیر زنده نقش مهمی دارد (González-Villagra et al., 2022). اسید سالیسیلیک سبب بهبود جذب عناصر غذایی مانند فسفر، کلسیم، پتاسیم و منیزیم و و حفظ انسجام و یکپارچگی غشای سلولی در شرایط تنش کم‌آبی شده که این خود می‌تواند موجب کاهش اثر تنش در رشد بیولوژیکی سویا باشد (Razmi et al., 2017). در محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی به ویژه غلظت کلروفیل‌های a و b، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه در گیاه سویا نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی افزایش یافت (رزمی و همکاران، ۱۳۹۸). کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش ۶۰ درصدی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند پلی فنل اکسیداز و گلوکاتیون رداکتاز و افزایش ۳۰ درصدی فلاونوئید، در بافت برگ در شرایط تنش خشکی گردید (González-Villagra et al., 2022). مطابق گزارش محققین اسید سالیسیلیک موجب افزایش غلظت اسیدهای آمینه لیزین و متیونین در شرایط تنش شوری در گیاه سویا شد (Farhangi-Abriz and Ghassemi-Golezani, 2016). همچنین تیمار بذری با اسید سالیسیلیک موجب کاهش اثرات مخرب تنش گرمایی و افزایش غلظت تری‌هالوز در سیتوسل برگ‌ها شد (Zhang et al., 2023). هدف اصلی از اجرای این آزمایش بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در برخی از سازوکارهای تحمل به تنش خشکی در ژنوتیپ‌های سویا و امکان کاهش میزان خسارت ناشی از این محلول‌پاشی در شرایط تنش کم‌آبی می‌باشد.

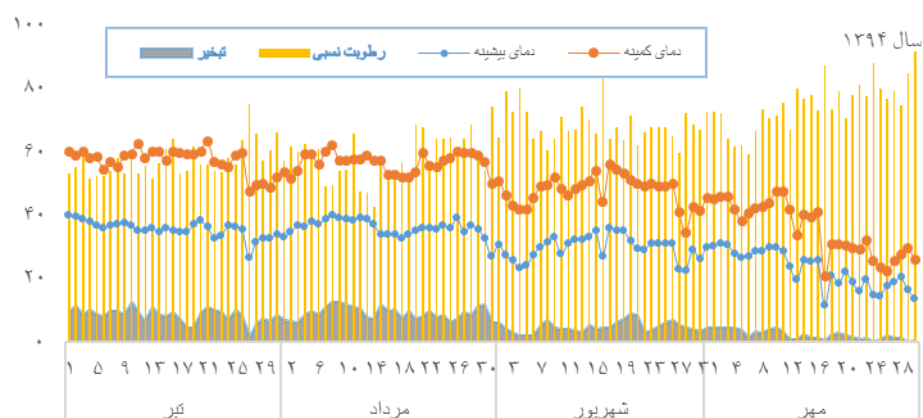
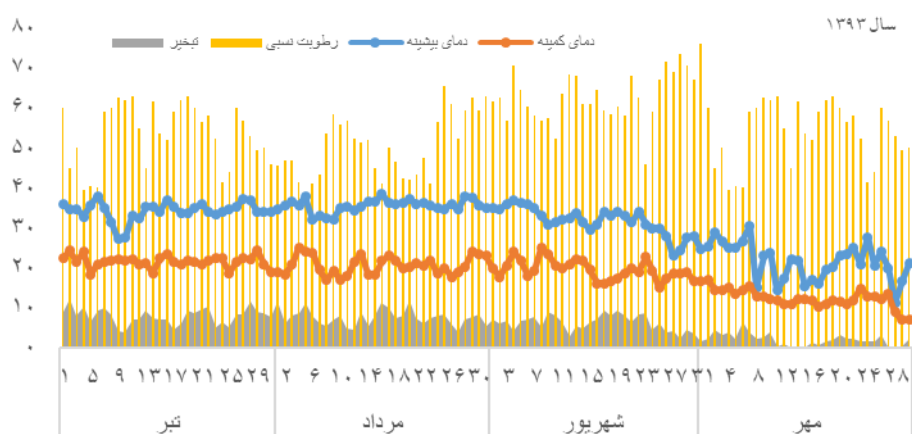
مواد و روش‌ها

این آزمایش در طی دو سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل واقع در دشت مغان با مشخصات عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۶۰ متر از سطح دریا به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش در جدول ۱ و مشخصات هواشناسی منطقه مغان در طی سال‌های مورد آزمایش در نمودار ۱ نشان داده شده است. سه سطح آبیاری شامل ۱۰۰ (بدون تنش)، ۱۳۵ (تنش متوسط) و ۱۷۰ (تنش شدید) میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A در کرت‌های اصلی و ترکیب سه ژنوتیپ سویا

(D42X19, L17, Williams) و سه سطح محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک (صفر، ۰/۴ و ۰/۸ میلی‌مولار) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. تیمار اول آبیاری براساس نیاز آبی سویا (Ritchie *et al.*, 1990) و تیمارهای بعدی به‌منظور مطالعه اثرات تنش کم‌آبی بر خصوصیات فیزیولوژیک و عملکرد دانه ژنوتیپ‌های سویا انتخاب گردید. ژنوتیپ‌های مورد مطالعه سویا در این بررسی همگی متعلق به گروه رشدی ۳ بوده و دارای عادت رشدی نامحدود می‌باشند.

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

هدایت الکتریکی	اسیدیته خاک	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	رس	سیلت	شن	بافت خاک
(دسی‌ژمنس بر متر)		(میلی‌گرم در کیلوگرم)	(میلی‌گرم در کیلوگرم)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(درصد)	
۱/۹	۸/۱	۴۱۷	۲۰	۰/۰۱	۳۷	۲۷	۳۶	لوم رسی



شکل ۱: آمار هواشناسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) در طی ماه‌های رشد سویا

در سال زراعی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴

تاریخ کاشت در هر دو سال آزمایش اول تیر ماه بود. هر کرت آزمایشی دارای چهار خط به طول پنج متر با فاصله خطوط کشت ۶۰ سانتی متر و تراکم ۴۵ بوته در متر مربع بود. پس از تلقیح بذور با باکتری *Bradyrhizobium japonicum* کاشت به صورت جوی و پشت به دست و در تراکم زیاد انجام گردید. پس از رفع عوامل نامساعد محیطی در دو مرحله چهار و شش برگی تنک انجام شد. اعمال تیمار آبیاری پس از سبز شدن ژنوتیپ‌های سویا در مرحله V2 (توسعه اولین برگ سه برگچه‌ای بر روی دومین گره) و تیمار محلول پاشی اسید سالیسیلیک در دو مرحله V2 و مرحله R1 (شروع گلدهی) در سه غلظت (صفر، ۰/۴ و ۰/۸ میلی مولار) به صورت اسپری با استفاده از سم پاش (Solo 451, Germany) بر روی برگ‌ها انجام گردید. اسید سالیسیلیک در متانول حل شده و تیمار صفر شامل محلول پاشی با آب مقطر بود.

تهیه عصاره برگ

برای تهیه عصاره خام برگ دو گرم از بافت برگ (سومین برگ چه تکامل یافته انتهایی) در ابتدای مرحله غلاف بندی با ۲۰ میلی لیتر متانول ۸۰ درصد با نمونه مخلوط شد و به مدت ۱۲ ساعت در شیکر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه تکان داده شد، سپس با کاغذ صافی واتمن شماره ۱ در دمای اتاق فیلتر شد.

اندازه‌گیری آنزیم پلی فنل اکسیداز

برای اندازه‌گیری آنزیم پلی فنل اکسیداز (EC 1.14.18.1)، ۲۰۰ میکرولیتر عصاره برگ با ۲۸۰۰ میکرولیتر محلول کاتکول (۲۰ میلی مولار) در حضور بافر فسفات سدیم ۰/۱ مولار (pH = 6.8) مخلوط شد. سپس افزایش جذب در طول موج ۴۰۰ نانومتر به مدت ۳ دقیقه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر SmartSpec Plus از کمپانی بایورد قرائت شد (Jiang et al., 2002).

اندازه‌گیری آنزیم گلوکاتایون رداکتاز

برای اندازه‌گیری آنزیم گلوکاتایون رداکتاز (EC 1.6.4.2) به ۲۰۰ میلی لیتر عصاره برگ، مخلوط واکنش شامل ۱/۵ میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم ۰/۱ مولار (pH=7)، ۱۵۰ میلی لیتر گلوکاتایون اکسید شده (۲۰ GSSG میلی مولار)، ۱۵۰ میلی لیتر NADPH ۲ میلی مولار (محلول در بافر Tris-HCl، pH = 7) و ۱ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد. پس از اضافه کردن آنزیم، مخلوط واکنش کاملاً به هم زده شد. سپس کاهش جذب در طول موج ۳۴۰ نانومتر به دلیل اکسیداسیون NADPH به مدت ۱۲۰ ثانیه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. ضریب جذب ۶/۲ میلی مولار در سانتی متر در نظر گرفته شد (Sofa et al., 2005).

اندازه‌گیری تری هالوز

برای اندازه‌گیری تری هالوز یک گرم از عصاره برگ در پنج میلی لیتر اتانول ۸۰ درصد حجمی با سرعت ۱۱۵۰۰ دور در

دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه هموژن و سانتریفیوژ شد. محلول شناور رویی برداشت و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس در پنج میلی‌لیتر آب مقطر مجدداً تعلیق شد. ۱۰۰ میکرولیتر از این محلول با ۱۵۰ میکرولیتر اسید سولفوریک ۰/۲ نرمال مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده شد. تا مولکول‌های ساکاروز و فسفات گلوکز موجود هیدرولیز شوند. محلول حاصل بلافاصله روی یخ سرد شد. ۱۵۰ میکرولیتر هیدروکسید سدیم ۰/۶ نرمال به محلول فوق اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده و سپس خنک شد. به محلول فوق دو میلی‌لیتر معرف آنترون (۰/۲ گرم آنترون در ۱۰۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۹۵ درصد) اضافه و دوباره به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده و پس از تغییر رنگ سرد شد. جذب در ۶۳۰ نانومتر ثبت شد. غلظت تری‌هالوز هر نمونه با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه شد (Li *et al.*, 2014).

اندازه‌گیری غلظت کل فلاونوئیدها

برای اندازه‌گیری غلظت کل فلاونوئیدها، ۲۵۰ میکرولیتر عصاره برگ با ۱/۲۵ میلی‌لیتر آب و ۷۵ میکرولیتر نیتريت سدیم پنج درصد حجمی مخلوط شد. محلول فوق شش دقیقه در دمای اتاق نگهداری شده و سپس ۱۵۰ میکرولیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد حجمی، ۰/۵ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۱ مولار و ۲۷۵ میکرولیتر آب مقطر اضافه شد. میزان جذب در طول موج ۵۱۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. برای رسم منحنی کالیبراسیون از جذب شناخته غلظت کاتچین استفاده شد (Zhishen *et al.*, 1999).

اندازه‌گیری میزان لیزین و میتونین

برای اندازه‌گیری میزان لیزین و میتونین در بوته‌های سویا، ۰/۵ گرم از بافت برگ از آخرین برگ‌چه انتهایی در ابتدای شروع مرحله غلاف بندی در هاون به همراه ۵۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک ۰/۱ نرمال خوب سائیده و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی-لیتر رسانده و از صافی عبور داده شد. جهت استخراج لیزین محلول به دست آمده را با نیم میلی‌لیتر گلیسرول (۵۰ درصد)، ۲ میلی-لیتر بافر فسفات (pH=6) و ۱ میلی‌لیتر نین‌هیدرین مخلوط کرده، در آب جوش ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد. میزان جذب در ۵۷۰ نانومتر قرائت گردید.

جهت استخراج میتونین ۱۰ میلی‌لیتر از محلول صاف شده در قسمت بالا با ۴ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید (۵ نرمال)، ۲ میلی-لیتر محلول گلیسین آبدار (۵۰ درصد)، محلول سدیم نیتروفری‌سیانید آبدار (۰/۱ درصد) مخلوط شده و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و بعد از آن به مدت ۵ دقیقه به حمام یخ منقل گردید. به محلول حاصل ۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک‌اسید (۱:۱) اضافه و میزان جذب آن در ۵۱۰ نانومتر خوانده شد (Losak *et al.*, 2010).

شاخص کلروفیل

شاخص کلروفیل با دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD-502، مینولتای ژاپن) بعد از اعمال تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی، در شروع مرحله غلاف بندی از سه نقطه مختلف برگ اندازه‌گیری و میانگین این سه نقطه به عنوان شاخص کلروفیل در نظر گرفته شد.

برای اندازه‌گیری عملکرد دانه، پس از رسیدگی کامل غلاف‌ها (قهوه‌ای شدن حدود ۹۵ درصد آن‌ها) در هر تیمار آزمایشی، بوته‌های دو ردیف میانی با حذف حاشیه از ابتدا و انتهای هر ردیف، به مساحت یک متر مربع برداشت و با کمباین آزمایشات کوبیده شد. عملکرد بر حسب کیلوگرم در هکتار بر اساس ۱۲ درصد رطوبت وزنی دانه محاسبه شد، رطوبت دانه‌ها با دستگاه رطوبت سنج دستی (SIMPAT) اندازه‌گیری شد.

تجزیه‌ی آماری پس از ارزیابی همگنی واریانس خطاهای آزمایشی، به‌وسیله نرم افزار SAS انجام گردید و مقایسه میانگین‌ها نیز با روش حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel انجام گردید.

نتایج و بحث

از آنجا که اثر متقابل سال در آبیاری و سال در ژنوتیپ و اثر سه جانبه سال در آبیاری در ژنوتیپ برای صفات مورد بررسی معنی‌دار نبود، بنابراین از میانگین دو ساله این صفات جهت مقایسه و بررسی استفاده شد.

لیزین و متیونین

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تیمار آبیاری با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ژنوتیپ بر میزان لیزین معنی‌دار بود (جدول ۲). با توجه به شکل (۲-۲) A) تشدید تنش و کاربرد اسید سالیسیلیک به‌ویژه در غلظت ۰/۴ میلی‌مولار موجب افزایش میزان لیزین شد. بیش‌ترین میزان لیزین (۲/۸ در گرم وزن تر) در ژنوتیپ Williams با محلول‌پاشی ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در شرایط تنش شدید اختصاص داشت و کم‌ترین میزان لیزین (۱/۴ میکروگرم در گرم وزن تر) نیز در تیمار آبیاری پس از ۱۳۵ میلی‌متر تبخیر و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک در ژنوتیپ L17 مشاهده شد. تجمع اسید آمینه‌های آزاد تحت تنش خشکی در تمام مراحل رشدی نشان‌دهنده‌ی نقش احتمالی آن‌ها در تنظیم اسمزی می‌باشد. لیزین از اسید آمینه‌های ضروری می‌باشد که مقدار آن تحت اثر ژنوتیپ و فرایندهای فیزیولوژیکی مختلفی از جمله رشد و نمو و همچنین شرایط و تنش‌های محیطی قرار دارد (Ali et al., 2019). مطابق گزارشات اسید آمینه لیزین چه به‌صورت محلول‌پاشی و یا درون سلولی در بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه در تنش‌های مختلف نقش مهمی دارد (Yang et al., 2021). در شرایط تنش خشکی در گیاه گلرنگ نیز سطح لیزین افزایش یافت که این افزایش با بهبود صفات فیزیولوژیکی و افزایش تحمل تنش مرتبط بود (Zafari and Ebadi, 2016).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل معنی‌داری بین تیمار آبیاری، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ژنوتیپ بر میزان متیونین وجود داشت (جدول ۲). بیش‌ترین میزان متیونین (۰/۸۹۳ میکروگرم در گرم وزن تر) به ژنوتیپ D42XI9 با محلول‌پاشی ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در شرایط تنش متوسط تعلق داشت و کم‌ترین میزان آن (۰/۳۶ میکروگرم در گرم وزن تر) نیز در شرایط عدم تنش خشکی و در تیمارهای عدم کاربرد و کاربرد ۰/۸ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در

ژنوتیپ L17 مشاهده شد (شکل ۲-B). در مطالعه دیگری روی دانه سویا مشخص شد که سایر تنش‌های محیطی مانند تنش شوری نیز موجب افزایش غلظت متیونین تا ۱۰/۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر شد که برای القای تحمل به نمک و حفظ عملکرد دانه در این شرایط مفید بود (Farhangi-Abriz and Ghassemi-Golezani, 2016). در برخی منابع متیونین به دلیل داشتن خواص اکسیداتیو قوی به عنوان یک آنتی‌اکسیدان در القای تحمل استرس در نظر گرفته می‌شود (Ali et al., 2019).

آنزیم پلی‌فنل اکسیداز

نتایج نشان داد که اثر متقابل معنی‌داری بین تیمار آبیاری، ژنوتیپ‌های سویا و اسید سالیسیلیک بر میزان فعالیت فنل اکسیداز مشاهده شد (جدول ۲). میزان فعالیت این آنزیم تحت شرایط تنش خشکی شدید بیشتر از شرایط مطلوب بود. بیشترین میزان فعالیت این آنزیم مربوط به شرایط تنش شدید (آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر) و کاربرد ۰/۴ میلی-مولار اسید سالیسیلیک در ژنوتیپ D42XI9 ثبت گردید (شکل ۲-C). کم‌ترین میزان فعالیت این آنزیم نیز در تیمار آبیاری عدم تنش و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک در ژنوتیپ Williams ثبت گردید. یافته‌های سایر پژوهش‌ها نیز نشان داده است که محلول‌پاشی با مواد شبه هورمونی در شرایط تنش، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را بهبود بخشد (Zafari and Ebadi, 2016). نقش پلی‌فنل اکسیداز در سم‌زدایی و مهار گونه‌های فعال اکسیژن مشابه آنزیم کاتالاز بوده و به عنوان یک مکانیسم تحمل وابسته به رقم محسوب می‌شود. مطابق گزارش محققان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش خشکی در رقم حساس سیب‌زمینی نسبتاً بدون تغییر بود و این رقم بیش‌ترین آسیب و کاهش عملکرد را در شایط تنش نشان داد (Demirel et al., 2020). آزمایشات دیگر بر روی توانایی مهار رادیکال‌های آزاد در ارقام متحمل به تنش خشکی با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و همبستگی مثبت بین این دو تاکید دارند (Razmi et al., 2017).

آنزیم گلوکاتایون رداکتاز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تیمار آبیاری با غلظت اسید سالیسیلیک با ژنوتیپ‌های سویا در مورد فعالیت گلوکاتایون رداکتاز معنی‌دار بود (جدول ۲). با توجه به شکل ۲-D در تمام ژنوتیپ‌های مورد مطالعه افزایش غلظت اسید سالیسیلیک و افزایش دور آبیاری موجب افزایش فعالیت گلوکاتایون رداکتاز شد و در این میان حداکثر فعالیت این آنزیم (تغییرات جذب معادل ۳/۹ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) به ژنوتیپ Williams با کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در شرایط تنش شدید تعلق داشت و کم‌ترین فعالیت گلوکاتایون رداکتاز (تغییرات جذب معادل ۰/۹ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) در ژنوتیپ Williams در شرایط بدون تنش و بدون کاربرد اسید سالیسیلیک مشاهده گردید. آنزیم‌های درگیر در چرخه آسکوربات-گلوکاتایون نقش مهمی در مهار گونه‌های اکسیژن فعال القا شده توسط تنش

دارند. فعالیت این آنزیم‌ها در پاسخ به تنش‌های مختلف افزایش می‌یابد و موجب تحمل به تنش‌های مختلف می‌شود (Ali *et al.*, 2019). مطابق گزارش محققان در سایر گیاهان زراعی نیز همبستگی بسیار خوبی بین فعالیت آنزیم گلوکاتایون رداکتاز و تنش خشکی وجود داشت و با افزایش شدت تنش خشکی فعالیت این آنزیم در گونه‌های متحمل به شدت افزایش یافت (Sofa *et al.*, 2005). با وجود این که فعالیت گلوکاتایون رداکتاز در اثر کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک افزایش یافت، اما فعالیت بالای این آنزیم در ژنوتیپ Williams قابل توجه بود. در مطالعه Razmi و همکاران (۲۰۱۷) فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در اثر شرایط تنش خشکی و کاربرد اسید سالیسیلیک افزایش یافته و این افزایش در ژنوتیپ Williams بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود. به نظر می‌رسد ژنوتیپ Williams قادر است فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها بویژه آنزیم‌های درگیر در چرخه گلوکاتایون آسکوربات را بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها افزایش دهد و این ژنوتیپ تحمل بالاتری نسبت به تنش خشکی دارد.

غلظت فلاونوئید

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان دهنده اثر متقابل معنی‌دار تنش خشکی با ژنوتیپ‌های سویا و ژنوتیپ‌های سویا با محلول پاشی غلظت اسید سالیسیلیک بر میزان فلاونوئید در ژنوتیپ‌های سویا بود (جدول ۲). افزایش دور آبیاری موجب افزایش تجمع فلاونوئید در همه ژنوتیپ‌ها گردید. اثر خشکی بر ژنوتیپ L17 بیش‌تر از سایر ژنوتیپ‌ها بود. به طوری‌که حداقل میزان فلاونوئید (۰/۶۱۶ گرم بر کیلوگرم) در ژنوتیپ L17 و در شرایط آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر مشاهده گردید و حداکثر آن (۰/۹۲۸ گرم بر کیلوگرم) به همان ژنوتیپ در شرایط آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر اختصاص داشت (شکل ۳-۳A). کاربرد اسید سالیسیلیک در غلظت ۰/۴ میلی‌مولار میزان فلاونوئید را در ژنوتیپ‌های سویا به طور معنی‌داری افزایش داد. به طوری‌که در اثر کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک در ژنوتیپ D42X19 حداکثر میزان فلاونوئید (۰/۸۹۹ گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. کم‌ترین میزان تجمع فلاونوئید (۰/۶۵۱ گرم بر کیلوگرم) در غلظت ۰/۸ میلی‌مولار در ژنوتیپ D42X19 ثبت گردید (شکل ۳-۳B). تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فنل‌ها، فلاونوئیدها، تانن‌ها و آنتوسیانین در گونه‌های مختلف گیاهی تحت تنش‌های غیرزیستی گزارش شده‌اند که ممکن است نتایج مثبت یا منفی بسته به عوامل بسیاری، مانند گونه‌های گیاهی، مرحله رشد و مدت زمان و شدت استرس داشته باشد. گونه‌های متحمل به خشکی با ویژگی‌های بارزی مانند تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تجمع املاح آلی و تولید فلاونوئیدها شناسایی می‌شوند. مطابق گزارشات میزان افزایش غلظت فلاونوئید در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ‌های متحمل به تنش سویا نسبت به ارقام حساس بسیار بیشتر بوده به طوری‌که در ژنوتیپ متحمل غلظت فلاونوئید تا ۴/۴۳ گرم بر کیلوگرم افزایش داشته است (رهی و همکاران، ۱۳۹۷). مطابق گزارشات، در بررسی تحمل به تنش خشکی و شوری دو گونه سیب زمینی افزایش

معنی‌داری در میزان فلاونوئید ثبت نگردید و دلیل احتمالی این مساله را در کاهش فعالیت آنزیم‌های بیوسنتز فلاونوئیدها مرتبط دانستند (Yang *et al.*, 2021). کاربرد اسید سالیسیلیک در طی تنش کم‌آبی می‌تواند مسیرهای بیوشیمیایی تولید متابولیت‌های ثانویه را تغییر داده و منجر به بهبود مقاومت گیاه به تنش خشکی گردد. مطابق گزارشات محلول‌پاشی ۰/۷ میلی‌مول اسید سالیسیلیک موجب افزایش تحمل به شرایط تنش خشکی از طریق افزایش معنی‌دار میزان فنل و فلاونوئیدها، در گونه‌های گیاه نعنا در طی مراحل مختلف رشد شده است (Jamal Omid *et al.*, 2018).

غلظت تری‌هالوز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تیمار آبیاری با ژنوتیپ‌های سویا و ژنوتیپ‌های سویا با غلظت اسید سالیسیلیک در مورد تری‌هالوز معنی‌دار بود (جدول ۲). با توجه به شکل ۳-C در تمام ژنوتیپ‌های مورد مطالعه افزایش شدت تنش موجب افزایش تری‌هالوز شد. اما تأثیر تنش بر میزان تری‌هالوز در ژنوتیپ D42XI9 بیشتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود. به طوری که حداکثر تری‌هالوز (۳۶۸/۹ میکرومول بر گرم وزن تر) در شرایط تنش شدید و در ژنوتیپ D42XI9 مشاهده شد و کم‌ترین میزان H_2O_2 (۴/۸ میکرومول بر گرم وزن تر) به ژنوتیپ L17 در شرایط بدون تنش (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر) تعلق داشت. با توجه به نتایج، اثر کاربرد اسید سالیسیلیک در ژنوتیپ‌های مختلف معنی‌دار شد. به طوری که در ژنوتیپ L17 میزان تولید تری‌هالوز نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها کم‌تر بود. با کاربرد اسید سالیسیلیک میزان تری‌هالوز در همه ژنوتیپ‌ها افزایش یافت و غلظت مؤثر اسید سالیسیلیک برای افزایش تری‌هالوز، ۰/۸ میلی‌مولار بود. حداقل میزان تری‌هالوز (۱۰۸ میکرومول بر گرم وزن تر) در ژنوتیپ L17 و در تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک مشاهده شد. در ژنوتیپ D42XI9 مقدار تری‌هالوز نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بیشتر بود. به طوری که در این ژنوتیپ در کاربرد ۰/۸ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بیش‌ترین مقدار تری‌هالوز (۳۴۲/۲ میکرومول بر گرم وزن تر) مشاهده گردید (شکل ۳-D). تری‌هالوز از دو مولکول گلوکز که توسط پیوند گلیکوزیدی آلفا-۱ به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است و در برابر هیدرولیز و دمای بالا بسیار مقاوم می‌باشد. همچنین به دلیل عدم توانایی در ایجاد پیوند هیدروژنی نسبت به سایر دی-ساکاریدها آب دوستی بالاتری دارد. در شرایط کمبود شدید آب، تری‌هالوز به شکل بلورهای شیشه‌ای خاصی درآمده و به ثبات مولکول‌های زیستی کمک نموده و فعالیت‌های عملکردی آن‌ها را بازیابی می‌کند (Jinhua *et al.*, 2022). افزایش کمی و کیفی محصولات زراعی در نتیجه کاربرد خارجی تری‌هالوز در شرایط تنش خشکی توسط محققین گزارش شده است (Kosar *et al.*, 2021). در ژنوتیپ‌های گیاه سویا، بیان بیش از حد ژن AtDREB1D موجب افزایش تجمع تری-هالوز شده و میزان آب نسبی بافت برگ را بهبود بخشیده و با کاهش تلفات آب، تحمل به خشکی را افزایش داد (Guttikonda *et al.*, 2014).

تعداد روز تا گل‌دهی

نتایج حاصل از تجزیه مرکب نشان داد که اثر تیمار آبیاری، ژنوتیپ‌های سویا و غلظت اسید سالیسیلیک در مورد تعداد روز تا گل‌دهی از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میاتگین در دو سال نشان داد که با افزایش تنش خشکی، تعداد روز تا گل‌دهی از ۴۸ روز در شرایط آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر روز به ۴۰/۵ روز در شرایط آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر کاهش یافت. ژنوتیپ‌های سویا از نظر تعداد روز تا گل‌دهی با یکدیگر اختلاف معنی‌داری داشته و بیش‌ترین تعداد روز تا گل‌دهی (۵۱/۲ روز) مربوط به ژنوتیپ D42XI9 بود. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۴ میلی‌مولار موجب افزایش تعداد روز تا گل‌دهی به میزان ۷/۸ درصد شد (جدول ۳). تعداد روز تا گل‌دهی به ژنوتیپ و شرایط محیطی بستگی داشته و در شرایطی که تنش خشکی در طول دوره رشد رویشی حادث گردد، موجب کاهش تعداد روز تا گل‌دهی می‌شود (Yang et al., 2021).

تعداد روز تا رسیدگی

نتایج حاصل از تجزیه مرکب نشان داد که اثر تیمار آبیاری، ژنوتیپ‌های سویا و غلظت اسید سالیسیلیک در مورد تعداد روز تا رسیدگی از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۲). با تشدید تنش در ژنوتیپ‌های مختلف از تعداد روز تا رسیدگی کاهش یافته و کم‌ترین تعداد روز تا رسیدگی در شرایط تنش شدید خشکی شدید مشاهده شد. حداکثر تعداد روز تا رسیدگی (۱۲۴/۴ روز) به ژنوتیپ D42XI9 اختصاص داشت. در حالی‌که ژنوتیپ L17 از تعداد روز تا رسیدگی کم‌تری (۱۰۶/۱ روز) نسبت به دو ژنوتیپ دیگر برخوردار بود. کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک نیز میزان این صفت را به میزان ۲/۶ درصد افزایش داد (جدول ۳). ژنوتیپ‌های سویا از نظر طول دوره گل‌دهی و رسیدگی با یکدیگر متفاوت می‌باشند. کاهش دوره رسیدگی با ریزش برگ‌ها، کاهش فتوسنتز، وزن خشک برگ و افزایش تنفس، همراه است (Zhang et al., 2018). گزارش شده است که تنش کمبود آب با کاهش طول دوره پر شدن دانه سبب کاهش طول دوره رشد و کاهش اندازه نهایی دانه و در نهایت کاهش معنی‌دار عملکرد دانه سویا شده است (Giordani et al., 2019).

ارتفاع بوته

نتایج حاصل از تجزیه مرکب نشان داد که اثر تیمار آبیاری، ژنوتیپ‌های سویا و غلظت اسید سالیسیلیک در مورد ارتفاع بوته در ساقه از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزایش دور آبیاری از سطح آبیاری ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر به سطح آبیاری پس از ۱۷۰ میلی‌متر تبخیر و افزایش شدت تنش، ارتفاع بوته کاهش معنی‌داری یافت، این کاهش حدود ۱۷/۲ درصد در سطح تنش متوسط و ۲۴/۳ درصد در سطح تنش خشکی شدید مشاهده شد.

جدول ۲: تجزیه واریانس مرکب صفات مورد بررسی ژنوتیپ‌های سویا تحت تاثیر تیمار آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک طی دو سال زراعی

منابع تغییر	درجه آزادی	صفات مورد بررسی											عملکرد دانه
		لیزین	متیونین	تری هالوز	گلوتاتیون رد اکتاز	فنل اکسیداز	فلاونوئید	شاخص کلروفیل	روز تا رسیدگی	روز تا گلدهی	تعداد گره در ساقه	ارتفاع بوته	
سال	۱	۳۴/۵ ^{ns}	۳۴/۳ ^{ns}	۱۰۰/۳*	۸/۰ ^{ns}	۸/۴۵ ^{ns}	۲۰/۸۵ ^{ns}	۱۱/۱ ^{ns}	۶۲۵/۱۵ ^{ns}	۳۲۵/۰۳ ^{ns}	۰/۶۸ ^{ns}	۱/۷ ^{ns}	۳۱۷۱/۸ ^{ns}
بلوک (سال)	۴	۱۰۱/۲	۲۷/۷	۲۰۱/۳۲	۳/۶۳	۶۶/۸۹	۱۰/۶	۵/۷	۴۰۰/۳۵	۲۱۲/۳۳	۲/۸	۷۴/۱	۲۲۱۵۵
آبیاری	۲	۱۲۰/۵**	۱۳/۳**	۴۰۱/۲۶**	۹/۲۴**	۸۵۴**	۴/۴**	۵۶/۱**	۳۳۰۰**	۴/۴۲*	۱۷/۱**	۱۶۳۵**	۲۹۸۲۳۴**
سال × آبیاری	۲	۰/۶۸ ^{ns}	۰/۳۷ ^{ns}	۰/۶۳ ^{ns}	۴/۴ ^{ns}	۶۵/۹ ^{ns}	۰/۸۴ ^{ns}	۱۰/۵ ^{ns}	۲۰۰/۵۱ ^{ns}	۳۲۱/۶ ^{ns}	۱/۹۶ ^{ns}	۷۲/۱ ^{ns}	۱۳۵۷۱ ^{ns}
خطای a	۸	۱/۸	۰/۲۵	۱۹۰/۲	۱۰/۸	۴۶/۷	۰/۶	۴/۰۸	۲۳۰/۵	۱۵۸/۲	۱/۴۵	۶۸/۱	۱۹۲۷۱
ژنوتیپ	۲	۳/۳**	۱/۸**	۷۲۰**	۷/۴۴**	۶۸۹**	۱/۴۳*	۲۰/۶**	۶۳۱/۱*	۸۹۱/۰۶**	۹/۵۷**	۳۰۰۹**	۳۹۱۹۵۶**
سال × ژنوتیپ	۲	۱/۴۲ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۲۲۱ ^{ns}	۳/۲ ^{ns}	۶۰/۹۶ ^{ns}	۳۵/۹۱ ^{ns}	۶/۶۵ ^{ns}	۳۰۵/۴ ^{ns}	۱۵۶/۰۵ ^{ns}	۰/۷۹ ^{ns}	۲/۳۳ ^{ns}	۱۲۸۵ ^{ns}
آبیاری × ژنوتیپ	۴	۰/۵۱**	۰/۰۷*	۶۱۴**	۹/۸**	۴۷۸/۲**	۱/۱۷*	۵/۸ ^{ns}	۳۴۹/۶ ^{ns}	۲۱۴/۶۵ ^{ns}	۲/۴ ^{ns}	۳۳/۳ ^{ns}	۱۸۸۱۳۷**
خطای b	۴	۰/۱۳ ^{ns}	۰/۰۴۱ ^{ns}	۱۲۷ ^{ns}	۱/۴۴ ^{ns}	۴۰/۹ ^{ns}	۰/۵۷ ^{ns}	۱/۹ ^{ns}	۴۰۰/۷ ^{ns}	۲۰۱/۰۳ ^{ns}	۰/۷۶ ^{ns}	۷/۸ ^{ns}	۱۸۴۹۷ ^{ns}
اسیدسالیسیلیک	۲	۰/۴۲**	۱/۴**	۶۵۵**	۰/۸۱**	۶۶۲/۳**	۳/۸۶**	۱۵/۷**	۹۹۱/۴**	۶۱۷/۷**	۱۵/۱۴**	۴۴۰**	۱۰۵۳۶۸**
سال × اسیدسالیسیلیک	۲	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۱۵۰ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۲۰/۱ ^{ns}	۰/۷۶ ^{ns}	۲/۰۲ ^{ns}	۲۸۴/۲۴ ^{ns}	۲۲۱/۰۲ ^{ns}	۰/۵۸ ^{ns}	۵/۳ ^{ns}	۲۸۵۱۴ ^{ns}
آبیاری × اسیدسالیسیلیک	۴	۲/۱**	۰/۳۱**	۳۹۹**	۰/۰۵**	۱۷۱/۷**	۰/۳۹ ^{ns}	۵/۲۵ ^{ns}	۲۵۰/۱۲ ^{ns}	۲۰۱/۳۵ ^{ns}	۱/۷۴ ^{ns}	۱۶/۶ ^{ns}	۳۱۵۸۵ ^{ns}
ژنوتیپ × اسیدسالیسیلیک	۴	۲/۸**	۰/۲۰**	۴۵۵*	۰/۱۵**	۲۳۲/۶**	۱/۰۵*	۵/۲۹ ^{ns}	۴۰۰/۶ ^{ns}	۱۹۸/۲۹ ^{ns}	۰/۴۶ ^{ns}	۳۶/۱ ^{ns}	۱۵۶۲۰۹**
ژنوتیپ × آبیاری × اسید سالیسیلیک	۸	۰/۴**	۰/۱۲**	۵۲۱**	۰/۰۵**	۷۹/۷**	۰/۲۶ ^{ns}	۴/۱۴ ^{ns}	۳۱۵/۱۹ ^{ns}	۲۳۵/۱۴ ^{ns}	۰/۹۵ ^{ns}	۱۱/۰۹ ^{ns}	۲۴۷۵۱ ^{ns}
سال × ژنوتیپ × آبیاری × اسید سالیسیلیک	۱۶	۰/۰۹۱ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۲۲ ^{ns}	۰/۰۲۳ ^{ns}	۹/۹ ^{ns}	۰/۷۲ ^{ns}	۳/۰۵ ^{ns}	۲۴۷/۰۷ ^{ns}	۱۵۹/۰۵ ^{ns}	۰/۴۸ ^{ns}	۵/۵ ^{ns}	۵۱۷۹ ^{ns}
خطای c	۹۶	۰/۰۷	۰/۰۳	۱۶۳	۰/۰۰۹	۲۷	۰/۴۳	۳/۰۹	۱۹۸/۱	۱۱۱	۰/۹۸	۲۰/۸	۱۶۲۹۸
ضریب تغییرات	-	۶/۴۵	۲۰/۲	۵/۹	۹/۱۱	۱۲	۸/۷	۹/۲	۱۱	۹/۲	۶/۵	۸/۱	۱۲/۱

***, * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و ns غیرمعنی‌دار

جدول ۳: اثر تیمار آبیاری و محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک ژنوتیپ‌های سویا (میانگین هر صفت در هر ستون مربوط به سه تکرار در دو سال زراعی می‌باشد)

عملکرد دانه در کرت (گرم در متر مربع)	ارتفاع بوته سانتی‌متر	تعداد گره در ساقه	روز تا رسیدگی	روز تا گلدهی	شاخص کلروفیل	گلوتاتینون رداکتاز(جذب در میلی گرم پروتئین)	فنل اکسیداز (گرم بر دقیقه)	فلاونوئید (گرم بر کیلو گرم)	تری‌هالوز (میکرو مول بر گرم وزن تر)	متیونین (میکروگرم در گرم وزن تر)	لیزین (میکروگرم در گرم وزن تر)	
تیمار آبیاری												
۴۲۳۷	۶۵/۳	۱۷/۱۳	۱۲۱	۴۸	۴۴/۴	۱/۴۱	۱۹۴	۰/۶۴۸	۱۳۰	۰/۴۸	۱/۳۹	آبیاری پس از ۱۰۰ میلیمتر تبخیر
۲۶۴۵	۵۴/۱	۱۴/۸۱	۱۱۳	۴۴/۳	۴۱/۳۳	۱/۷۸	۲۴۳	۰/۶۹۸	۲۴۴	۰/۶۸	۱/۶۸	آبیاری پس از ۱۳۵ میلیمتر تبخیر
۲۲۸۳	۴۹/۴	۱۳/۵۱	۱۰۵	۴۰/۵	۳۹/۱۰	۲/۹۸	۲۷۱	۰/۸۹۷	۲۷۳	۰/۶۳	۲/۵۲	آبیاری پس از ۱۷۰ میلیمتر تبخیر
۷۵/۵۶	۴/۴۹	۰/۶۵	۴/۱۳	۳/۴۲	۱/۰۸	۰/۷۱	۳/۷۱	۰/۲۱	۳/۷۵	۰/۱۳	۰/۷۰	LSD _(0.05)
ژنوتیپ												
۳۲۹۱	۶۲/۲	۱۵/۸۷	۱۱۵	۳۷/۷	۴۲/۲۵	۲/۱۸	۲۲۲	۰/۷۶۵	۲۳۴	۰/۵۵	۱/۹۳	Williams
۲۸۹۳	۵۸/۸	۱۵/۵۹	۱۰۶/۱	۴۴/۱۶	۴۰/۰۵	۱/۹۴	۲۳۸	۰/۷۳۶	۱۴۵	۰/۵۷	۱/۶۱	L17(Saba)
۳۰۸۰	۴۷/۹	۱۴	۱۲۴/۴	۵۱/۲	۴۲/۴۷	۲/۰۹	۲۴۷	۰/۷۴۳	۲۶۸	۰/۶۲	۲/۰۶	D42X19
۶۹/۴۹	۲/۴۸	۰/۵۴	۳/۸۳	۲/۸۷	۰/۹۹	۰/۰۵	۲/۸۲	۰/۱	۳/۴۷	۰/۰۸	۰/۱۴	LSD _(0.05)
محلول پاشی												
۳۰۲۷	۵۵/۳	۱۴/۴۴	۱۱۴	۴۷/۱	۴۱/۱۶	۱/۷۵	۲۲۲	۰/۶۹۲	۱۶۱	۰/۵۴	۱/۸۲	شاهد (بدون محلول پاشی)
۳۳۱۵	۵۹/۸	۱۵/۷۲	۱۱۷	۴۳/۴	۴۲	۲/۳۰	۲۵۱	۰/۸۳۳	۲۱۶	۰/۶۲	۲/۱۳	اسید سالیسیلیک ۰/۴ ملیلی‌مولار
۲۹۲۴	۵۳/۷	۱۵/۲۹	۱۱۴/۲	۴۲/۶	۴۱/۵۲	۲/۱۵	۲۳۵	۰/۷۲۱	۲۶۹	۰/۵۷	۱/۶۴	اسید سالیسیلیک ۰/۸ ملیلی‌مولار
۶۹/۴۹	۲/۴۸	۰/۵۴	۳/۸۳	۲/۸۷	۰/۹۹	۰/۰۵	۲/۸۲	۰/۱	۳/۴۷	۰/۰۸	۰/۱۴	LSD _(0.05)

بیشترین میزان ارتفاع بوته (۶۲/۱۸ سانتی‌متر) به ژنوتیپ Williams و کمترین میزان ارتفاع بوته (۴۷/۸۸ سانتی‌متر) به ژنوتیپ D42X19 تعلق داشت (جدول ۳). تقسیم سلولی و بزرگ شدن سلول فرآیندهایی هستند که کمیت و کیفیت رشد گیاه را از طریق عوامل داخلی و خارجی گوناگون تحت تأثیر قرار می‌دهند و تنش آب یکی از این پارامترها محسوب می‌شود (میر و همکاران، ۱۴۰۰). ارتفاع گیاه به شدت تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد. کاهش ارتفاع بوته در شرایط تنش خشکی به دلیل کاهش انبساط سلولی، کاهش تقسیم میتوز و ریزش برگ‌ها می‌باشد (Jinhua et al., 2022). کاهش ارتفاع، کاهش تعداد گره و طول میانگره‌ها را نیز در پی دارد (رهی و همکاران، ۱۳۹۷). مطابق بررسی‌های انجام شده تنش کم‌آبی ارتفاع بوته را در ژنوتیپ‌های حساس سویا، بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد (Anjum et al., 2017). با توجه به نتایج جدول ۳ کاربرد اسید سالیسیلیک تأثیر معنی‌داری بر میزان ارتفاع بوته داشت و حداکثر ارتفاع بوته (۵۹/۸۱ سانتی‌متر) در کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد. از اثرات مثبت اسید سالیسیلیک افزایش ارتفاع در گیاهان می‌باشد. به طوری که مشاهده شده است کاربرد اسید سالیسیلیک در غلظت‌های پایین موجب افزایش ارتفاع و قطر ساقه شده و در نهایت موجب افزایش عملکرد بیولوژیک می‌گردد (نوریانی، ۱۴۰۰). نتایج میر و همکاران (۱۴۰۰) نیز نشان داد که کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش شاخص سطح برگ و رشد محصول و تولید ماده خشک در کلزا گردید. به نظر می‌رسد در شرایط تنش خشکی، کاربرد اسید سالیسیلیک از طریق جلوگیری از کاهش سیتوکینین و اکسین موجب افزایش سرعت فتوسنتز شده و در نهایت رشد را بهبود می‌بخشد (Guttikonda et al., 2014).

تعداد گره در ساقه

نتایج حاصل از تجزیه مرکب نشان داد که اثر تیمار آبیاری، ژنوتیپ‌های سویا و غلظت اسید سالیسیلیک در مورد تعداد گره در ساقه از لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تعداد گره ساقه در اثر افزایش شدت تنش خشکی در ژنوتیپ‌های مختلف کاهش یافت. در شرایط رطوبتی بدون تنش (۱۰۰ میلی‌متر تبخیر) بیشترین تعداد گره در ساقه مشاهده شد، با افزایش شدت تنش ۱۳/۵ درصد از تعداد گره‌های موجود در ساقه کاسته شد. از آنجا که گره‌ها بر روی ساقه تشکیل شده و محل تجمع غلاف‌ها می‌باشند، کاهش ارتفاع ساقه در اثر تنش خشکی موجب کاهش تعداد گره در ساقه می‌شود. همانطور که ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این تحقیق از لحاظ ارتفاع بوته با یکدیگر اختلاف داشتند از لحاظ تعداد گره در ساقه نیز با یکدیگر متفاوت بودند. بیشینه تعداد گره ساقه (۱۵/۵۹) مربوط به ژنوتیپ L17 بود که اختلاف آماری معنی‌داری با کمترین تعداد گره در ساقه در ژنوتیپ D42X19 داشت (جدول ۳).

شاخص کلروفیل

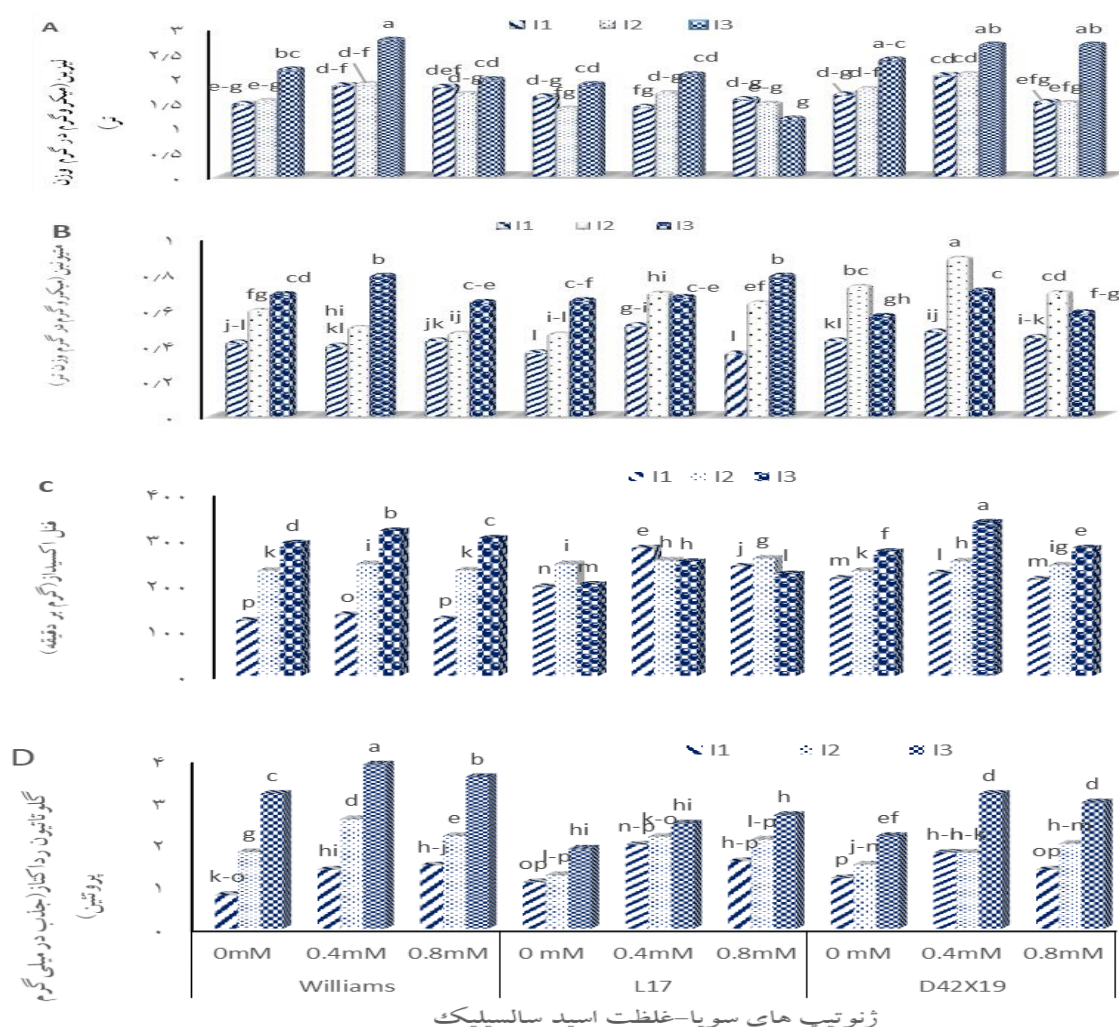
با توجه به نتایج حاصل از جداول تجزیه مرکب و مقایسه میانگین تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار شاخص

کلروفیل برگ شد (جدول ۳ و ۲)، میزان این کاهش ۷ درصد در سطح تنش خشکی متوسط و ۱۲ درصد در سطح تنش خشکی شدید بود. به نظر می‌رسد یکی از مهمترین دلایل کاهش کلروفیل، تخریب آنها توسط گونه‌های اکسیژن فعال می‌باشد. کاهش فعالیت فتوسیستم II، کاهش فعالیت آنزیم روبیسکو، و مهار سنتز ATP منجر به تشکیل گونه‌های اکسیژن آزاد در کلروپلاست‌ها شده است (Giordani et al., 2019). ژنوتیپ‌های سویا نیز از نظر میزان سبزی‌نگی با یکدیگر اختلاف داشته و بیشترین میزان شاخص کلروفیل در ژنوتیپ D42XI9 به میزان ۴۲/۴۷ مشاهده شد مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر ساده نیز نشان داد که با افزایش غلظت اسید سالیسیلیک میزان شاخص کلروفیل افزایش یافت (جدول ۲). طی تحقیقی مشابه کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار سالیسیلیک اسید سالیسیلیک نسبت به غلظت بیشتر آن (۰/۸ میلی‌مولار) تاثیر بیشتری در کاهش اثرات نامطلوب تنش داشت و توانست محتوای نسبی آب، غلظت کلروفیل‌های a و b، عملکرد کوانتوم و هدایت روزنه‌ای را در شرایط تنش خشکی در ژنوتیپ‌های سویا حفظ نموده که نتیجه آن کاهش اثرات منفی تنش خشکی بود (رزمی و همکاران، ۱۳۹۸).

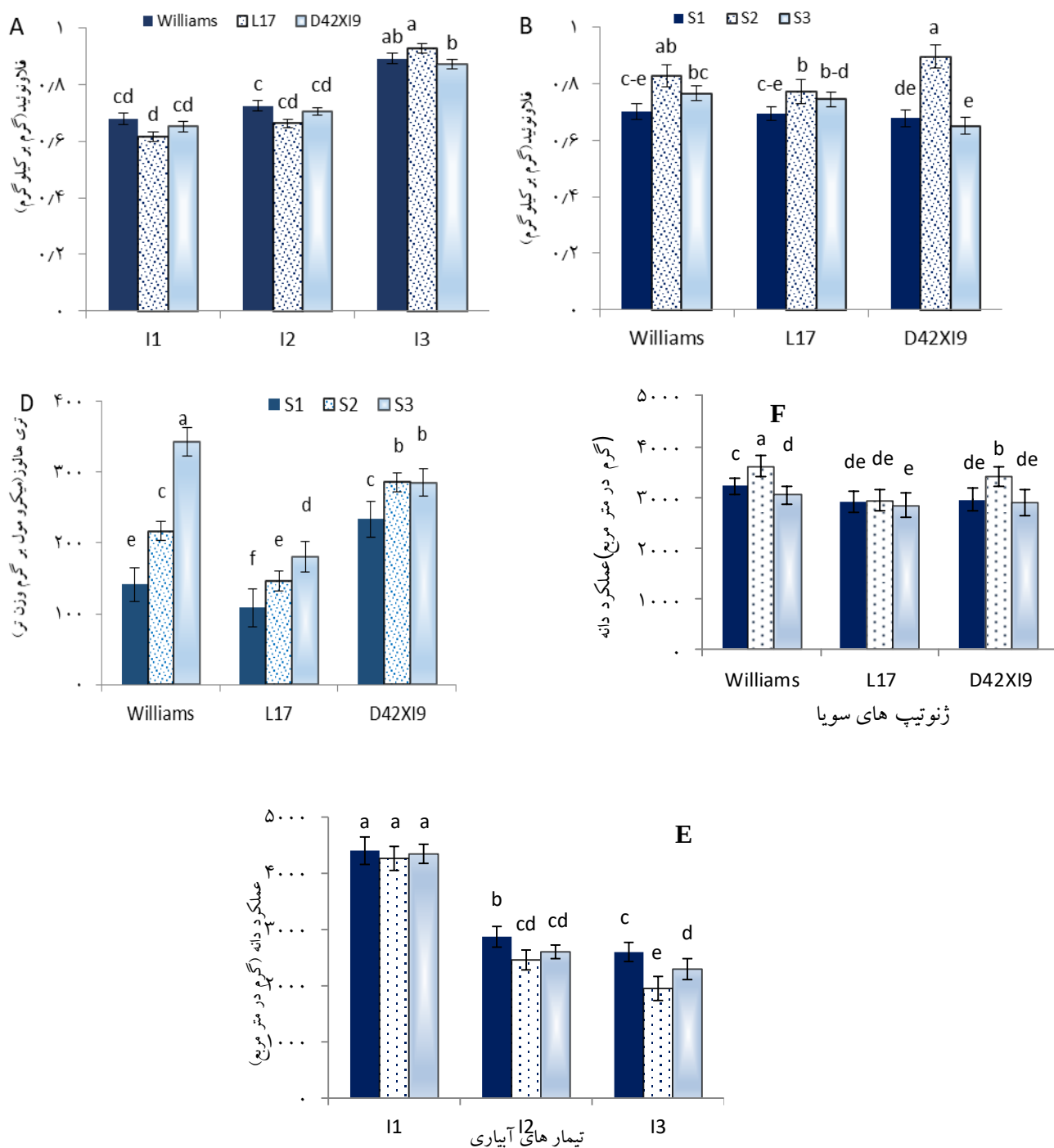
عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه مرکب داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش کم‌آبی با ژنوتیپ‌های سویا و ژنوتیپ‌های سویا با غلظت اسید سالیسیلیک در مورد عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۲). سطوح مختلف تنش تأثیر معنی‌دار و متفاوتی بر ژنوتیپ‌های سویا داشت. به طوری‌که تشدید تنش از میزان عملکرد دانه به شدت کاست. میزان این کاهش ۳۸ درصد در تنش متوسط و ۴۶ درصد در تنش شدید نسبت به شرایط عدم تنش بود (جدول ۳). عملکرد دانه در ژنوتیپ Williams در شرایط تنش و بدون تنش نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بیشتر بود در شرایط تنش شدید ۲۴ درصد نسبت به ژنوتیپ L17 و ۱۲ درصد نسبت به ژنوتیپ D42XI9 عملکرد دانه بیشتری تولید نمود. (شکل ۳-E). با توجه به شکل (۳-F) تاثیر اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود. به طوری‌که در اثر کاربرد ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک میزان عملکرد دانه به میزان ۱۲/۲ درصد در Williams، ۰/۸ درصد در L17 و ۱۵/۱ درصد در ژنوتیپ D42XI9 افزایش یافت. گونه‌های متحمل به خشکی با ویژگی‌های بارزی مانند تولید آنزیم‌های آنتی اکسیدان، تجمع املاح آلی و تولید فلاونوئیدها شناسایی می‌شوند. محلول‌پاشی غلظت ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک توانست تجمع اسیدهای آمینه لیزین و متیونین را در بافت‌های برگ افزایش دهد. برخلاف تأثیر مثبت غلظت ۰/۴ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که اثر ۰/۸ میلی‌مولار این هورمون مثبت نمی‌باشد و حتی گاهی نسبت به شاهد اثر منفی بر میزان عملکرد محصول مشاهده شد. اسید سالیسیلیک در غلظت‌های متعادل موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود ولی در غلظت‌های بالاتر موجب افزایش غلظت پیام‌رسان‌های ثانویه مانند پراکسید هیدروژن شده که نتیجه آن مهار فعالیت برخی

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و افزایش اثرات مخرب تنش بر گیاه می‌باشد. سایر پژوهشگران نیز گزارش کردند که غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک از تأثیر بازدارنده‌ای برخوردار می‌باشد (Razmi et al., 2017). مطابق گزارش میر و همکاران (۱۴۰۰) در شرایط تنش خشکی (۷۰ درصد تخلیه ظرفیت زراعی)، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۱/۵ میلی‌مولار و عناصر ریزمغذی در گیاه کلزا توانست ضمن کاهش معنی‌دار غلظت دی‌کسیدکربن زیر اتاقک روزنه، باعث افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ، هدایت مزوفیلی، هدایت روزنه‌ای و سرعت فتوسنتز شده و عملکرد دانه را تا ۳۷/۷۹ درصد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی افزایش دهد، در حالیکه کاربرد غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک موجب کاهش عملکرد شد. امرایی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که محلول‌پاشی متانول اثر مثبت و معنی‌داری در شرایط تنش کم‌آبی بر شاخص‌های رشدی سویا داشت و منجر به افزایش ماده خشک و عملکرد دانه سویا شد.



شکل ۲: اثر تیمار آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر میزان لیگنین (A)، متیونین (B)، فنل اکسیداز (C) و گلوتاتیون رداکتاز (D) در ژنوتیپ‌های سویا (به دلیل معنی‌دار نبودن اثر سال، مقدار هر صفت بر اساس میانگین دو سال زراعی مورد محاسبه قرار گرفته است).



شکل ۳: تغییرات میزان فلاونوئید (A)، تری هالوز (C) و عملکرد دانه (E) تحت تاثیر تیمارهای آبیاری در ژنوتیپ‌های سویا و محلول پاشی اسید سالیسیلیک (B,D,F)، (به دلیل معنی دار نبودن اثر سال، مقدار هر صفت بر اساس میانگین دو سال زراعی مورد محاسبه قرار گرفته است).

نتیجه‌گیری

تنش خشکی با ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، ایجاد ناپایداری در غشای سلولی، ایجاد تنش اکسیداتیو منجر به کاهش رشد و عملکرد دانه می‌شود. در این آزمایش تنش خشکی موجب کاهش تعداد روز تا گلدهی،

تعداد روز تا رسیدگی، ارتفاع بوته، تعداد گره در بوته، شاخص کلروفیل و عملکرد دانه شد. همچنین در اثر تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند گلوکاتایون رداکتاز و پلی فنل اکسیداز و غلظت اسیدهای آمینه لیزین و متیونین و همچنین متابولیت‌های ثانویه مانند تری‌هالوز و فلاونوئید افزایش یافت. ژنوتیپ‌های سویا از نظر فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی واکنش‌های متفاوتی به شرایط تنش کم‌آبی نشان دادند، به‌طوریکه عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های Williams، D42X19، L17 به ترتیب کاهشی معادل ۴۱، ۵۴ و ۴۷ درصد در شرایط تنش خشکی شدید نشان دادند. فعالیت کمتر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گلوکاتایون رداکتاز و پلی فنل اکسیداز در شرایط تنش خشکی شدید موجب کاهش بیشتر عملکرد دانه در ژنوتیپ L17 شد. کاربرد ۰/۴ میلی‌مول اسید سالیسیلیک موجب افزایش غلظت اسیدهای آمینه لیزین و متیونین، افزایش غلظت فلاونوئید و بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، کاهش اثرات منفی تنش خشکی و افزایش عملکرد در حدود ۱۲، ۲ و ۱۵ درصد به ترتیب در ژنوتیپ‌های Williams، L17، D42X19 شد.

منابع

- امرای، ب.، پاک‌نژاد، ف.، ابراهیمی، م.ع. و سبحانیان، ح. ۱۳۹۶. اثر محلول‌پاشی متانول و تنش خشکی بر عملکرد دانه و شاخص‌های رشد سویا (*Glycine max* L.). مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، سال ۹ شماره ۳۴، ص ۱۱۱-۱۲۹.
- رزمی، ن.، عبادی، ع.، دانشیان، ج. و جهان‌بخش، س. ۱۳۹۷. تاثیر سالیسیلیک اسید بر محتوی عناصر معدنی و برخی صفات فیزیولوژیک ارقام سویا (*Glycine max* L.) در شرایط تنش کم‌آبی. فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۷ شماره ۲۶، ص ۱۵۴-۱۴۵.
- رزمی، ن.، عبادی، ع.، دانشیان، ج. و جهان‌بخش، س. ۱۳۹۸. نقش سالیسیلیک اسید در بهبود سیستم فتوسنتزی و عملکرد دانه ارقام سویا (*Glycine max* L.) در شرایط تنش خشکی. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، شماره ۳ ص ۳۹۷-۳۷۷.
- رزمی، ن. ۱۴۰۱. تولید سویا. نشر آموزش (مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی). ۷۲ ص.
- رهی، ع.، نجفی زرنی، ح.، ن.، رنجبر، غ. و قاجار سپانلو، م. ۱۳۹۷. نقش صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در بهبود عملکرد ژنوتیپ‌های سویا تحت تنش کم‌آبی. مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، سال ۱۰ شماره ۳۹، ص ۷۹-۹۲.
- میر، ی.، دانشور، م.ا. و اسماعیلی، ا. ۱۴۰۰. اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عناصر ریزمغذی بر فعالیت‌های فتوسنتزی و عملکرد دانه کلزا تحت تنش کم‌آبی. مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، سال ۱۳ شماره ۵۰، ص ۱۱۹-۱۳۴.
- نوریانی، ح. ۱۴۰۰. واکنش تبادلات گازی برگ و عملکرد دانه ذرت S. C 704 به محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در شرایط تنش کمبود آب. مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، سال ۱۳ شماره ۵۰، ص ۱۶۳-۱۵۱.

Ali, Q., Haider, M. Z., Shahid, S., Aslam, N., Shehzad, F., Naseem, J., Ashraf, R., Ali, A. and Hussain, S. M. 2019. Role of amino acids in improving abiotic stress tolerance to plants. In "Plant tolerance to environmental stress", pp. 175-204. CRC Press.

Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., Zohaib, A., Abbas, F., Saleem, M. F., and Ali, I. 2017. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. *Frontiers in plant science* **8**, 69.

Demirel, U., Morris, W. L., Ducreux, L. J., Yavuz, C., Asim, A., Tindas, I., Campbell, R., Morris, J. A., Verrall, S. R. and Hedley, P. E. 2020. Physiological, biochemical, and transcriptional responses to single and combined abiotic stress in stress-tolerant and stress-sensitive potato genotypes. *Frontiers in plant science*, 169.

Farhangi-Abriz, S. and Ghassemi-Golezani, K. 2016. Improving amino acid composition of soybean under salt stress by salicylic acid and jasmonic acid. *Journal of applied botany and food quality* **89**.

Giordani, W., Gonçalves, L. S. A., Moraes, L. A. C., Ferreira, L. C., Neumaier, N., Farias, J. R. B., Nepomuceno, A. L., de Oliveira, M. C. N. and Mertz-Henning, L. M. 2019. Identification of agronomical and morphological traits contributing to drought stress tolerance in soybean. *Australian Journal of Crop Science* **13**, 35-44.

González-Villagra, J., Reyes-Díaz, M. M., Tighe-Neira, R., Inostroza-Blancheteau, C., Escobar, A. L. and Bravo, L.A. 2022. Salicylic Acid Improves Antioxidant Defense System and Photosynthetic Performance in *Aristotelia chilensis* Plants Subjected to Moderate Drought Stress. *Plants* **11**, 63.

Guttikonda, S. K., Valliyodan, B., Neelakandan, A. K., Tran, L.-S. P., Kumar, R., Quach, T. N., Voothuluru, P., Gutierrez-Gonzalez, J. J., Aldrich, D. L. and Pallardy, S. G. 2014. Overexpression of AtDREB1D transcription factor improves drought tolerance in soybean. *Molecular Biology Reports* **41**, 7995-8008.

Jamal Omid, F., Mohajjel Shoja, H. and Sariri, R. 2018. Effect of water-deficit stress on secondary metabolites of *Melissa officinalis* L.: Role of exogenous salicylic acid. *Caspian Journal of Environmental Sciences* **16(2)**, 121-134.

Jiang, Y., Zhang, Z., Joyce, D. C. and Ketsa, S. 2002. Postharvest biology and handling of longan fruit (*Dimocarpus longan* Lour.). *Postharvest Biology and technology* **26**, 241-252.

Jinhua, S., Weixiong, W., Rasul, F., Munir, H., Huang, K., Albishi, T. S., Arshad, M., Qiliang, H., Huang, G. and Hassan, M. U. 2022. Trehalose induced drought tolerance in plants: Physiological and molecular responses. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* **50**, 12584-12584.Z

- Kosar, F., Akram, N. A., Ashraf, M., Ahmad, A., Alyemeni, M. N. and Ahmad, P. 2021.** Impact of exogenously applied trehalose on leaf biochemistry, achene yield and oil composition of sunflower under drought stress. *Physiologia Plantarum* **172**, 317-333.
- Li, Z.-G., Luo, L.-J. and Zhu, L.-P. 2014.** Involvement of trehalose in hydrogen sulfide donor sodium hydrosulfide-induced the acquisition of heat tolerance in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Botanical studies* **55**, 1-9.
- Lošák, T., Hlušek, J., Filipčík, R., Pospíšilová, L., Maňásek, J., Prokeš, K., Buňka, F., Kráčmar, S., Martensson, A. and Orosz, F. 2010.** Effect of nitrogen fertilization on metabolisms of essential and non-essential amino acids in field-grown grain maize (*Zea mays* L.). *Plant, Soil and Environment* **56**, 574-579.
- Razmi, N., Ebadi, A., Daneshian, J. and Jahanbakhsh, S. 2017.** Salicylic acid induced changes on antioxidant capacity, pigments and grain yield of soybean genotypes in water deficit condition. *Journal of Plant Interactions* **12**, 457-464.
- Ritchie, S. W., Nguyen, H. T. and Holaday, A. S. 1990.** Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop science* **30**, 105-111.
- Sadak, M. S. 2019.** Physiological role of trehalose on enhancing salinity tolerance of wheat plant. *Bulletin of the National Research Centre* **43**, 1-10.
- Sofa, A., Tuzio, A. C., Dichio, B. and Xiloyannis, C. 2005.** Influence of water deficit and rewatering on the components of the ascorbate–glutathione cycle in four interspecific *Prunus* hybrids. *Plant Science* **169**, 403-412.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., and Chen, S. 2021.** Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae* **7**, 50.
- Zafari, M. and Ebadi, A. 2016.** Effects of water stress and brassinosteroid (24-epibrassinolide) on changes of some amino acids and pigments in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Current Research in Science* **711**.
- Zhang, H., Cui, X., Guo, Y., Luo, C. and Zhang, L. 2018.** *Picea wilsonii* transcription factor NAC2 enhanced plant tolerance to abiotic stress and participated in RFCP1-regulated flowering time. *Plant Molecular Biology* **98**, 471-493.
- Zhang, G., Yan, P., Leng, D., Shang, L., Zhang, C., u, Z. and Zhen, Z. W. 2023.** Salicylic acid treatment alleviates the heat stress response by reducing the intracellular ROS level and increasing the cytosolic trehalose content in *Pleurotus ostreatus*. *Microbiology Spectrum* **11**(1), 2-14.
- Zhishen, J., Mengcheng, T. and Jianming, W. 1999.** The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food chemistry* **64**, 555-559.

The effect of salicylic acid on some agrophysiological and biochemical traits of soybean genotypes under drought stress conditions

N. Razmi^{1*}, A. Ebadi², J. Daneeshian³ and S. Jahanbakhsh⁴

1) Field and Horticultural Crops Sciences Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Parsabad, Iran.

2 & 4) Department of Plant Genetics and Production Engineering, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

3) Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

*Corresponding Author: n.razmi@areeo.ac.ir

Received date: 2023.01.08

Accepted date: 2023.04.26

Abstract

In order to study the effect of using salicylic acid in inducing tolerance mechanisms to drought stress, a research was carried out in the field of Moghan Agriculture and Natural Resources Research Center in 2014 and 2015 as a split factorial in three replications. The main factor includes irrigation treatments based on evaporation from class A evaporation pan (100, 135 and 170 mm evaporation) and secondary treatments including soybean genotypes (Williams, L17 and D42XI9) and salicylic acid foliar spraying (0, 0.4 and 0.8 mM). The results of composite analysis showed that drought stress significantly reduced plant height, number of nodes per stem, days to flowering and days to maturity in soybean genotypes. Seed yield was reduced by 38% in moderate stress and 46% in severe stress compared to control. Drought stress and application of salicylic acid, especially at a concentration of 0.4 mM, increased the concentration of amino acids such lysine and methionine. The highest amount of lysine was observed in Williams genotype under severe stress conditions and the highest amount of methionine was observed in D42XI9 genotype under moderate stress conditions. The highest level of activity of polyphenol oxidase enzymes in D42XI9 genotype and the highest level of glutathione reductase enzyme activity in Williams genotype was observed under severe drought stress conditions. Foliar spraying with salicylic acid (0.4 mM) increased the activity of these enzymes in both stressed and non- conditions. Intensity of stress caused an increase in concentration trihalose. But the effect of stress on the amount of trihalose in Williams genotype was more than other genotypes. With the application of salicylic acid, the concentration of trihalose increased in all genotypes, and the effective concentration of salicylic acid to increase trihalose was 0.8 mM. Drought stress and application of salicylic acid increased flavonoid accumulation in all genotypes and especially in L17 genotype. Drought stress significantly reduced plant height, number of nodes, days to flowering, days to maturity and seed yield in soybean genotypes, while the use of 0.4 mM salicylic acid improved the above traits, especially in the Williams genotype. In this study, Williams showed less sensitivity to drought stress (12% more seed yield than L17 genotype and 6% more than D42XI9 genotype) due to higher antioxidant enzyme activity and higher seed yield compared to other genotypes, and the use of salicylic acid in non-stressed and stressed conditions increased seed yield in soybean genotypes.

Key words: Polyphenol oxidase, Trehalose, Flavonoid and Glutathione reductase.