

اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر تعدیل تنش اکسیداتیو، سیستم آنتی اکسیدانی و عملکرد آفتابگردان تحت تیمار علف کش لینورون

حکیم ساکی^۱، علیرضا ابدالی مشهدی^۲، الهام الهی فرد^۳ و علی قاطعی^{۴*}

۱، ۲، ۳ و ۴) گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملائانی، ایران.

نویسنده مسئول*: ghateiali@asnrukh.ac.ir

این مقاله برگرفته از رساله دکتری می باشد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد و کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کاربرد علف کش لینورون در آفتابگردان انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل سطوح مختلف علف کش لینورون (عدم کاربرد، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار) و محلول پاشی اسید سالیسیلیک (عدم کاربرد، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار) بود. کاربرد علف کش لینورون به تنهایی باعث افزایش معنی دار عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ماده خشک آفتابگردان و کاهش وزن خشک علف های هرز شد. اثر متقابل علف کش و اسید سالیسیلیک بر عملکرد روغن، تعداد دانه در طبق، فعالیت کاتالاز و میزان مالون دی آلدئید معنی دار بود. بالاترین عملکرد روغن (۱۴۵۹ کیلوگرم در هکتار) با کاربرد ۱ لیتر در هکتار لینورون و ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد ۱۰۲ درصد بیشتر بود. بیشترین عملکرد دانه (۳۹۳۷/۹ کیلوگرم در هکتار) و وزن هزار دانه (۵۵/۷ گرم) با کاربرد یک لیتر در هکتار لینورون مشاهده شد که به ترتیب ۵۰ و ۱۹ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. همچنین بیشترین فعالیت کاتالاز و کم ترین میزان مالون دی آلدئید در ترکیب تیماری شامل سطوح بالای علف کش (۰/۷۵ و یک لیتر) همراه با اسید سالیسیلیک ۰/۵ میلی مولار مشاهده شد. به طور کلی، محلول پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی مولار توانست با فعال سازی سیستم آنتی اکسیدانی (افزایش کاتالاز) و کاهش شاخص تنش اکسیداتیو (مالون دی آلدئید)، اثرات منفی احتمالی علف کش را تعدیل و در برخی موارد عملکرد آفتابگردان را بهبود بخشد. بنابراین، استفاده هم زمان این دو ماده می تواند به عنوان یک راهکار مدیریتی مفید در جهت افزایش عملکرد روغن آفتابگردان توصیه گردد.

واژه های کلیدی: تنش اکسیداتیو، عملکرد روغن و فعالیت آنزیم کاتالاز.

مقدمه

آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در جهان است که به دلیل محتوای بالای روغن و پروتئین دانه، نقش مهمی در تأمین نیازهای غذایی و صنعتی دارد. سازگاری وسیع به شرایط محیطی مختلف با عملکرد روغن بالا در گیاه آفتابگردان، موجب شده است که به عنوان یکی از اصلی‌ترین گیاه تولید کننده در جهان معرفی شود (Gurbuz and Alptekin, 2024). با این حال، رشد علف‌های هرز در مزارع آفتابگردان یکی از چالش‌های اصلی است که موجب کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شود. رقابت علف‌های هرز با گیاه اصلی برای منابعی مانند آب، نور و مواد مغذی، یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی است (Knezevic et al., 2020). علف‌های هرز از مهم‌ترین عوامل کاهش ارزش کیفی و کمی گیاهان زراعی می‌باشد و مهار آن‌ها در مزارع مهمترین مرحله در کشت و عملکرد می‌باشد. در این بین استفاده از علف‌کش‌ها بخصوص در کشورهای پیش‌رفته افزایش یافته است (Torun et al., 2021). علف کش لینورون، یک علف کش پیش‌رویشی و پس‌رویشی از گروه اوره‌ها است که به دلیل کارایی بالا در مهار طیف وسیعی از علف‌های هرز، به طور گسترده در کشاورزی استفاده می‌شود. با این حال، استفاده مداوم از علف‌کش‌ها می‌تواند مشکلاتی از جمله مقاومت علف‌های هرز و تأثیرات منفی بر محیط زیست ایجاد کند (Heap, 2023). به همین دلیل، استفاده از راهبردهای مکمل، مانند کاربرد مواد محرک رشد طبیعی نظیر اسید سالیسیلیک، به عنوان راهکاری برای بهبود کارایی علف‌کش‌ها و کاهش اثرات جانبی آن‌ها، مورد توجه قرار گرفته است. اسید سالیسیلیک به عنوان یکی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مهم، تأثیرات مختلفی بر روی فرآیندهای مهم گیاه از جمله جذب عناصر، فرآیند گلدهی، عملکرد دستگاه فتوسنتزی، فعالیت سیستم دفاعی و همچنین تحمل گیاه به تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارد. اسید سالیسیلیک یکی از ترکیباتی است که مقاومت گیاهان را در شرایط تنش افزایش می‌دهد و باعث بهبود فعالیت‌های متابولیک آن می‌شود (Gerami et al., 2018; Koo et al., 2020; Ramezani et al., 2021). اسید سالیسیلیک فرآیندهای فیزیولوژیک در گیاهان را تنظیم و عوارض جانبی تنش را کاهش داده و می‌تواند اثرات نامطلوب آن را بهبود بخشد (Yavas and Unay, 2016). این ترکیب از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، بهبود فتوسنتز و تحریک رشد ریشه و ساقه، می‌تواند اثرات مثبت بر رشد و عملکرد گیاهان داشته باشد (Hayat et al., 2010). محلول پاشی اسید سالیسیلیک نه تنها با فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی موجب تعدیل تنش اکسیداتیو و حفظ عملکرد در آفتابگردان می‌شود، بلکه با افزایش حساسیت علف‌های هرز به علف کش لینورون، کارایی مدیریت علف‌های هرز در مزرعه را نیز بهبود می‌بخشد (Farooq et al., 2008). گزارش شده است که اسید سالیسیلیک باعث کاهش سمیت اثرات علف کش پاراکوات در گیاهان مختلف شده است (Silverman et al., 2005). محلول پاشی اسید سالیسیلیک ۲۴

ساعت قبل از مصرف علف‌کش پاراکوات روی گیاهچه‌های جو، از اثرات مخرب این علف‌کش روی کلروفیل و میزان فتوسنتز در مقایسه با شاهد کاسته است (Ananieva et al., 2002). همچنین محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک روی برگ‌های خیار (*Cucumis sativus* L.) و توتون (*Nicotiana rustica*) از تنش اکسیداتیو القایی علف‌کش پاراکوات محافظت کرده است (Strobel and Kuc, 1995). با وجود مزایای بالقوه، برخی اختلاف نظرها در مورد غلظت‌ها و زمان بهینه کاربرد اسید سالیسیلیک وجود دارد، زیرا دوزهای بیش از حد ممکن است اثرات نامطلوبی بر فیزیولوژی گیاه داشته باشد (Mehak et al., 2021; Ramu et al., 2016). درک تعامل بین اسید سالیسیلیک و لینورون در فیزیولوژی آفتابگردان می‌تواند راه را برای تحقیقات بیشتر در زمینه کاهش سمیت علف‌کش‌ها بر این گیاه زراعی از طریق استفاده از هورمون‌های گیاهی طبیعی هموار کند. بررسی غلظت‌ها و زمان بهینه برای کاربرد اسید سالیسیلیک توأم با کاربرد علف‌کش لینورون ممکن است راهبرد عملی برای افزایش تحمل محصول و اطمینان از پایداری کشاورزی در مواجهه با استفاده از علف‌کش‌های شیمیایی را ارائه دهد (Essa et al., 2023; Traxler et al., 2023). اجتناب ناپذیر بودن حضور علف‌های هرز در کنار گیاه زراعی و مهار شیمیایی آن‌ها، انگیزه‌ای شد تا این آزمایش با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد کمی، کیفی و کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کاربرد علف‌کش لینورون در آفتابگردان مورد بررسی قرار گیرد. همچنین اثر کاربرد اسید سالیسیلیک و علف‌کش لینورون بر علف‌های هرز مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، کاشت در اسفند ماه سال ۱۴۰۰ و برداشت بعد از رسیدگی در انتهای خرداد ماه سال ۱۴۰۱ در مزرعه پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در ۳۶ کیلومتری اهواز با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۲۲ متر ارتفاع از سطح دریا اجرا گردید (جدول ۱). فاکتور اول محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در ۴ سطح شامل عدم کاربرد، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار (۳ روز قبل از کاربرد علف‌کش لینورون) و فاکتور دوم کاربرد علف‌کش لینورون در ۵ سطح شامل عدم کاربرد، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار (به صورت پس رویی در مرحله ۱۰-۸ برگی آفتابگردان) اجرا گردید. انتخاب فاصله زمانی ۳ روز بین محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و کاربرد علف‌کش لینورون بر اساس مطالعات معتبر پیشین انجام گرفت. در پژوهشی مشخص گردید که پیش‌تیمار ۲۴ ساعته گیاهان با اسید سالیسیلیک قبل از اعمال علف‌کش پاراکوات، با القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و SOD) از آسیب‌های اکسیداتیو جلوگیری می‌کند (Ananieva et al., 2002). همچنین در آزمایشی با استفاده از پیش‌تیمار ۳ روزه اسید سالیسیلیک قبل از کاربرد

علف کش کلتودپیم در ذرت، کاهش معنی دار مالون دی آلدئید و بهبود سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی را گزارش نمودند (Radwan and Soltan, 2012). از سوی دیگر گزارش شده است که کاربرد اسید سالیسیلیک ۲۴ ساعت قبل از علف کش گلایفوسیت در گندم، باعث کاهش مؤثر شاخص های تنش اکسیداتیو شده است (Shopova et al., 2021). بر این اساس، فاصله زمانی ۳ روز (۷۲ ساعت) در این پژوهش جهت اطمینان از القای کامل سیستم آنتی اکسیدانی و هماهنگی با مرحله رشدی گیاه انتخاب گردید. هیبرید مورد استفاده در این آزمایش اسکار بود. این هیبرید زودرس با طول دوره رشد تقریبی ۱۰۵ روز و ارتفاع بوته متوسط، مقاوم به ورس و درصد روغن ۴۸-۵۱ درصد است. جهت آماده سازی زمین آزمایش عملیات شخم، دیسک و تسطیح در اسفند ماه انجام شد. بذر روغنی هیبرید اسکار از شرکت نگین سبز برنا دزفول تهیه گردید. روش کاشت به صورت جوی و پشته شامل ۵ خط کاشت با طول ۴ متر و فاصله ردیف ۶۰ سانتی متر و فاصله بذرها روی ردیف ۱۵ سانتی متر بود. یک خط نکاشت بعنوان فاصله بین کرت های آزمایشی در نظر گرفته شد. در هر محل کشت ۳ عدد بذر به عمق ۲-۳ سانتی متر قرار داده شد و بعد از سبز شدن در مرحله ۲-۴ برگ گیاهچه ها تنک شدند. قبل از اجرای آزمایش، نمونه هایی مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری خاک تهیه و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک محل آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. مرحله ی محلول پاشی سالیسیلیک اسید در مرحله ی ۸ الی ۱۰ برگ گیاه آفتابگردان انجام گردید و ۳ روز بعد از آن تیمار سم لینورون اعمال شد. ۲۸ روز بعد از اعمال علف کش، از آخرین برگ های توسعه یافته ی آفتابگردان و همچنین علف های هرز در مساحت یک متر مربع از هر کرت نمونه برداری صورت گرفت و آفتابگردان و علف های هرز، در درون پاکت ها در آونی با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت نگهداری و پس از اطمینان از خشک بودن، نمونه ها توزین شد. مقدار مصرفی کودهای شیمیایی NPK طبق گزارش تجزیه خاک در دو مرحله اجرا گردید (جدول ۲). همچنین نحوه ی آبیاری در این طرح به صورت جوی و پشته بود. اعمال تیمارهای مذکور با سمپاش پشته ی شارژی بعد از کالیبره کردن انجام شد.

جدول ۱: میانگین آمار هواشناسی محل اجرای پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱

سال	ماه	دمای حداکثر (سانتی گراد)	دمای حداقل (سانتی گراد)	میزان بارندگی (میلی متر)	میزان تبخیر (میلی متر)
۱۴۰۰	آبان	۳۱/۳	۱۵/۲	۸/۷	۱۵۲/۷
	آذر	۲۳/۷	۱۰/۷	۴۴/۱	۸۷/۸
	دی	۱۸/۲	۶/۸	۶۵/۱	۵۵/۳
	بهمن	۲۰/۶	۶/۵	۱۳/۴	۹۳/۶
	اسفند	۲۵/۱	۱۱/۷	۳/۴	۱۴۷/۴
۱۴۰۱	فروردین	۳۲/۵	۱۴/۷	۰	۲۳۱
	اردیبهشت	۳۶/۳	۲۰/۱	۹/۸	۳۰۲

جدول ۲: خصوصیات خاک محل اجرای پژوهش در زمان شروع آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	نیتروژن (N) (میلی گرم بر کیلوگرم)	فسفر (P) (میلی گرم بر کیلوگرم)	پتاس (K) (میلی گرم بر کیلوگرم)	اسیدیته	بافت خاک
۰-۳۰	۲/۸۱	۰/۰۵	۹/۳۶	۱۳۸	۷/۵	رسی سیلتی

صفات مورد بررسی در این آزمایش مربوط به عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان و وزن خشک علف هرز اندازه‌گیری شد. مهم‌ترین علف‌های هرز در این تحقیق سوروف، پیچک صحرایی، پنیرک، تاج خروس، سلمه تره و یونجه وحشی بودند. برداشت بوته‌های آفتابگردان و همچنین علفهای هرز از دو خط وسط پس از حذف حاشیه نیم متر از دو طرف هر کرت به مساحت یک متر مربع به صورت دستی و با داس از کف زمین انجام شد و نمونه‌های مربوط به هر کرت آزمایشی جدا، بعد از قرار گرفتن در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و ثابت ماندن وزن خشک، وزن شدند. دانه‌های بوته‌های مذکور از طبق جدا شده و پس از وزن کردن آنها مقدار عملکرد دانه در هکتار محاسبه گردید. جهت محاسبه تعداد دانه در طبق از هر کرت به جز خطوط حاشیه، ۱۱ طبق جدا شده و دانه‌های آنها خارج شده و سپس با استفاده از دستگاه بذر شمار تعداد دانه در طبق محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری وزن هزار دانه دو نمونه ۵۰۰ عددی از بذرها توسط دستگاه بذر شمار محاسبه گردید. بذرها شمارش شده توزین و در صورتی که تفاوت وزن آنها از ۴ درصد کم‌تر بود، حاصل جمع آن دو نمونه به عنوان وزن هزار دانه منظور شد. برای اندازه‌گیری درصد روغن دانه از دستگاه سوکسله استفاده گردید. عملکرد روغن از حاصلضرب درصد روغن در عملکرد دانه محاسبه گردید. نمونه‌برداری جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان مالون دی‌آلدئید از جوانترین برگ کامل به صورت پس‌رویشی بر اساس مقیاس استاندارد BBCH (Meier, 2018) که یک سیستم کدگذاری یکنواخت برای مراحل فنولوژیک گیاهان زراعی است، در مرحله ۸ برگ‌گی (کد ۱۸ BBCH) و پنج روز پس از کاربرد علفکش انجام شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز از روش ابی^۱ (۱۹۸۴) استفاده شد. بدین منظور مخلوط سه محلول شامل ۷۵۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار محلول در فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷) و ۷۵۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷) و ۱۵۰۰ میکرولیتر آب مقطر دوبار تقطیر شده به اضافه ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی (برای کل محلول) در یک کووت سه میلی‌لیتری ریخته و با قرار دادن در دستگاه اسپکتروفتومتر، فعالیت آنزیم کاتالاز در طول موج ۲۴۰ نانومتر و در مدت زمان واکنش ۱۸۰ ثانیه برحسب abs/min اندازه‌گیری شد. میزان مالون دی‌آلدئید (MDA) را بر اساس روش Heath و

^۱- Aebi

Packer (۱۹۶۸) تعیین کرد، که محصول نهایی پراکسیداسیون چربی است. در ابتدا نیم گرم برگ ۱۰ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید ۰/۱ درصد عصاره گیری شده و به مدت ۱۵ دقیقه در ۱۵۰۰۰ هزار دور سانتریفیوژ قرار گرفت. به ازای هر یک میلی لیتر عصاره، ۴ میلی لیتر محلول تری کلرو استیک اسید ۲۰ درصد حاوی ۰/۵ درصد الکل تری بوتیل الکل (TBA) اضافه گردید. ظرف حاوی عصاره به مدت ۳۰ دقیقه در ۹۵ درجه سانتی گراد حرارت داده شد و سپس ظرف حاوی عصاره در حمام یخ خنک شد. عصاره ها به مدت ده دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. قرائت در طول موج-های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر انجام گردید (شاهد ۲ میلی لیتر الکل TBA و یک میلی لیتر آب مقطر) و از قرائت در طول موج ۶۰۰ نانومتر کسر گردید (قرائت در طول موج ۶۰۰ نانومتر نشان دهنده مواد همراه غیر ضروری در نمونه می باشد).

تجزیه آماری داده های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) و مقایسه میانگین به روش دانکن و در سطح آماری پنج درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

عملکرد ماده خشک آفتابگردان

بر اساس نتایج جدول ۳، از میان فاکتورهای آزمایش، تنها اثر اصلی علف کش لینورون بر عملکرد ماده خشک آفتابگردان در سطح یک درصد معنی دار بود، در حالی که اثرات اصلی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل آن با لینورون فاقد معنی داری آماری تشخیص داده شد. بالاترین میزان ماده خشک (۱۲۷۴۹ و ۱۲۶۶۷ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب در تیمارهای ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار لینورون حاصل گردید که اختلافی معادل ۴۷ و ۴۶ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد علف کش) نشان دادند (جدول ۴). افزایش چشمگیر زیست توده رویشی در پاسخ به کاربرد لینورون را می توان به مهار مؤثر طیف وسیعی از علف های هرز (به ویژه سوروف، تاج خروس و سلمه تره) نسبت داد که با کاهش وزن خشک علف های هرز از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار همراه بود. این رخداد، رقابت بر سر منابع حیاتی مانند نور، آب و عناصر غذایی به ویژه نیتروژن را به شدت کاهش می دهد و در نتیجه، گیاه آفتابگردان قادر است سطح برگ و شاخص سطح برگ خود را افزایش داده، کارایی مصرف نور را بهبود بخشد و از طریق افزایش فتوسنتز خالص، ماده خشک بیشتری را در اندام های هوایی انباشته سازد. به بیان دیگر، به نظر می رسد که در شرایط عدم کنترل علف های هرز، منبع اصلی محدودکننده رشد آفتابگردان، همانا رقابت بین گونه ای بوده است و حذف این رقابت، پتانسیل ژنتیکی گیاه را برای تولید زیست توده آشکار ساخته است. در مقابل، عدم معنی داری اثر اسید سالیسیلیک بر ماده خشک آفتابگردان در این آزمایش، یافته ای قابل تأمل است که چند تفسیر فیزیولوژیک برای آن می توان متصور شد. نخست آنکه اسید سالیسیلیک اگرچه به عنوان یک تنظیم کننده رشد، می تواند با افزایش هدایت روزنه ای، جذب CO_2 و تعرق، تبادلات گازی و عملکرد

فتوسنتزی را بهبود دهد و در نهایت باعث افزایش سطح برگ یا زیست توده شود (Aires *et al.*, 2022). اما در شرایطی که تنش اکسیداتیو حاصل از علف کش، به طور مستقیم ساختار فتوسیستم های گیاه زراعی را تخریب نکند (همان گونه که در سطوح متوسط و بالای لینورون، افزایش ماده خشک مشاهده شد)، اثر تقویتی اسید سالیسیلیک بر زیست توده رویشی چندان محسوس نخواهد بود. به عبارت دیگر، لینورون در دُرهای مصرفی این پژوهش، اگرچه با القای گونه های فعال اکسیژن باعث بروز تنش اکسیداتیو در آفتابگردان می شود (که با تغییرات معنی دار مالون دی آلدئید و کاتالاز در همین پژوهش تا حدودی تایید گردید)، اما این تنش به حدی نیست که رشد رویشی گیاه زراعی را مختل کند؛ بلکه بیشتر بر فرآیندهای زایشی و کیفیت روغن تأثیر می گذارد. از سوی دیگر، اسید سالیسیلیک ممکن است به جای اختصاص دادن کربوهیدرات های فتوسنتزی به ساقه و برگ (ماده خشک رویشی)، منابع را به سوی تولید دانه و روغن (شاخص برداشت) هدایت نماید، که این تفسیر با افزایش معنی دار عملکرد دانه و روغن در تیمارهای ترکیبی طبق جدول ۵ همخوانی کامل دارد. اسید سالیسیلیک ممکن است، به ویژه تحت شرایط تنش، با تقویت بازتخصیص کربن و نیتروژن به مخزن و بهبود برخی مؤلفه های عملکرد دانه و شاخص برداشت همراه باشد، با این حال، این اثر به غلظت، روش کاربرد و وضعیت گیاه وابسته است (Sharma *et al.*, 2018; Miura & Tada, 2014). شواهد موجود نشان می دهند که اسید سالیسیلیک می تواند در برخی گیاهان و به ویژه تحت تنش، با تقویت انتقال مجدد کربن و نیتروژن به اندام های زایشی، تعداد و وزن دانه و شاخص برداشت را افزایش دهد؛ اما این موضوع الزاماً به معنای کاهش تخصیص کربوهیدرات به ساقه و برگ یا انتقال مستقیم کربوهیدرات های فتوسنتزی نیست. در سویا تحت خشکی، تیمار اسید سالیسیلیک با افزایش بازتخصیص کربن و نیتروژن به مخزن های زایشی و افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت همراه بود (Sharma *et al.*, 2018). در مقابل، برخی مطالعات افزایش همزمان رشد رویشی، عملکرد دانه و مقدار روغن را گزارش کرده اند. برای مثال، در سویا، اسید سالیسیلیک علاوه بر افزایش عملکرد دانه، صفات رشد و وزن خشک گیاه را نیز افزایش داد؛ بنابراین این نتایج از جایگزینی قطعی رشد رویشی با تولید دانه پشتیبانی نمی کنند (Sadak *et al.*, 2013). در کتان نیز کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش عملکرد دانه، درصد روغن یا عملکرد روغن شد، اما این مطالعات تخصیص کربوهیدرات بین اندام های رویشی و زایشی را به طور مستقیم اندازه گیری نکردند (Singh *et al.*, 2026). محلول پاشی اسید سالیسیلیک در مرحله رویشی، در برخی شرایط آزمایشی، توانسته است عملکرد بیولوژیک آفتابگردان را افزایش دهد، با این حال، میزان این پاسخ به وضعیت آبی و مرحله کاربرد وابسته است (Bukhsh *et al.*, 2009). اما این افزایش اغلب در شرایط اعمال تنش های غیرزیستی شدید (خشکی یا شوری) گزارش شده است، جایی که سیستم آنتی اکسیدانی نقش تعیین کننده ای در حفظ ساختار کلروپلاست و تداوم فتوسنتز دارد. در پژوهش حاضر، به نظر می رسد که نقش غالب در تعیین زیست توده نهایی، نه توانایی

آنتی اکسیدانی ذاتی گیاه، بلکه شدت رقابت علف های هرز بوده است؛ چراکه حتی در غیاب اسید سالیسیلیک، افزایش غلظت لینورون به تنهایی توانست ماده خشک را به حداکثر برساند. همچنین، دُزهای بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی مولار) نه تنها اثری افزایشی بر ماده خشک نداشتند، بلکه در برخی ترکیبات (مثلاً ۱ لیتر لینورون + ۲ میلی مولار اسید سالیسیلیک) کاهش نسبی زیست توده مشاهده شد که می تواند ناشی از اثرات آللوپاتیک یا القای تنش هورمونی در غلظت های فراتر از آستانه بهینه باشد. در مجموع، می توان چنین استنباط کرد که عملکرد ماده خشک آفتابگردان در این آزمایش، عمدتاً تابعی از موفقیت در کنترل علف های هرز است و اسید سالیسیلیک اگرچه نقش مؤثری در تعدیل تنش اکسیداتیو و بهبود اجزای عملکرد دانه دارد، اما تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر تولید زیست توده رویشی در شرایط حاکم بر این پژوهش نداشته است.

وزن خشک علف هرز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که از میان عوامل آزمایشی، تنها اثر اصلی علف کش لینورون بر وزن خشک علف های هرز در سطح آماری یک درصد معنی دار بود، در حالی که اثر اصلی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل این دو تیمار فاقد معنی داری بود (جدول ۳). این یافته به روشنی حاکی از آن است که کاهش زیست توده علف های هرز در این پژوهش، بیشتر و به طور مستقل از غلظت اسید سالیسیلیک مصرفی، ناشی از عملکرد مستقیم علف کش لینورون بوده است. به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک نه به تنهایی و نه در تعامل با لینورون، نتوانسته است تغییر معنی داری در وزن خشک نهایی علف های هرز ایجاد کند. مقایسه میانگین سطوح علف کش نشان داد که بیشترین وزن خشک علف هرز (۱۲۱۷ کیلوگرم در هکتار) در شرایط عدم کاربرد لینورون ثبت شد که بیانگر توانایی بالای جامعه علف های هرز (شامل سوروف، تاج خروس، سلمه تره و پیچک صحرایی) در استقرار و رقابت با آفتابگردان در غیاب کنترل شیمیایی است (جدول ۴). با افزایش دُز لینورون از ۰/۲۵ تا ۱ لیتر در هکتار، وزن خشک علف هرز به طور معنی دار و پله ای کاهش یافت و کم ترین میزان (۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) در بالاترین سطح مصرفی (۱ لیتر در هکتار) حاصل شد. این روند کاهشی معنی دار، مؤید کارایی مطلوب لینورون در مهار طیف وسیعی از علف های هرز مزارع آفتابگردان است و با نتایج پژوهش های پیشین در خصوص تأثیر این علف کش بر کاهش زیست توده علف های هرز همخوانی دارد (Heap, 2023; Gürbüz & Alptekin, 2024). اما نکته شایان تأمل، عدم تأثیر معنی دار اسید سالیسیلیک بر وزن خشک علف هرز است. هرچند برخی از محققان پیشنهاد کرده اند که اسید سالیسیلیک می تواند با افزایش حساسیت علف های هرز به علف کش ها، کارایی کنترل شیمیایی را بهبود بخشد (Farooq et al., 2008; Khan et al., 2015) اما نتایج پژوهش حاضر چنین اثر هم افزایی را تأیید نمی کند. چندین توجیه فیزیولوژیک و اکولوژیک برای این عدم پاسخ قابل ارائه است. نخست آن که در این آزمایش، اسید

سالیسیلیک سه روز قبل از علفکش به صورت محلول پاشی بر روی آفتابگردان اعمال شد. اگرچه این فاصله زمانی برای القای سیستم آنتی اکسیدانی در گیاه زراعی مؤثر بوده است (همان گونه که با افزایش فعالیت کاتالاز و کاهش مالون دی آلدئید تأیید گردید)، اما ممکن است برای ایجاد تغییرات فیزیولوژیک قابل توجه در علفهای هرز (که اهداف مستقیم محلول پاشی نبوده اند) کافی نبوده باشد. همچنین غلظت های به کار رفته اسید سالیسیلیک (۵/۰ تا ۲ میلی مولار) اگرچه برای تعدیل تنش اکسیداتیو در آفتابگردان بهینه بوده، اما ممکن است برای تحریک پاسخ های دفاعی یا افزایش جذب علفکش در علفهای هرز در آستانه مؤثر قرار نداشته باشد (Ramu *et al.*, 2016). دوم آن که لینورون از علفکش های گروه فنیل اوره هاست و با مهار انتقال الکترون در فتوسیستم II، فرایند فتوسنتز را مختل می کند. مهارکننده های فتوسیستم II با اتصال به پروتئین D1، انتقال الکترون به پلاستوکوینون را مسدود می کنند؛ در نتیجه تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتروشیمیایی مختل می شود و به طور مستقیم فرایند فتوسنتز را مختل می کند (Fuerst & Norman, 1991). مطالعات نشان داده اند که لینورون در دُزهای مشخص می تواند کنترل قابل توجهی ایجاد کند، اما این نتیجه به معنی مؤثر بودن هر غلظت پایین برای همه گونه ها نیست (Soltani *et al.*, 2011). بنابراین، قدرت بالای لینورون در کنترل علف هرز به حدی بوده که جایی برای اثرات تکمیلی یا تعدیل کننده اسید سالیسیلیک باقی نگذاشته است. به عبارت دیگر، در شرایطی که علفکش به تنهایی قادر به کاهش ۴۱ درصدی وزن خشک علف هرز (از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) است، افزودن اسید سالیسیلیک نمی تواند اثر قابل اندازه گیری بر این صفت بیفزاید. سوم آن که، اسید سالیسیلیک تأثیر معنی داری بر افزایش زیست توده رویشی گیاه زراعی نداشت. از آنجا که هر گونه افزایش غیرمستقیم توان رقابتی آفتابگردان (از طریق افزایش رشد یا سطح برگ) می تواند به طور ثانویه بر جمعیت علفهای هرز تأثیر بگذارد، عدم تغییر معنی دار در ماده خشک آفتابگردان توسط اسید سالیسیلیک، توجه گر عدم تأثیر غیرمستقیم این ترکیب بر وزن خشک علف هرز است. به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک اغلب از طریق تقویت سیستم آنتی اکسیدانی و بهبود فرایندهای زایشی عمل کرده است، نه از طریق تغییر محسوس در رقابت رویشی. چهارمین موردی که می توان به آن اشاره کرد واکنش متفاوت گونه های علفهای هرز به اسید سالیسیلیک است. پژوهش ها نشان داده اند که پاسخ علفهای هرز به اسید سالیسیلیک وابسته به گونه است و ممکن است برخی گونه ها با افزایش رشد یا تغییر در متابولیسم به اسید سالیسیلیک پاسخ دهند (Khan *et al.*, 2015). در این مطالعه، جامعه علف هرز شامل گونه های متنوعی بود که احتمال دارد واکنش های متفاوتی نشان داده باشند و در نتیجه اثر کلی خنثی یا غیرمعنی دار شده است. همچنین ممکن است اسید سالیسیلیک در غلظت های بالاتر (بیش از ۲ میلی مولار) بتواند بر فیزیولوژی علف هرز مؤثر باشد، اما در این آزمایش چنین غلظت هایی بررسی نشد. نتایج پژوهش حاضر با یافته های Farooq و همکاران (۲۰۰۸) که گزارش کردند اسید سالیسیلیک

می تواند حساسیت علف های هرز را به علف کش افزایش دهد، در تناقض نیست، بلکه نشان می دهد که این اثر وابسته به شرایط آزمایش، نوع علف کش، گونه علف هرز، غلظت و زمان کاربرد است. در مطالعه مذکور، اسید سالیسیلیک بر روی بذر یا گیاهچه علف هرز اعمال شده بود، در حالی که در پژوهش حاضر، اسید سالیسیلیک تنها روی گیاه زراعی محلول پاشی شد و علف های هرز به طور مستقیم تحت تأثیر آن قرار نگرفتند. از سوی دیگر، تحقیقات جدیدتر نشان داده اند که اسید سالیسیلیک می تواند از طریق افزایش تحمل گیاه هدف، به طور غیرمستقیم کارایی علف کش را بهبود بخشد، اما این بهبود در کاهش زیست توده علف هرز نیست، بلکه در حفظ عملکرد گیاه زراعی در حضور علف کش است که با نتایج این پژوهش (افزایش عملکرد دانه و روغن در تیمارهای ترکیبی) همخوانی دارد (Essa et al., 2023; Traxler et al., 2023). در مجموع، می توان نتیجه گرفت که در شرایط این آزمایش، عامل اصلی و تعیین کننده در کاهش وزن خشک علف های هرز، تنها کاربرد علف کش لینورون بوده و اسید سالیسیلیک با دُرها و روش کاربرد به کاررفته، تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم قابل توجهی بر مهار علف های هرز نداشته است. این یافته از دیدگاه مدیریت تلفیقی علف های هرز حائز اهمیت است، چراکه نشان می دهد در شرایطی که علف کش مؤثری مانند لینورون در دُز مناسب استفاده شود، افزودن اسید سالیسیلیک تنها به منظور افزایش مهار علف هرز ضرورتی ندارد، اما می تواند به عنوان یک راهکار مکمل برای کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود عملکرد گیاه زراعی مد نظر قرار گیرد.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی علف کش لینورون بر عملکرد دانه آفتابگردان در سطح یک درصد معنی دار بود، در حالی که اثر اصلی اسید سالیسیلیک فاقد معنی داری آماری بود. اثر متقابل لینورون $\times$ اسید سالیسیلیک نیز در سطح خطای پنج درصد معنی دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر اصلی علف کش نشان داد که بالاترین عملکرد دانه (۳۹۳۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار یک لیتر در هکتار لینورون به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد علف کش با عملکرد ۲۶۲۴ کیلوگرم در هکتار) افزایشی حدود ۵۰ درصد را نشان می دهد (جدول ۴). تیمارهای ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار لینورون از این نظر تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند که حاکی از دستیابی به بیشینه پاسخ عملکردی در دُزهای میانی تا بالای علف کش است. این افزایش چشمگیر را می توان به کاهش معنی دار وزن خشک علف های هرز (از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) نسبت داد که به نوبه ی خود، رقابت بر سر منابع حیاتی (آب، نور و عناصر غذایی به ویژه نیتروژن) را به شدت کاهش داده است. در چنین شرایطی، گیاه آفتابگردان با بهره مندی از سطح برگ بیشتر، شاخص سطح برگ بهبود یافته و کارایی مصرف نور بالاتر، توانسته است فتوسنتز خالص را افزایش داده و بخش بیشتری از ماده ی خشک تولیدی را به دانه اختصاص دهد. این تفسیر با افزایش همزمان وزن هزار دانه (از ۴۶/۶ به ۵۵/۷ گرم) و ماده خشک کل (از

۸۶۷۱ به ۱۲۶۶۷ کیلوگرم در هکتار) در پاسخ به افزایش دُز لینورون همخوانی کامل دارد. هرچند اثر متقابل در سطح ۵ درصد معنی‌دار نشد، اما بررسی روند داده‌ها در جدول ۵ نشان می‌دهد که در سطوح بالای علف‌کش (۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار)، کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار موجب افزایش عملکرد دانه نسبت به تیمارهای فاقد اسید سالیسیلیک گردیده است به‌طوری‌که بالاترین عملکرد دانه (۴۱۷۰ کیلوگرم در هکتار) در ترکیب تیماری یک لیتر لینورون همراه با ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک ثبت شد که حدود ۴/۵ درصد نسبت به تیمار یک لیتر لینورون بدون اسید سالیسیلیک (۳۹۹۷ کیلوگرم در هکتار) افزایش نشان می‌دهد. هرچند این افزایش از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود، اما از دیدگاه زراعی و اقتصادی قابل توجه است و نشان‌دهنده روند مثبت اثر حفاظتی اسید سالیسیلیک است. به‌نظر می‌رسد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، از طریق فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی (که با افزایش فعالیت کاتالاز از ۱۱/۱۴ به ۹۵/۴۵ میکرومول در دقیقه در همین ترکیب تیماری همراه بود) و کاهش تنش اکسیداتیو (کاهش مالون‌دی‌آلدئید از ۲۷/۷۷ به ۹/۰۸ میکرومول در گرم)، توانسته است از آسیب به غشای سلولی و ساختار کلروپلاست در طول دورهٔ پر شدن دانه جلوگیری کند و در نتیجه، انتقال مجدد مواد فتوسنتزی به مخزن (دانه) را بهبود بخشد. این یافته با گزارش‌های Hayat و همکاران (۲۰۱۰) همخوانی دارد که اسید سالیسیلیک را عاملی برای افزایش فعالیت فتوسنتزی، بهبود جذب عناصر و افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی معرفی کرده‌اند. نکتهٔ قابل تأمل دیگر، رفتار عملکرد دانه در پاسخ به غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی‌مولار) است. در سطوح بالای علف‌کش (۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار)، افزایش غلظت اسید سالیسیلیک از ۰/۵ به ۱ و ۲ میلی‌مولار نه‌تنها افزایش بیشتری در عملکرد دانه به همراه نداشت، بلکه در برخی موارد (مانند تیمار یک لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با عملکرد ۳۷۲۶/۴ کیلوگرم در هکتار) کاهش نسبی نسبت به غلظت ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده شد. این پدیده را می‌توان به اثرات دوگانهٔ اسید سالیسیلیک نسبت داد، به‌گونه‌ای که در غلظت‌های پهنه (۰/۵ میلی‌مولار) نقش تعدیل‌کنندهٔ تنش و محرک رشد را ایفا می‌کند، اما در غلظت‌های فراتر از آستانهٔ تحمل، خود به‌عنوان یک عامل تنش‌زای هورمونی عمل کرده و ممکن است با القای تولید گونه‌های فعال اکسیژن یا ایجاد اختلال در تعادل هورمونی گیاه، فرایندهای زایشی را تحت تأثیر منفی قرار دهد (Mehak *et al.*, 2021; Ramu *et al.*, 2016). همچنین، غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک می‌توانند سنتز اتیلن را تحریک کرده و ریزش گل یا دانه‌های جوان را افزایش دهند که این امر در کاهش تعداد دانه در طبق در غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک مشهود است (جدول ۵). به‌عنوان نمونه، در تیمار یک لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، تعداد دانه در طبق به ۱۰۴۲ عدد کاهش یافت که نسبت به تیمار ۰/۵ میلی‌مولار (۱۰۹۱ دانه) کمتر است. از سوی دیگر، در سطوح پایین علف‌کش (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، به‌دلیل کنترل ناقص علف‌های هرز و بقای رقابت، عملکرد پایهٔ دانه در

سطح نسبتاً پایینی قرار دارد. در این شرایط، اسید سالیسیلیک (حتی در غلظت‌های بالاتر) نمی‌تواند کمبود شدید منابع ناشی از رقابت علف‌هرز را جبران کند و بنابراین، اثر افزایشی محسوسی بر عملکرد دانه ندارد. این مشاهدات به‌خوبی نشان می‌دهد که اثر تعدیل‌کننده اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه، هنگامی به‌حداکثر می‌رسد که علف کش توانسته باشد بستر رقابتی را به نفع گیاه زراعی تغییر دهد (یعنی در دُزهای مؤثر ۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار). در واقع، یک هم‌افزایی نسبی میان مهار علف‌هرز توسط لینورون و کاهش تنش اکسیداتیو توسط اسید سالیسیلیک وجود دارد که در غیاب کنترل مؤثر علف‌هرز، اثر دوم به‌تنهایی نمی‌تواند عملکرد را به سطح مطلوب برساند. مقایسه عملکرد دانه با ماده خشک آفتابگردان (که تحت تأثیر اسید سالیسیلیک تغییر معنی‌داری نیافت) نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک بیشتر از طریق افزایش شاخص برداشت (نسبت دانه به ماده خشک کل) عمل کرده است، نه از طریق افزایش کل زیست‌توده رویشی. به‌عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک با بهبود کارایی انتقال مجدد کربوهیدرات‌های ذخیره‌شده در ساقه و برگ به سمت دانه‌ها، سهم بیشتری از ماده‌ی خشک تولیدی را به عملکرد دانه اختصاص داده است. این تفسیر با پژوهش‌های Sharma و همکاران (۲۰۱۸) در گیاه سویا و Sadak و همکاران (۲۰۱۳) که گزارش کردند اسید سالیسیلیک می‌تواند با افزایش بازتخصیص مواد فتوسنتزی به مخزن‌های زایشی، عملکرد دانه را بدون تغییر عمده در زیست‌توده رویشی افزایش دهد، هماهنگی کامل دارد. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که عملکرد دانه آفتابگردان در درجه نخست تابعی از موفقیت در کنترل علف‌های هرز توسط لینورون است. با این حال، کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، به‌ویژه در دُزهای مؤثر علف‌کش، می‌تواند از طریق تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و بهبود انتقال مجدد مواد به دانه، عملکرد دانه را تا آستانه قابل‌توجهی (هرچند در این آزمایش فاقد معنی‌داری آماری در سطح ۵ درصد) افزایش دهد. بنابراین، اگرچه اثر متقابل از دیدگاه آماری در سطح ۵ درصد تأیید نشد، اما روندهای مشاهده شده و هماهنگی آن با مکانیسم‌های فیزیولوژیک شناخته‌شده، ضرورت بررسی این ترکیب تیماری در شرایط محیطی متفاوت و با تکرارهای بیشتر را برای پژوهش‌های آتی آشکار می‌سازد. توصیه می‌شود در تحقیقات بعدی، دامنه غلظت‌های اسید سالیسیلیک بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌مولار با فواصل دقیق‌تر (مثلاً ۰/۲۵ میلی‌مولار) بررسی شود تا غلظت بهینه با دقت بالاتری تعیین گردد.

عملکرد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی علف کش لینورون و اسید سالیسیلیک و نیز اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد روغن آفتابگردان در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). این معنی‌داری اثر متقابل در مقایسه با عملکرد دانه (که اثر متقابل آن در سطح پنج درصد معنی‌دار نشد) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک نه تنها بر کمیت دانه، بلکه به‌طور مؤثرتری بر کیفیت و محتوای روغن آن اثر می‌گذارد. به‌عبارت دیگر، عملکرد روغن که از

حاصلضرب عملکرد دانه در درصد روغن به دست می‌آید، به عنوان شاخصی جامع‌تر از پاسخ گیاه به تیمارهای آزمایشی، حساسیت بیشتری به برهم‌کنش لینورون و اسید سالیسیلیک نشان داده است. مقایسه میانگین اثرات متقابل روند مشخصی را آشکار می‌سازد (جدول ۵). با افزایش غلظت لینورون از صفر به یک لیتر در هکتار، عملکرد روغن به طور کلی افزایش یافته است، اما این افزایش در حضور اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار به حد اکثر خود می‌رسد. بالاترین عملکرد روغن (۱۴۵۹ کیلوگرم در هکتار) در تیمار یک لیتر لینورون همراه با ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک ثبت شد که نسبت به تیمار شاهد (۷۲۱/۴ کیلوگرم در هکتار) افزایشی برابر با ۱۰۲ درصد را نشان می‌دهد. تیمار ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با عملکرد ۱۴۵۰/۱ کیلوگرم در هکتار، در رتبه بعدی قرار گرفت و اختلاف ناچیزی با تیمار برتر داشت. این یافته به وضوح حاکی از آن است که ترکیب دُز مؤثر علف‌کش (۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار) با غلظت پایین اسید سالیسیلیک (۰/۵ میلی‌مولار) می‌تواند اثری هم‌افزا (سینرژیک) بر عملکرد روغن داشته باشد. برای تبیین این هم‌افزایی، می‌توان به چند مکانیسم فیزیولوژیک و بیوشیمیایی اشاره کرد: اول آن‌که یکی از مکانیسم‌ها کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت از غشاهای سلولی است. اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز (از ۱۱/۱۴ به ۹۵/۴۵ میکرومول در دقیقه در ترکیب یک لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) و کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید (از ۲۷/۷۷ به ۹/۰۸ میکرومول در گرم در همین تیمار)، از پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی جلوگیری کرده است. این موضوع برای بیوسنتز روغن حیاتی است، زیرا آنزیم‌های کلیدی مسیر سنتز اسیدهای چرب (مانند استیل‌کوآ کربوکسیلاز و سنتاز اسید چرب) در غشای کلروپلاست و شبکه آندوپلاسمی مستقر هستند و هرگونه آسیب اکسیداتیو به این ساختارها، کارایی آنزیم‌ها را کاهش داده و سنتز روغن را مختل می‌کند. نتایج پژوهش‌های Radwan و Soltan (۲۰۱۲) و Kaya و Yigit (۲۰۱۴) نیز نشان داده است که اسید سالیسیلیک با کاهش مالون‌دی‌آلدئید، از آسیب به غشاهای مواجهه با علف‌کش‌ها جلوگیری می‌کند و زمینه را برای ادامه فرایندهای بیوسنتزی فراهم می‌سازد. دوم آن‌که مکانیسم دیگر افزایش انتقال مجدد کربوهیدرات‌ها به دانه (تأمین بستر سنتز روغن) می‌باشد. هرچند اسید سالیسیلیک تأثیر معنی‌داری بر افزایش ماده خشک رویشی نداشت، اما احتمالاً با بهبود کارایی انتقال مجدد کربوهیدرات‌های محلول از برگ‌ها و ساقه به دانه‌های در حال رشد، بستر کربنی لازم برای سنتز اسیدهای چرب را افزایش داده است. پژوهش‌های Sharma و همکاران (۲۰۱۸) در سویا نشان داد که اسید سالیسیلیک می‌تواند بازتخصیص کربن و نیتروژن را به مخزن‌های زایشی افزایش دهد. در شرایطی که علف‌کش لینورون با کنترل علف‌های هرز، فشار رقابتی را برداشته و منبع (برگ‌های آفتابگردان) را تقویت کرده است، اسید سالیسیلیک با تسهیل انتقال مواد فتوسنتزی به دانه، درصد روغن را افزایش می‌دهد و در نتیجه، عملکرد روغن را به طور نامتناسب با افزایش عملکرد دانه بالا می‌برد. سوم آن‌که نکته شایان توجه اینکه اثر

متقابل بر عملکرد روغن در سطح یک درصد معنی دار شد، در حالی که اثر متقابل بر عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی دار نبود. این تفاوت آشکار نشان می دهد که اسید سالیسیلیک عمدتاً از طریق افزایش درصد روغن دانه (نه صرفاً افزایش تعداد یا وزن دانه) عمل کرده است. به عبارت دیگر، در تیمارهای ترکیبی (به ویژه ۰/۷۵ و ۱ لیتر لینورون همراه با ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک)، هر چند تعداد دانه و وزن هزار دانه نیز افزایش یافته بودند، اما سهم اصلی افزایش عملکرد روغن، ناشی از بهبود کیفیت دانه (افزایش درصد روغن) بوده است. این تفسیر با یافته های دولت آبادی و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی دارد که گزارش کردند محلول پاشی اسید سالیسیلیک در مرحله گلدهی، بالاترین درصد روغن را در آفتابگردان به همراه دارد. همچنین Sedghi و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که اسید سالیسیلیک با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، شرایط فیزیولوژیک مطلوب تری برای پر شدن دانه و انباشت روغن فراهم می کند. چهارم آن که نکته قابل توجه دیگر آن بود که در تمام سطوح علف کش، غلظت ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک بهترین پاسخ را در عملکرد روغن ایجاد کرد و افزایش غلظت به ۱ و ۲ میلی مولار نه تنها افزایش بیشتری به همراه نداشت، بلکه در برخی موارد (مانند ۱ لیتر لینورون + ۲ میلی مولار اسید سالیسیلیک با عملکرد ۱۴۳۳ کیلوگرم در هکتار) نسبت به غلظت ۰/۵ میلی مولار، کاهش جزئی نشان داد. این پدیده را می توان با اثر هورمیز (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) توجیه کرد. در غلظت های پایین (۰/۵ میلی مولار)، اسید سالیسیلیک به عنوان یک سیگنال دهنده تنش عمل کرده و بدون ایجاد آسیب، سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی را به گونه ای فعال می کند که هزینه متابولیکی آن با مزایای حفاظتی آن جبران می شود. اما در غلظت های بالاتر (۱ و ۲ میلی مولار)، اسید سالیسیلیک ممکن است خود به عنوان یک عامل تنش زای اکسیداتیو عمل کرده، تولید گونه های فعال اکسیژن را افزایش دهد، یا با تحریک سنتز اتیلن، ریزش دانه های جوان را تشدید کند (Ramu *et al.*, 2016; Mehak *et al.*, 2021). همچنین، غلظت های بالای اسید سالیسیلیک ممکن است با انحراف مسیر کربوهیدرات ها به سمت تولید ترکیبات دفاعی (فنل ها و لیگنین) به جای لیپیدها، از سنتز روغن بکاهد. مورد پنجم، نقش سطوح علف کش در تعیین پاسخ به اسید سالیسیلیک است. در سطوح پایین لینورون (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، به دلیل کنترل ناقص علف های هرز و بقای رقابت شدید، عملکرد پایه روغن در سطح پایینی قرار دارد. در این شرایط، حتی افزودن اسید سالیسیلیک (حتی در غلظت بهینه ۰/۵ میلی مولار) نمی تواند کمبود شدید منابع را جبران کند و بنابراین، اثر افزایشی آن چندان محسوس نیست. به عبارت روشن تر، اثر تعدیل کننده اسید سالیسیلیک بر سنتز روغن، هنگامی به حداکثر می رسد که گیاه زراعی از بستر رقابتی مناسبی برخوردار باشد (یعنی علف های هرز به خوبی کنترل شده باشند). در مقابل، در سطوح بالای علف کش (۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار) که منبع (برگ) در شرایط مطلوب فتوسنتزی قرار دارد، اسید سالیسیلیک با افزایش کارایی انتقال مجدد مواد و حفاظت از مسیرهای بیوسنتزی، توانسته است بخش قابل توجهی از پتانسیل ژنتیکی

گیاه را در تولید روغن آشکار سازد. در مجموع، نتایج این بخش به وضوح نشان می‌دهد که عملکرد روغن به عنوان یک شاخص اقتصادی و کیفی، نسبت به عملکرد دانه، پاسخ‌دهی حساستری به برهم‌کنش لینورون و اسید سالیسیلیک دارد. این حساسیت بالاتر، ناشی از تأثیر مستقیم اسید سالیسیلیک بر فرایندهای بیوشیمیایی سنتز روغن (از جمله کاهش تنش اکسیداتیو، حفاظت از آنزیم‌های کلیدی، و بهبود انتقال مجدد کربوهیدرات‌ها) است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، ترکیب علف‌کش لینورون در محدوده ۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار (سه روز پیش از کاربرد علف‌کش)، به عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد، سازگار با محیط زیست و کم‌خطر، برای دستیابی به حداکثر عملکرد روغن آفتابگردان قابل توصیه است. همچنین، با توجه به رفتار وابسته به غلظت اسید سالیسیلیک، تأکید می‌شود که افزایش دُز آن از آستانه ۰/۵ میلی‌مولار نه تنها سودمند نیست، بلکه ممکن است اثرات منفی بر کیفیت روغن و عملکرد داشته باشد؛ بنابراین، مدیریت دقیق غلظت اسید سالیسیلیک در برنامه‌های زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گزارش شده است که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در آفتابگردان در شرایط تنش خشکی، عملکرد روغن را به طور میانگین ۵/۳۳ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است (Sibi *et al.*, 2014). در مطالعه‌ای دیگر بر روی آفتابگردان، کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی، عملکرد روغن را تا ۳۳/۵ درصد بهبود بخشید (Hossini *et al.*, 2026). همچنین در پژوهشی دیگر گزارش شد که مصرف اسید سالیسیلیک می‌تواند اثرات منفی شوری در آفتابگردان را کاهش دهد و باعث افزایش محتوای روغن دانه و بهبود ترکیب اسیدهای چرب شود (Noreen & Ashraf, 2010).

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی علف‌کش لینورون بر وزن هزار دانه در سطح یک درصد معنی‌دار است، در حالی که اثر اصلی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل آن با لینورون فاقد معنی‌داری آماری تشخیص داده شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر اصلی علف‌کش نشان داد که بالاترین وزن هزار دانه (۵۵/۷ گرم) در تیمار یک لیتر در هکتار لینورون به دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (۴۶/۶ گرم) افزایشی حدود ۱۹ درصد را نشان می‌دهد (جدول ۴). تیمارهای ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار لینورون از این نظر تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند و در گروه آماری برتر قرار گرفتند. این افزایش چشمگیر در وزن هزار دانه را می‌توان به کاهش معنی‌دار وزن خشک علف‌های هرز (از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) نسبت داد که به نوبه خود، رقابت بر سر منابع حیاتی (آب، نور و عناصر غذایی به ویژه نیتروژن) را به شدت کاهش داده است. در چنین شرایطی، گیاه آفتابگردان با بهره‌مندی از سطح برگ بیشتر، شاخص سطح برگ بهبود یافته و کارایی مصرف نور بالاتر، توانسته است فتوسنتز خالص را افزایش داده و در دوره پر شدن دانه، سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی را به هر دانه اختصاص دهد. این تفسیر با افزایش هم‌زمان ماده خشک کل (از ۸۶۷۱ به ۱۲۶۶۷ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد دانه (از

۲۶۲۴ به ۳۹۳۷ کیلوگرم در هکتار) در پاسخ به افزایش دُز لینورون همخوانی کامل دارد و نشان می‌دهد که حذف رقابت علف‌هرز، هم از طریق افزایش تعداد دانه و هم از طریق افزایش وزن تک‌دانه، به بهبود عملکرد دانه منجر شده است. هرچند اثر متقابل لینورون و اسید سالیسیلیک بر وزن هزار دانه از دیدگاه آماری معنی‌دار نشد، اما بررسی روند داده‌ها در جدول ۵ نکات ارزشمندی را آشکار می‌سازد که می‌تواند راهگشای پژوهش‌های آتی باشد. در تیمار شاهد (عدم کاربرد لینورون و اسید سالیسیلیک)، وزن هزار دانه کم‌ترین مقدار (۴۶/۶ گرم) را داشت. با افزایش غلظت لینورون، وزن هزار دانه روند صعودی نشان داد، اما افزودن اسید سالیسیلیک در هر سطح از علف‌کش، تغییرات منظمی را ایجاد نکرد؛ به‌گونه‌ای که در برخی سطوح (مانند ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و ۰/۵ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) وزن هزار دانه نسبت به تیمارهای فاقد اسید سالیسیلیک در همان سطح علف‌کش افزایش نشان داد، اما در سایر سطوح این روند یکنواخت نبود. این عدم معنی‌داری اثر متقابل را می‌توان به چند عامل فیزیولوژیک نسبت داد: اول آن‌که وابستگی وزن دانه به طول دوره پر شدن و میزان مواد فتوسنتزی یکی از نکات کلیدی است که می‌توان به اشاره کرد. وزن نهایی دانه آفتابگردان تابعی از نسبت منبع به مخزن پس از گل‌دهی، شامل عرضه مواد فتوسنتزی و تعداد دانه‌ها، است (Ruiz and Maddonni, 2006). اسید سالیسیلیک اگرچه با فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو (کاهش مالون‌دی‌آلدئید و افزایش کاتالاز) از تخریب کلروپلاست و کاهش فتوسنتز جلوگیری کرده است، اما تأثیر مستقیم و معنی‌داری بر افزایش سطح برگ یا دوام سبزی‌نگی (طول دوره پر شدن دانه) در این آزمایش نداشته است (همان‌گونه که در ماده خشک آفتابگردان نیز مشاهده شد). بنابراین، افزایش وزن دانه بیشتر به افزایش منبع ناشی از کنترل علف‌هرز توسط لینورون وابسته بوده است و اسید سالیسیلیک نتوانسته است سهم افزوده‌ای در این زمینه داشته باشد. دوم آن‌که رقابت درون‌گیاهی میان دانه‌ها برای سهم‌خواهی از فرآورده‌های فتوسنتزی از مواردی است که می‌تواند در نتایج به‌دست آمده موثر باشد. در سطوح بالای علف‌کش، تعداد دانه در طبق به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است (جدول ۵). این افزایش در تعداد دانه، به‌ویژه در حضور اسید سالیسیلیک (که خود می‌تواند از طریق بهبود گرده‌افشانی و لقاح، تعداد دانه را افزایش دهد)، ممکن است منجر به رقابت درون‌گیاهی میان دانه‌ها بر سر مواد فتوسنتزی محدود شده باشد. به‌عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک اگرچه با افزایش تعداد دانه (بهبود مخزن) سهمی در عملکرد داشته، اما این افزایش در تعداد، ممکن است با کاهش وزن هر دانه همراه شده باشد و در نتیجه، اثر خالص بر وزن هزار دانه خنثی یا ناچیز بوده است. این پدیده در برخی تیمارها (مانند ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک که تعداد دانه به ۹۰۳ عدد رسید اما وزن هزار دانه افزایش چندانی نسبت به تیمار شاهد نداشت) قابل مشاهده است. سوم آن‌که غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک که در سایر صفات (عملکرد روغن و کاتالاز) بهترین پاسخ را ایجاد کرده بود، در وزن هزار دانه نیز در برخی ترکیبات تیماری

(مانند ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار با وزن ۵۲ گرم و یک لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار با وزن ۵۴ گرم) افزایش نسبی نشان داد، اما این افزایش به سطح معنی‌دار آماری نرسید. در مقابل، غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی‌مولار) در برخی سطوح علف‌کش، نه تنها افزایش وزن دانه را به همراه نداشتند، بلکه در مواردی (مانند ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار با وزن ۴۸/۴ گرم) نسبت به حالت عدم کاربرد اسید سالیسیلیک در همان سطح علف‌کش (۴۸/۴ گرم) تفاوتی نشان ندادند. این رفتار وابسته به غلظت، که در صفات دیگر نیز مشاهده شد، حاکی از آن است که اسید سالیسیلیک در دُزهای فراتر از آستانهٔ بهینه، ممکن است با القای تنش‌های هورمونی یا افزایش هزینهٔ متابولیک، از تخصیص مواد به دانه بکاهد و در نتیجه، وزن هزار دانه را تحت تأثیر منفی قرار دهد (Ramu *et al.*, 2016; Mehak *et al.*, 2021). چهارم آن‌که، نکتهٔ شایان توجه دیگر آن است که اثر متقابل بر عملکرد روغن (که حاصل ضرب وزن دانه در درصد روغن است) در سطح یک درصد معنی‌دار شد، در حالی که بر وزن هزار دانه معنی‌دار نشد. این تفاوت آشکار نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک بیشتر از طریق افزایش درصد روغن دانه (کیفیت) عمل کرده است، نه از طریق افزایش وزن تک‌دانه (کمیت). به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک با کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت از آنزیم‌های بیوسنتز اسیدهای چرب، امکان انباشت بیشتر روغن را در بافت‌های ذخیره‌ای دانه فراهم کرده است، اما تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش وزن فیزیکی دانه (که بیشتر از کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها تشکیل شده) نداشته است. این تفسیر با یافته‌های Noreen و Ashraf (۲۰۱۰) در آفتابگردان و Sadak و همکاران (۲۰۱۳) در سویا همخوانی دارد که گزارش کردند اسید سالیسیلیک می‌تواند محتوای روغن را بدون تغییر چشمگیر در وزن دانه افزایش دهد. پنجم آن‌که، تیمار عدم کاربرد لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با وزن هزار دانه ۵۲/۵ گرم در گروه آماری به نسبت بالایی قرار گرفت، در حالی که در همین تیمار، تعداد دانه در طبق به ۱۱۲۰ عدد رسیده بود که بالاترین مقدار در بین تمام تیمارها بود (جدول ۵). این مشاهده حائز اهمیت است، زیرا نشان می‌دهد که شاید اسید سالیسیلیک در غیاب تنش علف‌کش (یعنی در شرایط بدون رقابت علف‌هرز) توانسته است با کاهش تنش اکسیداتیو زمینه‌ساز (کاهش مالون‌دی‌آلدئید به ۲۲/۱۶ میکرومول در گرم) و بهبود جذب عناصر، هم تعداد دانه و هم وزن آن‌ها را افزایش دهد. اما هنگامی که علف‌کش (لینورون) اعمال می‌شود، تنش اکسیداتیو ناشی از علف‌کش بر گیاه غالب شده و اسید سالیسیلیک اگرچه تا حدی آن را تعدیل می‌کند، اما نمی‌تواند به‌طور کامل از کاهش وزن دانه در اثر رقابت درون‌گیاهی (ناشی از افزایش تعداد دانه) جلوگیری کند. به عبارت روشن‌تر، در حضور علف‌کش، اسید سالیسیلیک بیشتر انرژی خود را صرف حفاظت از غشاها و حفظ فرایندهای زایشی (افزایش تعداد دانه و درصد روغن) می‌کند تا افزایش وزن تک‌دانه. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که وزن هزار دانه آفتابگردان، برخلاف عملکرد روغن، بیشتر تحت تأثیر کنترل علف‌های هرز توسط لینورون قرار دارد و اسید سالیسیلیک تأثیر مستقیم و

معنی داری بر این صفت نداشته است. با این حال، بررسی روند داده‌ها نشان می‌دهد که در غیاب تنش علف کش (تیمار شاهد)، اسید سالیسیلیک می‌تواند از طریق کاهش تنش اکسیداتیو زمینه‌ساز و بهبود پر شدن دانه، وزن هزار دانه را افزایش دهد، اما در شرایط اعمال علف کش، این اثر با افزایش تعداد دانه و رقابت درون گیاهی خنثی می‌شود. بنابراین، به نظر می‌رسد که اثر اسید سالیسیلیک بر وزن هزار دانه، غیرمستقیم و وابسته به شدت تنش (غلظت علف کش) و تعادل منبع-مخزن است. پژوهش‌های آتی با اندازه‌گیری دقیق‌تر طول دوره پر شدن دانه، سرعت پر شدن و میزان انتقال مجدد کربوهیدرات‌ها، می‌تواند به روشن‌تر شدن مکانیسم‌های دخیل در این فرایند کمک کند.

تعداد دانه در طبق

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داد که اثر متقابل علف کش لینورون و اسید سالیسیلیک بر تعداد دانه در طبق آفتابگردان در سطح پنج درصد معنی‌دار است. این معنی‌داری اثر متقابل، که در صفت وزن هزار دانه مشاهده نشد، نشان‌دهنده حساسیت بالای فرایندهای تشکیل و استقرار دانه به برهم‌کنش این دو تیمار است. به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک توانسته است از طریق مکانیسم‌های فیزیولوژیک خاص، بر تعداد دانه‌های تشکیل شده در هر طبق تأثیر بگذارد، در حالی که این تأثیر بر وزن نهایی هر دانه چندان محسوس نبوده است. مقایسه میانگین اثرات متقابل در جدول ۵ الگوی جالبی را آشکار می‌سازد که در چند سطح قابل بررسی است: اول آن که مقایسه میانگین‌ها روند مثبت کنترل علف‌هرز بر افزایش تعداد دانه در طبق را نشان داد. در سطوح بالای علف کش (۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار)، تعداد دانه در طبق به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. به عنوان نمونه، تیمار یک لیتر لینورون بدون اسید سالیسیلیک با ۱۰۱۳ دانه، نسبت به تیمار شاهد (۵۵۳ دانه) افزایشی حدود ۸۳ درصد را نشان می‌دهد. این افزایش چشمگیر را می‌توان به کاهش شدید رقابت علف‌های هرز (کاهش وزن خشک علف‌هرز از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) نسبت داد که به‌نوبه خود، دسترسی گیاه آفتابگردان به منابع حیاتی (به‌ویژه نیتروژن و فسفر) را افزایش داده است. نیتروژن و فسفر نقش کلیدی در تقسیم سلولی مریستم‌های گل‌آذین، تشکیل جوانه‌های گل، و کاهش ریزش گل‌ها و دانه‌های جوان دارند. در شرایط عاری از رقابت، گیاه می‌تواند تعداد بیشتری از گل‌های ماده را در طبق نگهداری کرده و از ریزش آن‌ها جلوگیری کند. دوم آن که نقش تعدیل‌کننده اسید سالیسیلیک در کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش بقای دانه از نکات قابل توجه است. در هر سطح از علف کش، کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش تعداد دانه نسبت به تیمارهای فاقد اسید سالیسیلیک گردید. به عنوان نمونه، در سطح یک لیتر لینورون، کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک تعداد دانه را از ۱۰۱۳ به ۱۰۹۱ عدد افزایش داد. این افزایش را می‌توان به کاهش معنی‌دار تنش اکسیداتیو (کاهش مالون‌دی‌آلدئید از

۱۱/۴۶ به ۹/۰۸ میکرومول در گرم) و افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز (از ۷۶/۷ به ۹۵/۴۵ میکرومول در دقیقه) نسبت داد. چنین بهبودی در سیستم آنتی اکسیدانی، از پراکسیداسیون لیپیدهای غشا در سلولهای مریستمی و بافتهای زایشی جلوگیری کرده و باعث کاهش ریزش دانه‌های جوان در مراحل حساس گل‌دهی و لقاح می‌شود. همچنین، اسید سالیسیلیک می‌تواند با بهبود گرده‌افشانی و افزایش جوانه‌زنی لوله‌گرده، تعداد دانه‌های بارور شده را افزایش دهد (Hayat *et al.*, 2010; Krantev *et al.*, 2008). یافته‌های این پژوهش با نتایج Noreen و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد که نشان دادند اسید سالیسیلیک با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، یکپارچگی غشاها را در شرایط تنش حفظ کرده و از ریزش اندامهای تولیدمثلی جلوگیری می‌کند. سوم آن‌که، قابل توجه‌ترین یافته در این بخش، ثبت بالاترین تعداد دانه در طبق (۱۱۲۰ عدد) در تیماری است که در آن علف‌کش لینورون به کار نرفته، اما اسید سالیسیلیک با غلظت ۲ میلی‌مولار محلول‌پاشی شده است. این تیمار حتی از تیمارهای ترکیبی با سطوح بالای علف‌کش نیز تعداد دانه بیشتری داشت. برای تبیین این پدیده، چند نکته فیزیولوژیک قابل طرح است. نخستین مورد که می‌توان به آن اشاره کرد اثر مستقیم اسید سالیسیلیک بر فرایندهای زایشی مستقل از رقابت علف‌هرز است. اسید سالیسیلیک در غیاب تنش علف‌کش (که خود یک تنش اکسیداتیو محسوب می‌شود)، با کاهش تنش اکسیداتیو زمینه‌ساز (کاهش مالون‌دی‌آلدئید به ۱۶/۲۲ میکرومول در گرم در مقایسه با ۲۷/۷۷ در شاهد) و بهبود جذب عناصر غذایی (به‌ویژه فسفر و بور که نقش کلیدی در گرده‌افشانی و لقاح دارند)، توانسته است شرایط فیزیولوژیک مطلوب‌تری برای تشکیل و نگهداری دانه فراهم آورد. همچنین، غلظت ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، اگرچه در برخی صفات دیگر (مانند عملکرد روغن) اثر بازدارنده نشان داد، اما بر روی فرایندهای گل‌دهی و تشکیل دانه، اثر محرک قابل توجهی داشته است. این رفتار وابسته به صفت، نشان‌دهنده آن است که پاسخ به اسید سالیسیلیک نه تنها به غلظت، بلکه به نوع فرایند فیزیولوژیک و سطح تنش زمینه‌ای نیز بستگی دارد (Ramu *et al.*, 2016). افزایش شاخص برداشت از طریق بهبود تقسیم سلولی و تمایز جوانه‌های گل: همان‌گونه که در بخش ماده خشک آفتابگردان اشاره شد، اسید سالیسیلیک در غلظت‌های بالا (۲ میلی‌مولار) تأثیر چندانی بر افزایش ماده خشک رویشی نداشت (افزایش ناچیز از ۸۶۷۱ به حدود ۹۰۰۰ کیلوگرم در هکتار). اما همین تیمار توانست تعداد دانه را از ۵۵۳ به ۱۱۲۰ عدد افزایش دهد. این تفاوت آشکار نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک بیشتر از طریق افزایش شاخص برداشت (نسبت دانه به ماده خشک کل) عمل کرده است و توانسته است مواد فتوسنتزی را به‌طور مؤثرتری به سمت مخزن‌های زایشی هدایت کند. به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک با بهبود انتقال مجدد کربوهیدرات‌های محلول از برگ‌ها و ساقه به طبق، و نیز با افزایش تقسیم سلولی در مریستم‌های گل‌آذین (از طریق تأثیر بر مسیرهای سیگنالینگ هورمونی مانند اکسین و سیتوکینین)، تعداد دانه‌های مستقر را افزایش داده است (Miura & Tada, 2014). این تفسیر با

پژوهش‌های Sharma و همکاران (۲۰۱۸) در سویا همخوانی دارد که نشان دادند اسید سالیسیلیک می‌تواند باز تخصیص کربن و نیتروژن را به مخزن‌های زایشی افزایش دهد. یکی از مواردی می‌توان اشاره نمود عدم رقابت درون گیاهی شدید در غیاب علف کش است. در تیمار عدم کاربرد لینورون، هرچند علف‌های هرز وجود داشتند و رقابت می‌کردند، اما تعداد طبق‌های تشکیل شده بر روی بوته‌های آفتابگردان به دلیل عدم سمیت علف کش، بیشتر بود. اسید سالیسیلیک با کاهش ریزش دانه‌های جوان در این طبق‌ها، توانست تعداد دانه را به حداکثر برساند. در مقابل، در تیمارهای دارای علف کش، گرچه رقابت علف‌هرز کاهش یافته بود، اما خود علف کش با القای تنش اکسیداتیو، تا حدودی فرایندهای زایشی را مختل کرده بود و اسید سالیسیلیک می‌بایست ابتدا این تنش را تعدیل می‌کرد و سپس به افزایش تعداد دانه می‌پرداخت. به نظر می‌رسد در تیمار عدم کاربرد لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، چون تنش مضاعفی از سوی علف کش وجود نداشته، اسید سالیسیلیک با غلظت بالاتر (۲ میلی‌مولار) توانسته است حداکثر پتانسیل خود را در افزایش تعداد دانه آشکار سازد. چهارم آن‌که، بررسی جدول ۵ نشان می‌دهد که در سطوح پایین علف کش (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، به دلیل کنترل ناقص علف‌های هرز و بقای رقابت شدید، تعداد دانه در سطح نسبتاً پایینی قرار دارد. در این شرایط، افزایش غلظت اسید سالیسیلیک از ۰/۵ به ۲ میلی‌مولار تأثیر چندانی بر افزایش تعداد دانه نداشت. این پدیده نشان می‌دهد که وقتی منبع (برگ‌ها) تحت تأثیر رقابت شدید علف‌هرز دچار کمبود مواد فتوسنتزی است، حتی اسید سالیسیلیک هم نمی‌تواند کمبود شدید منبع را جبران کند و تعداد دانه را به سطح مطلوب برساند. اما در سطوح بالای علف کش (۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار) که منبع در شرایط مطلوب فتوسنتزی قرار دارد، غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بهترین پاسخ را در افزایش تعداد دانه ایجاد کرد و غلظت‌های بالاتر (۱ و ۲ میلی‌مولار) نه تنها افزایش بیشتری به همراه نداشت، بلکه در برخی موارد کاهش نسبی نشان داد. به عنوان نمونه، در سطح ۰/۷۵ لیتر لینورون، تعداد دانه از ۹۵۶ (بدون اسید سالیسیلیک) به ۱۰۷۶ (با ۰/۵ میلی‌مولار) افزایش یافت، اما در غلظت ۲ میلی‌مولار به ۱۰۱۰ کاهش یافت. این روند نزولی در غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک را می‌توان به اثرات هورمیزس (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) نسبت داد که پیش‌تر نیز مطرح شد. غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک ممکن است با تحریک سنتز اتیلن، ریزش گل‌ها و دانه‌های جوان را افزایش داده و یا با اختلال در تعادل هورمونی گیاه، فرایندهای گل‌دهی را مختل کنند (Mehak et al., 2021). مورد پنجم، وجود رابطه معکوس تعداد دانه و وزن هزار دانه است. مقایسه روند تغییرات تعداد دانه در طبق با وزن هزار دانه در جدول ۵ وجود یک رابطه جبرانی منفی را آشکار می‌سازد. در تیمارهایی که تعداد دانه به حداکثر رسیده است (مانند عدم کاربرد لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با ۱۱۲۰ دانه)، وزن هزار دانه در سطح متوسط (۵۲/۵ گرم) قرار دارد، در حالی که در تیمار یک لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با تعداد دانه ۱۰۹۱، وزن هزار دانه به ۵۴ گرم رسیده است. این رابطه

معکوس نشان می‌دهد که وقتی تعداد دانه در طبق افزایش می‌یابد، رقابت درون‌گیاهی میان دانه‌ها بر سر مواد فتوسنتزی محدود تشدید می‌شود و در نتیجه، وزن هر دانه کاهش می‌یابد. اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار توانسته است این رابطه جبرانی را تا حدودی تعدیل کند و هر دو صفت را به‌طور هم‌زمان بهبود بخشد (افزایش تعداد دانه بدون کاهش شدید وزن آن‌ها)، اما در غلظت‌های بالاتر (۲ میلی‌مولار)، افزایش تعداد دانه با کاهش وزن هزار دانه همراه شده است (مانند تیمار ۰/۵ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار با ۱۰۲۹ دانه و وزن ۴۷ گرم). این مشاهدات نشان می‌دهد که تعادل بین تعداد و وزن دانه، یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت تغذیه گیاه است و اسید سالیسیلیک در غلظت بهینه (۰/۵ میلی‌مولار) می‌تواند این تعادل را به نفع عملکرد نهایی بهبود بخشد (Sedghi *et al.*, 2013). در شرایط مطلوب ممکن است هر دو صفت تعداد دانه و وزن هزاردانه با یکدیگر همبستگی مثبت نشان دهند، اما در شرایطی که منابع محدود هستند یا رقابت یا تنش‌های محیطی اعمال می‌شود، رابطه معکوس میان تعداد و وزن دانه به عنوان یک پاسخ جبرانی در گیاه ظاهر می‌شود (Steer & Hocking, 1987; Hocking & Pinkerton, 1987). در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که تعداد دانه در طبق آفتابگردان، صفتی بسیار حساس به برهم‌کنش لینورون و اسید سالیسیلیک است. کنترل مؤثر علف‌های هرز توسط لینورون، بستر مناسبی برای افزایش تعداد دانه فراهم می‌کند و اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، از طریق کاهش تنش اکسیداتیو، بهبود گرده‌افشانی و لقاح، و افزایش انتقال مجدد مواد به مخزن، می‌تواند این افزایش را تشدید نماید. با این حال، غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی‌مولار)، به‌ویژه در حضور علف‌کش، ممکن است با القای تنش هورمونی، اثر معکوس داشته باشند. همچنین، در غیاب علف‌کش، اسید سالیسیلیک با غلظت ۲ میلی‌مولار توانسته است با بهبود شاخص برداشت، تعداد دانه را به حداکثر برساند، اما این افزایش در تعداد، با کاهش نسبی وزن هر دانه همراه شده است که نشان‌دهنده وجود رابطه جبرانی منفی میان این دو صفت است. بنابراین، برای دستیابی به تعادل مطلوب بین تعداد و وزن دانه و در نتیجه، بیشینه عملکرد، ترکیب لینورون در محدوده ۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار با اسید سالیسیلیک ۰/۵ میلی‌مولار، به‌عنوان بهترین راهکار مدیریتی قابل توصیه است. پژوهش‌های آتی با اندازه‌گیری دقیق‌تر میزان ریزش دانه، درصد باروری گل‌ها، و فعالیت آنزیم‌های مؤثر بر تقسیم سلولی در مریستم‌های گل‌آذین، می‌تواند به روشن‌تر شدن مکانیسم‌های دخیل در این فرایند کمک کند.

آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده علف‌کش لینورون و اسید سالیسیلیک و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر فعالیت آنزیم کاتالاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). این معنی‌داری اثر متقابل، حاکی از آن است که

فعالیت کاتالاز تحت تأثیر ترکیب این دو تیمار قرار گرفته و پاسخ گیاه به کاربرد اسید سالیسیلیک، به شدت به سطح تنش ناشی از علف کش وابسته است. کاتالاز یکی از آنزیم های کلیدی سیستم دفاع آنتی اکسیدانی است که نقش اصلی آن، سم زدایی پراکسید هیدروژن و تبدیل آن به آب و اکسیژن می باشد. افزایش فعالیت این آنزیم، معمولاً پاسخی به افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن در شرایط تنش اکسیداتیو است. مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که بالاترین و پایین ترین فعالیت آنزیم کاتالاز به ترتیب در تیمار ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک (۱۰۲/۱ میکرومول در دقیقه) و تیمار شاهد (۱۱/۱۴ میکرومول در دقیقه) با اختلافی معادل ۸۱۶ درصد مشاهده گردید (جدول ۵). این افزایش چشمگیر نشان دهنده فعال سازی شدید سیستم دفاعی در پاسخ به تنش ترکیبی علف کش و اسید سالیسیلیک است. روند کلی تغییرات نشان می دهد که در سطوح پایین و متوسط علف کش (۰/۲۵ تا ۰/۷۵ لیتر در هکتار)، افزایش غلظت لینورون همراه با اسید سالیسیلیک (به ویژه ۰/۵ میلی مولار) موجب افزایش معنی دار فعالیت کاتالاز شده است. با این حال، در بالاترین سطح علف کش (۱ لیتر در هکتار)، این روند افزایشی متوقف شده و در برخی موارد کاهش یافته است (مانند تیمار ۱ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک با فعالیت ۹۵/۴۵ در مقایسه با ۱۰۲/۱ در تیمار ۰/۷۵ لیتر). همچنین در تیمار ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی مولار اسید سالیسیلیک، فعالیت آنزیم به طور غیرمنتظره ای کاهش یافت (۲۷/۸۴ میکرومول در دقیقه) که نشان دهنده اثرات بازدارنده غلظت های بالاتر اسید سالیسیلیک در سطوح پایین علف کش است. برای تبیین دقیق تر این الگوی پیچیده، چند مکانیسم فیزیولوژیک و بیوشیمیایی قابل طرح است: اول آن که یکی از نکات قابل توجه، احتمال پاسخ دوگانه آنزیم کاتالاز به تنش اکسیداتیو است. کاتالاز به عنوان یک آنزیم دفاعی، در پاسخ به افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن ناشی از تنش های محیطی (از جمله علف کش ها) معمولاً افزایش فعالیت نشان می دهد. لینورون با مهار فتوسیستم II، تولید گونه های فعال اکسیژن را در کلروپلاست افزایش می دهد و سلول را با تنش اکسیداتیو مواجه می سازد. در این شرایط، افزایش فعالیت کاتالاز به عنوان یک پاسخ تطابقی برای سم زدایی H_2O_2 عمل می کند. این یافته با پژوهش های پیشین همخوانی دارد که نشان داده اند علف کش ها می توانند فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی را در گیاهان غیرهدف افزایش دهند. با این حال، در غلظت های بسیار بالای علف کش (مانند ۱ لیتر در هکتار لینورون)، شدت تنش ممکن است از آستانه تحمل گیاه فراتر رفته و سیستم آنتی اکسیدانی دچار اختلال شود؛ به گونه ای که دیگر توانایی افزایش فعالیت کاتالاز را نداشته باشد. این پدیده در پژوهش Kaya و Yigit (۲۰۱۴) بر روی آفتابگردان تحت تیمار علف کش فلوروکلریدون نیز مشاهده شد، جایی که فعالیت کاتالاز در گیاهان تیمار شده با علف کش نسبت به شاهد کاهش یافت. به عبارت دیگر، افزایش غلظت علف کش تا یک آستانه مشخص، فعالیت کاتالاز را تحریک می کند، اما فراتر از آن، سمیت علف کش ممکن است به ساختار آنزیم یا مسیرهای بیوسنتزی آن آسیب برساند. مورد دوم نقش

تعدیل کننده اسید سالیسیلیک (وابسته به غلظت و سطح تنش) است. اسید سالیسیلیک به عنوان یک سیگنال دهنده تنش، می تواند با فعال سازی سیستم دفاع آنتی اکسیدانی، تحمل گیاه را افزایش دهد. پژوهش Sedghi و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر روی آفتابگردان، فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را افزایش می دهد. همچنین، مطالعه ای بر روی کاهش اثرات تنش خشکی در آفتابگردان گزارش کرد که کاربرد اسید سالیسیلیک، فعالیت کاتالاز را تا ۴۰ درصد افزایش داده است. با این حال، نتایج پژوهش حاضر نشان می دهد که این اثر تحریکی، شدیداً وابسته به غلظت اسید سالیسیلیک و سطح تنش زمینه ای (غلظت علف کش) است. غلظت ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک، در تمام سطوح علف کش (به جز ۱ لیتر) باعث افزایش فعالیت کاتالاز گردید و بهترین پاسخ را در سطح ۰/۷۵ لیتر لینورون ایجاد کرد. اما غلظت های بالاتر (۱ و ۲ میلی مولار) در برخی سطوح علف کش، نه تنها افزایش بیشتری به همراه نداشتند، بلکه در مواردی (مانند ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی مولار و ۰/۵ لیتر لینورون + ۱ میلی مولار) باعث کاهش معنی دار فعالیت کاتالاز شدند. این رفتار را می توان با اثر هورمیزس (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) توجیه کرد. در غلظت های پایین (۰/۵ میلی مولار)، اسید سالیسیلیک به عنوان یک محرک ملایم عمل کرده و با القای مسیرهای سیگنالینگ دفاعی، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی را افزایش می دهد. اما در غلظت های بالاتر (۱ و ۲ میلی مولار)، ممکن است خود به عنوان یک عامل تنش زای اکسیداتیو عمل کرده، با افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن یا ایجاد اختلال در تعادل هورمونی گیاه، از فعالیت کاتالاز بکاهد (Ramu et al., 2016; Mehak et al., 2021). پژوهش Kaya و Yigit (۲۰۱۴) نیز نشان داد که تیمار اسید سالیسیلیک، فعالیت کاتالاز را در هر دو گروه شاهد و تیمار شده با علف کش در مقایسه با گیاهان بدون اسید سالیسیلیک، کاهش داده است که مؤید اثرات دوگانه و وابسته به شرایط این ترکیب است. سوم آن که، یکی از یافته های قابل توجه پژوهش حاضر، افزایش چشمگیر فعالیت کاتالاز در تیمارهای ترکیبی ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک (۱۰۲ میکرومول در دقیقه) و ۱ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک (۹۵/۴۵ میکرومول در دقیقه) است. این افزایش، فراتر از جمع اثرات ساده هر یک از تیمارهاست و نشان دهنده یک اثر هم افزایی (سینرژیک) میان علف کش و اسید سالیسیلیک در فعال سازی سیستم آنتی اکسیدانی است. به نظر می رسد لینورون با ایجاد تنش اکسیداتیو، بستر مناسبی برای پاسخ دفاعی فراهم می کند و اسید سالیسیلیک با غلظت بهینه، این پاسخ را تشدید می نماید. با این حال، در بالاترین سطح علف کش (۱ لیتر در هکتار)، شدت تنش به حدی است که حتی اسید سالیسیلیک نیز نمی تواند به طور کامل از کاهش فعالیت کاتالاز جلوگیری کند. این یافته با پژوهش Noreen و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی دارد که نشان دادند برای افزایش توانایی گیاهان در تحمل تنش اکسیداتیو، لازم است ظرفیت حذف گونه های فعال اکسیژن در آن ها افزایش یابد و اسید سالیسیلیک می تواند با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، این

ظرفیت را ارتقا دهد. مورد چهارم مقایسه روند تغییرات فعالیت کاتالاز با میزان مالون دی آلدئید به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، یک رابطه معکوس آشکار را نشان می دهد. در تیمارهایی که فعالیت کاتالاز به حداکثر رسیده است (مانند ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک با فعالیت ۱۰۲ میکرومول در دقیقه)، میزان مالون دی آلدئید به کمترین مقدار (۸/۲۷ میکرومول در گرم) کاهش یافته است (جدول ۵). در مقابل، در تیمار شاهد با کمترین فعالیت کاتالاز (۱۱/۱۴ میکرومول در دقیقه)، میزان مالون دی آلدئید به بالاترین مقدار (۲۷/۷۷ میکرومول در گرم) رسیده است. این رابطه معکوس، گویای نقش کلیدی کاتالاز در کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و حفاظت از یکپارچگی غشای سلولی است. به عبارت دیگر، افزایش فعالیت کاتالاز با سم زدایی مؤثر H_2O_2 ، از تولید رادیکال های هیدروکسیل (که عامل اصلی پراکسیداسیون لیپیدها هستند) جلوگیری کرده و در نتیجه، مالون دی آلدئید کاهش می یابد. پژوهش های پیشین نیز این رابطه را تأیید کرده اند. به عنوان نمونه، Kaya و Yigit (۲۰۱۴) نشان دادند که اگرچه علفکش فلوروکلریدون باعث کاهش فعالیت کاتالاز و افزایش مالون دی آلدئید در آفتابگردان شد، اما پیش تیمار با اسید سالیسیلیک، از افزایش مالون دی آلدئید جلوگیری کرد. همچنین، Ananieva و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که کاربرد اسید سالیسیلیک قبل از تیمار علفکش پاراکوات در جو، باعث کاهش تولید H_2O_2 و مالون دی آلدئید گردید. مورد پنجم، بررسی دقیق تر داده ها نشان می دهد که پاسخ کاتالاز به اسید سالیسیلیک، در سطوح مختلف علفکش الگوی متفاوتی دارد. در سطوح پایین علفکش (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، تنش اکسیداتیو ایجاد شده به نسبت ملایم است و اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی مولار می تواند به خوبی فعالیت کاتالاز را افزایش دهد. اما در این سطوح، غلظت های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی مولار) اثر معکوس داشته و فعالیت کاتالاز را کاهش می دهند (به ویژه در تیمار ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی مولار با فعالیت ۲۷/۸۴). این موضوع نشان می دهد که در شرایط تنش ملایم، گیاه به تحریک دفاعی بیش از حد نیاز ندارد و غلظت های بالای اسید سالیسیلیک ممکن است با ایجاد تنش هورمونی اضافی، سیستم دفاعی را مختل کنند. در مقابل، در سطح ۰/۷۵ لیتر لینورون که تنش اکسیداتیو شدیدتر است، غلظت ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک بهترین پاسخ را ایجاد کرده و حتی غلظت ۲ میلی مولار نیز تا حدودی توانسته است فعالیت کاتالاز را نسبت به شاهد افزایش دهد (۶۵ میکرومول در دقیقه). اما در بالاترین سطح علفکش (۱ لیتر در هکتار)، شدت تنش به حدی است که هیچ یک از غلظت های اسید سالیسیلیک نمی تواند فعالیت کاتالاز را به سطح تیمار ۰/۷۵ لیتر برساند. این الگوی وابسته به شدت تنش، نشان دهنده وجود آستانه ای از تحمل است که فراتر از آن، سیستم آنتی اکسیدانی توانایی پاسخ دهی مؤثر را از دست می دهد. در مجموع، نتایج این بخش نشان می دهد که فعالیت آنزیم کاتالاز در آفتابگردان، پاسخی حساس و پیچیده به برهم کنش لینورون و اسید سالیسیلیک دارد. افزایش فعالیت کاتالاز در تیمارهای ترکیبی (به ویژه ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵

میلی مولار اسید سالیسیلیک) بیانگر فعال سازی موفق سیستم دفاع آنتی اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو است که با کاهش مالون دی آلدئید و بهبود عملکرد روغن همراه بوده است. با این حال، این پاسخ وابسته به غلظت است و غلظت های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی مولار) در سطوح پایین علف کش و غلظت های بسیار بالای علف کش (۱ لیتر در هکتار) می توانند اثر معکوس داشته باشند. بنابراین، مدیریت دقیق غلظت های علف کش و اسید سالیسیلیک برای دستیابی به پاسخ مطلوب فیزیولوژیک ضروری است. پژوهش های آتی با اندازه گیری هم زمان فعالیت سایر آنزیم های آنتی اکسیدانی (مانند سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز)، میزان پراکسید هیدروژن و بیان ژن های مرتبط با کاتالاز، می تواند به روشن تر شدن مکانیسم های مولکولی این برهم کنش کمک کند. همچنین، با توجه به اثرات دوگانه اسید سالیسیلیک، بررسی دامنه غلظت های بین ۰/۵ تا ۱ میلی مولار با فواصل دقیق تر (مثلاً ۰/۲۵ میلی مولار) برای تعیین غلظت بهینه در سطوح مختلف تنش، برای پژوهش های آینده پیشنهاد می شود.

مالون دی آلدئید

مالون دی آلدئید یکی از مهم ترین محصولات نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی است که به عنوان یک شاخص معتبر و رایج برای سنجش شدت تنش اکسیداتیو در گیاهان شناخته می شود. پراکسیداسیون لیپیدها، زنجیره ای از واکنش های شیمیایی است که در اثر حمله گونه های فعال اکسیژن به اسیدهای چرب غیراشباع موجود در غشاهای سلولی (به ویژه غشای کلروپلاست، میتوکندری و شبکه آندوپلاسمی) رخ می دهد و منجر به کاهش سیالیت غشاء، افزایش نفوذپذیری، اختلال در عملکرد کانال های یونی و در نهایت، از کار افتادن اندامک های سلولی می شود. بنابراین، افزایش سطح مالون دی آلدئید نشان دهنده آسیب اکسیداتیو گسترده به ساختار سلول است و کاهش آن، بیانگر کارایی سیستم دفاع آنتی اکسیدانی در خنثی سازی گونه های فعال اکسیژن می باشد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل علف کش لینورون و اسید سالیسیلیک بر میزان مالون دی آلدئید در گیاه آفتابگردان در سطح یک درصد معنی دار است (جدول ۳). این معنی داری قوی، حاکی از آن است که تأثیر اسید سالیسیلیک بر کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، شدیداً به سطح تنش ناشی از علف کش وابسته است و این دو عامل به گونه ای برهم کنش دارند که پاسخ نهایی، فراتر از اثرات جمع ساده آن هاست. مقایسه میانگین اثرات متقابل الگوی روشنی را نشان می دهد: بالاترین میزان مالون دی آلدئید (۲۷/۷۷ میکرومول در گرم) در تیمار شاهد (عدم کاربرد لینورون و اسید سالیسیلیک) ثبت شد که بیانگر پراکسیداسیون شدید لیپیدها در شرایط عاری از هرگونه مدیریت تنش است (جدول ۵). این افزایش را می توان به حضور علف های هرز و تنش های زمینه ای (مانند نوسانات دما و رطوبت) نسبت داد که خود باعث تولید گونه های فعال اکسیژن و تخریب غشا می شوند. در مقابل،

کمترین میزان مالون دی آلدئید ($8/27$ میکرومول در گرم) در تیمار $0/75$ لیتر لینورون + $0/5$ میلی مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که نسبت به شاهد کاهشی حدود 235 درصد را نشان می دهد. این کاهش چشمگیر، نشان دهنده نقش حفاظتی فوق العاده اسید سالیسیلیک در مهار پراکسیداسیون لیپیدها، به ویژه در سطوح مؤثر علف کش است. برای شرح عمیق تر این الگوی پاسخ، چند مکانیسم فیزیولوژیک و بیوشیمیایی قابل طرح است: اول آن که، یکی از نکات قابل توجه رابطه معکوس و همبسته مالون دی آلدئید با فعالیت آنزیم کاتالاز است. مقایسه همزمان داده های جدول ۵، یک رابطه معکوس قوی را میان میزان مالون دی آلدئید و فعالیت آنزیم کاتالاز آشکار می سازد. در تیمارهایی که فعالیت کاتالاز به حداکثر رسیده است (مانند $0/75$ لیتر لینورون + $0/5$ میلی مولار اسید سالیسیلیک با فعالیت 102 میکرومول در دقیقه)، میزان مالون دی آلدئید به کمترین مقدار کاهش یافته است. در مقابل، در تیمار شاهد که کاتالاز در پایین ترین سطح فعالیت ($11/14$ میکرومول در دقیقه) قرار دارد، مالون دی آلدئید بالاترین مقدار را نشان می دهد. این همبستگی معکوس، گویای نقش کلیدی کاتالاز در سم زدایی H_2O_2 و جلوگیری از تولید رادیکال های هیدروکسیل (OH) از طریق واکنش فنتون است. H_2O_2 به تنهایی یک گونه فعال اکسیژن به نسبت پایدار است، اما در حضور یون های آهن یا مس، به رادیکال هیدروکسیل تبدیل می شود که بسیار واکنش پذیر است و عامل اصلی شروع زنجیره پراکسیداسیون لیپیدها محسوب می شود. بنابراین، افزایش فعالیت کاتالاز با حذف به موقع H_2O_2 ، از تولید رادیکال های هیدروکسیل جلوگیری کرده و در نتیجه، پراکسیداسیون لیپیدها و تجمع مالون دی آلدئید کاهش می یابد. این یافته با پژوهش های Ananieva و همکاران (2002) و Radwan و Soltan (2012) همخوانی کامل دارد که نشان دادند کاربرد اسید سالیسیلیک با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، از افزایش مالون دی آلدئید در مواجهه با علف کش ها جلوگیری می کند. در مورد دوم، همان گونه که در سایر صفات (کاتالاز و عملکرد روغن) نیز مشاهده شد، اثر اسید سالیسیلیک بر کاهش مالون دی آلدئید وابسته به غلظت است. غلظت $0/5$ میلی مولار در تمام سطوح علف کش (به ویژه $0/75$ و 1 لیتر در هکتار) باعث کاهش معنی دار مالون دی آلدئید گردید. با این حال، در برخی تیمارها مانند $0/25$ لیتر لینورون + 1 میلی مولار اسید سالیسیلیک، افزایش غیرمنتظره مالون دی آلدئید ($23/09$ میکرومول در گرم) نسبت به تیمارهای مشابه با غلظت $0/5$ میلی مولار ($15/15$ میکرومول در گرم) مشاهده شد. همچنین در سطح $0/5$ لیتر لینورون، کاربرد 1 میلی مولار اسید سالیسیلیک با مالون دی آلدئید برابر $14/92$ میکرومول در گرم، در حالی که غلظت $0/5$ میلی مولار در همین سطح علف کش، مالون دی آلدئید را به $18/2$ میکرومول در گرم کاهش داده بود (که خود یک ناهنجاری آماری جزئی محسوب می شود، اما روند کلی نشان دهنده افزایش مالون دی آلدئید در غلظت های بالای اسید سالیسیلیک است). این الگوی دوگانه را می توان به اثر هورمیزس (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) نسبت داد. در غلظت های پایین ($0/5$ میلی مولار)، اسید سالیسیلیک با

فعال سازی سیستم آنتی اکسیدانی، از پراکسیداسیون لیپیدها جلوگیری می کند. اما در غلظت های بالاتر (۱ و ۲ میلی مولار)، ممکن است خود به عنوان یک ترکیب پرواکسیدان عمل کرده، یا با مهار موقت برخی آنزیم های آنتی اکسیدانی (مانند کاتالاز یا آسکوربات پراکسیداز)، زمینه را برای افزایش گونه های فعال اکسیژن و در نتیجه، افزایش مالون دی آلدئید فراهم آورد. همچنین، غلظت های بالای اسید سالیسیلیک می تواند با القای تنش هورمونی و افزایش سنتز اتیلن، فرایند پیری را تسریع کرده و تخریب غشاها را تشدید نمایند (Ramu *et al.*, 2016; Mehak *et al.*, 2021). پژوهش Kaya و Yigit (۲۰۱۴) نیز نشان داد که اگرچه اسید سالیسیلیک به طور کلی مالون دی آلدئید را کاهش می دهد، اما در غلظت های بسیار بالا یا در ترکیب با برخی علف کش ها، اثرات متناقضی می تواند داشته باشد. مورد سوم، وابستگی پاسخ مالون دی آلدئید به شدت تنش علف کش است. بررسی دقیق تر داده ها نشان می دهد که در سطوح پایین علف کش (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، میزان مالون دی آلدئید در تیمارهای فاقد اسید سالیسیلیک به نسبت بالا است (به ترتیب ۱۷/۰۸ و ۱۳/۵۶ میکرومول در گرم). این افزایش، بیشتر ناشی از رقابت علف های هرز و تنش های ثانویه ناشی از آن است، نه خود علف کش. در این سطوح، کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی مولار تا حدودی مالون دی آلدئید را کاهش می دهد، اما به دلیل شدت پایین تنش، اثر محافظتی چندان برجسته نیست. در مقابل، در سطح ۰/۷۵ لیتر لینورون که تنش اکسیداتیو ناشی از علف کش به اندازه کافی برای فعال سازی سیستم دفاعی شدید است، غلظت ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک بهترین اثر کاهشی را بر مالون دی آلدئید نشان می دهد. به نظر می رسد در این سطح، یک هم افزایی (سینرژیک) میان تنش ناشی از علف کش (که به عنوان محرک اولیه، تولید گونه های فعال اکسیژن را افزایش می دهد) و اسید سالیسیلیک (که به عنوان تقویت کننده سیستم آنتی اکسیدانی عمل می کند) وجود دارد. اما در بالاترین سطح علف کش (۱ لیتر در هکتار)، شدت تولید گونه های فعال اکسیژن به حدی است که حتی غلظت بهینه اسید سالیسیلیک (۰/۵ میلی مولار) نیز نمی تواند به طور کامل از افزایش مالون دی آلدئید جلوگیری کند. به عنوان نمونه، در تیمار ۱ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی مولار، مالون دی آلدئید برابر ۹/۰۸ میکرومول در گرم است که از تیمار ۰/۷۵ لیتر + ۰/۵ میلی مولار (۸/۲۷) بیشتر است. این موضوع نشان دهنده وجود آستانه تحملی برای سیستم آنتی اکسیدانی است که فراتر از آن، حتی اسید سالیسیلیک نیز نمی تواند از تخریب غشاها جلوگیری کند (Noreen *et al.*, 2009; Essa *et al.*, 2023). در مورد چهارم، کاهش معنی دار مالون دی آلدئید در تیمارهای ترکیبی (به ویژه ۰/۷۵ و ۱ لیتر لینورون همراه با ۰/۵ میلی مولار اسید سالیسیلیک) با افزایش معنی دار عملکرد روغن در همین تیمارها همراه بود. این هم بستگی مثبت، نشان دهنده اهمیت حفاظت از غشاها در فرایند بیوسنتز روغن است. آنزیم های کلیدی مسیر سنتز اسیدهای چرب (مانند استیل کوآ کربوکسیلاز و سنتاز اسید چرب) در غشای کلروپلاست و شبکه آندوپلاسمی مستقر هستند و هرگونه آسیب اکسیداتیو به این ساختارها، کارایی آنزیم ها را کاهش داده

و سنتز روغن را مختل می کند. بنابراین، کاهش مالون دی آلدئید توسط اسید سالیسیلیک، با حفظ یکپارچگی غشاها، زمینه را برای افزایش درصد روغن و در نتیجه، افزایش عملکرد روغن فراهم می سازد. همچنین، کاهش مالون دی آلدئید در مرحله پر شدن دانه، از ریزش دانه های جوان جلوگیری کرده و تعداد دانه در طبق را افزایش می دهد. این تفسیر با یافته های Krantev و همکاران (۲۰۰۸) و Shopova و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد که نشان دادند اسید سالیسیلیک با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، عملکرد فتوسنتزی و تولید دانه را در شرایط تنش بهبود می بخشد. پنجم آن که، در تیمار عدم کاربرد لینورون + ۲ میلی مولار اسید سالیسیلیک، با وجود بالاترین تعداد دانه در طبق (۱۱۲۰ عدد)، میزان مالون دی آلدئید برابر ۱۶/۲۲ میکرومول در گرم بود که نسبت به تیمار ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۲ میلی مولار (۱۱/۱۲) و ۰/۵ لیتر لینورون + ۲ میلی مولار (۱۲/۷۲) بیشتر است. این افزایش نسبی مالون دی آلدئید در غلظت بالای اسید سالیسیلیک در غیاب علف کش، نشان دهنده اثر پرواکسیدانی احتمالی اسید سالیسیلیک در غلظت های بالا است. به عبارت دیگر، وقتی تنش زمینه ای (علف کش) وجود ندارد و گیاه در شرایط نسبتاً عادی قرار دارد، اسید سالیسیلیک با غلظت ۲ میلی مولار ممکن است با ایجاد اختلال در تعادل ردوکس سلول، به عنوان یک عامل تنش زای خفیف عمل کرده و باعث افزایش جزیی مالون دی آلدئید شود. با این حال، همین افزایش ملایم مالون دی آلدئید، به عنوان یک سیگنال تنش، می تواند مسیرهای دفاعی را فعال کرده و در نهایت به افزایش تعداد دانه منجر شود. این یافته نشان می دهد که اثر اسید سالیسیلیک بر مالون دی آلدئید، نه تنها به غلظت، بلکه به سطح تنش زمینه ای نیز بستگی دارد و در غیاب تنش، غلظت های بالای آن ممکن است اثرات متفاوتی داشته باشند. در مجموع، نتایج این بخش به وضوح نشان می دهد که اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی مولار، با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و کاهش معنی دار مالون دی آلدئید، نقش مؤثری در حفاظت از غشاهای سلولی در برابر پراکسیداسیون لیپیدهای ناشی از علف کش لینورون ایفا می کند. این کاهش مالون دی آلدئید، پیامدهای مثبتی بر عملکرد دانه، درصد روغن و در نهایت، عملکرد اقتصادی آفتابگردان دارد. با این حال، اثر محافظتی اسید سالیسیلیک وابسته به غلظت و شدت تنش است و غلظت های بالاتر (۱ و ۲ میلی مولار) در برخی شرایط، نه تنها سودمند نیستند، بلکه ممکن است خود باعث افزایش استرس اکسیداتیو و پراکسیداسیون لیپیدها شوند. بنابراین، مدیریت دقیق غلظت اسید سالیسیلیک (بهینه ۰/۵ میلی مولار) در برنامه های زراعی که با کاربرد علف کش لینورون همراه است، برای دستیابی به حداکثر حفاظت از غشاها و بهبود عملکرد، ضروری به نظر می رسد. پژوهش های آتی با اندازه گیری هم زمان میزان H_2O_2 ، پراکسیداسیون لیپیدهای خاص (مانند کلروپلاستی) و بیان ژن های مرتبط با سنتز آنزیم های آنتی اکسیدانی، می تواند به روشن تر شدن مکانیسم های مولکولی این برهم کنش کمک کند.

جدول ۳: تجزیه واریانس وزن خشک، عملکرد دانه، عملکرد روغن، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، کاتالاز و مالون دی آلدئید در آفتابگردان و وزن خشک علف هرز

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن خشک آفتابگردان	وزن خشک علف هرز	عملکرد دانه	عملکرد روغن	وزن هزار دانه	میانگین مربعات		مالون دی آلدئید
							تعداد دانه در طبق	کاتالاز	
بلوک	۲	۶۳۰۸۷۵ ^{ns}	۲۰۲۰۷ ^{ns}	۸۶۶۰۱ ^{ns}	۴۹۰۲ ^{ns}	۱/۰۷ ^{ns}	۱۳۸۴ ^{ns}	۲۴/۴ ^{ns}	۴/۲ ^{ns}
علف کش لینورون	۴	۷۰۴۵۷۷۵۰ ^{**}	۴۸۶۷۷۷ ^{**}	۷۹۰۱۲۰۵ ^{**}	۱۳۸۲۲۰۰ ^{**}	۱۶۵/۹ ^{**}	۸۷۷۱۹ ^{**}	۶۰۶۸ ^{**}	۲۵۲ ^{**}
اسید سالیسیلیک	۳	۲۴۶۹۱۵۲ ^{ns}	۲۴۷۸ ^{ns}	۹۷۹۳۷۱ ^{ns}	۱۹۸۱۷۹ [*]	۵۲/۸ ^{ns}	۹۶۲۱۱ ^{**}	۲۱۲/۵ ^{**}	۲۲/۵ ^{**}
علف کش لینورون × اسید سالیسیلیک	۱۲	۱۱۳۹۸۸۰۵ ^{ns}	۶۱۹۴ ^{ns}	۸۰۴۱۵۵ ^{ns}	۱۵۱۹۵۸ ^{**}	۳۱/۱ ^{ns}	۴۰۴۲۴ [*]	۹۸۲/۶ ^{**}	۵۳/۱ ^{**}
خطا	۳۸	۸۸۰۱۷۹۶	۱۰۹۹۹	۴۴۴۲۵۹	۵۴۲۹۲	۲۳/۳	۱۷۱۷۰	۴۳/۶	۱/۹۳
ضریب تغییرات (%)		۱۸/۳	۱۰/۸	۱۳	۱۲	۹/۶	۱۴/۱	۱۰/۵	۹/۲

ns و ** به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی داری می باشد.

جدول ۴: مقایسه میانگین عملکرد دانه، وزن خشک و وزن هزار دانه آفتابگردان و وزن خشک علف هرز تحت تاثیر علف کش لینورون

سطوح علف کش لینورون (لیتر در هکتار)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک آفتابگردان (کیلوگرم در هکتار)	وزن خشک علف هرز (کیلوگرم در هکتار)	وزن هزار دانه (گرم)
عدم کاربرد	۲۶۲۴/۴ ^c	۸۶۷۱ ^c	۱۲۱۷ ^c	۴۶/۶ ^c
۰/۲۵	۳۰۶۵/۸ ^b	۱۰۴۹۷ ^b	۱۰۹۵ ^d	۴۸/۴ ^{bc}
۰/۵	۳۲۵۵/۴ ^b	۱۰۸۲۹ ^b	۹۶۸ ^c	۴۷/۹ ^c
۰/۷۵	۳۷۴۲/۴ ^a	۱۲۷۴۹ ^a	۸۲۸ ^b	۵۲/۳ ^{ab}
۱	۳۹۳۷/۹ ^a	۱۲۶۶۷ ^a	۷۱۳ ^a	۵۵/۷ ^a

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون با استفاده از نمون دانکن تفاوت معنی داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

جدول ۵: مقایسه میانگین صفات مختلف عملکرد آفتابگردان تحت تاثیر برهمکنش سطوح مختلف علف کش لینورون و اسید سالیسیلیک

مالون دی آلدئید (میکرومول در گرم)	آنزیم کاتالاز (میکرومول در دقیقه)	تعداد دانه در طبق	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	تیمارهای آزمایش	
					اسید سالیسیلیک (میلی مولار)	علف کش لینورون (لیتر در هکتار)
۲۷/۷۷ ^a	۱۱/۱۴ ^a	۵۵۳ ^f	۷۲۱/۴ ^j	۱۹۹۲/۹ ⁱ	عدم کاربرد	عدم کاربرد
۲۷/۱۹ ^a	۱۲/۶۸ ^a	۸۳۶ ^{de}	۸۳۲/۴ ^{jz}	۲۴۴۷/۹ ^{hi}	۰/۵	
۱۶/۹۵ ^{cd}	۴۶/۱۱ ^j	۶۹۵ ^{ef}	۸۶۲/۴ ^{hij}	۲۵۰۲/۵ ^{ghi}	۱	
۱۶/۲۲ ^{cde}	۵۲/۱۳ ^{hij}	۱۱۲۰/۷ ^a	۱۲۹۶/۸ ^{abcd}	۳۵۵۲/۹ ^{a-e}	۲	
۱۷/۰۸ ^{cd}	۵۶/۹۵ ^{ghi}	۸۳۴ ^{de}	۹۲۳/۷ ^{ghij}	۳۷۷۲/۹ ^{fgh}	عدم کاربرد	۰/۲۵
۱۵/۱۵ ^{def}	۵۴/۹ ^{ghi}	۸۳۷ ^{de}	۹۸۹/۷ ^{fghi}	۲۹۹۰ ^{e-h}	۰/۵	
۲۳/۰۹ ^b	۲۷/۸۴ ^k	۹۸۸/۷ ^{abcd}	۱۱۳۰ ^{cdefg}	۳۲۰۶/۴ ^{c-g}	۱	
۱۱/۱۲ ^{kl}	۷۹/۲ ^{cde}	۹۰۳ ^{bcde}	۱۰۹۴/۶ ^{cdefg}	۳۲۹۲/۹ ^{b-f}	۲	
۱۳/۵۶ ^{fghi}	۶۳/۷۴ ^{fg}	۹۳۳/۷ ^{abcd}	۱۰۲۰ ^{efghi}	۳۲۵۰ ^{c-f}	عدم کاربرد	۰/۵
۱۸/۲ ^c	۴۳/۹۲ ^j	۱۰۳۰/۳ ^{abcd}	۱۲۵۴/۹ ^{abcd}	۳۳۱۵ ^{b-f}	۰/۵	
۱۴/۹۲ ^{defg}	۵۸/۸ ^{gh}	۸۲۹/۷ ^{de}	۱۰۷۴/۵ ^{defgh}	۳۰۶۵/۴ ^{d-h}	۱	
۱۲/۷۲ ^{ghij}	۷۰/۰۸ ^{ef}	۱۰۲۹/۷ ^{abcd}	۱۱۵۸/۱ ^{bcdef}	۳۳۹۰/۴ ^{b-f}	۲	
۱۰/۲۹ ^{klm}	۸۵/۵۵ ^{bcd}	۹۵۶/۷ ^{abcd}	۱۳۷۳/۲ ^{ab}	۳۸۵۴/۵ ^{abc}	عدم کاربرد	۰/۷۵
۸/۲۷ ^m	۱۰۲/۱ ^a	۱۰۷۶ ^{abc}	۱۴۵۰/۱ ^a	۳۹۸۶/۴ ^{ab}	۰/۵	
۱۰/۷۴ ^{jkl}	۸۵/۳۹ ^{bcd}	۹۶۶/۷ ^{abcd}	۱۲۴۲/۴ ^{abcde}	۳۵۵۲/۹ ^{a-e}	۱	
۱۴/۱۵ ^{efgh}	۶۵/۲۸ ^{fg}	۱۰۱۰/۳ ^{abcd}	۱۲۷۶/۳ ^{abcd}	۳۵۷۵ ^{a-e}	۲	
۱۱/۴۶ ^{ljk}	۷۶/۷ ^{de}	۱۰۱۳/۳ ^{abcd}	۱۴۴۷/۳ ^a	۳۹۹۷/۵ ^{ab}	عدم کاربرد	۱
۹/۰۸ ^{lm}	۹۵/۴۵ ^{ab}	۱۰۹۱/۷ ^{ab}	۱۴۵۹/۳ ^a	۴۱۷۰/۴ ^a	۰/۵	
۱۱/۷۶ ^{ijk}	۸۹/۷۲ ^{bc}	۸۶۱ ^{cde}	۱۳۱۸ ^{abc}	۳۷۲۶/۴ ^{a-d}	۱	
۱۲/۲۷ ^{hijk}	۷۲/۰۶ ^{ef}	۱۰۴۲ ^{abcd}	۱۴۳۳/۹ ^a	۳۸۵۶/۴ ^{abc}	۲	

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون با استفاده از آزمون دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که کاربرد علف کش لینورون (به‌ویژه در غلظت ۱ لیتر در هکتار) با کاهش معنی‌دار وزن خشک علف‌های هرز (از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) و کاهش رقابت بر سر منابع، عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ماده خشک آفتابگردان را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. با این حال، کاربرد اسید سالیسیلیک (به ویژه در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار) به عنوان یک عامل تعدیل‌کننده تنش اکسیداتیو، با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز (تا ۱۰۲ میکرومول در دقیقه) و کاهش شاخص پراکسیداسیون لیپیدی (مالون‌دی‌آلدئید تا ۸/۲۷ میکرومول در گرم)، توانست اثرات منفی احتمالی علف کش را کاهش داده و در تیمارهای ترکیبی، عملکرد دانه و روغن را به ترتیب به حداکثر ۴۱۷۰ و ۱۴۵۹ کیلوگرم در هکتار برساند که نسبت به شاهد افزایشی ۱۰۲ درصدی را نشان می‌دهد. اثر متقابل معنی‌دار لینورون و اسید سالیسیلیک بر صفات کلیدی مانند عملکرد روغن، تعداد دانه در طبق و شاخص‌های تنش اکسیداتیو، حاکی از یک اثر هم‌افزایی (سینرژیک) بین این دو ماده در غلظت‌های بهینه است. در مجموع، محلول پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵

میلی مولار سه روز قبل از کاربرد علف کش لینوران (در محدوده ۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار و در مرحله رشدی ۸-۱۰ برگی معادل (BBCH 14-18) به عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر، کم خطر و سازگار با محیط زیست برای افزایش عملکرد کمی و کیفی آفتابگردان از طریق فعال سازی سیستم آنتی اکسیدانی و تعدیل تنش اکسیداتیو ناشی از علف کش قابل توصیه است.

منابع

دولت آبادی، سعید، آرمین، محمد، و فیله کش، اسماعیل. (۱۳۹۲). تاثیر زمان های محلول پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان در شرایط تنش خشکی. پژوهش های به زراعی (تنش های محیطی در علوم گیاهی)، ۵(۲)، ۱۷۷-۱۸۸.

Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. Methods Enzymology, 105, 121-126. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3).

Ananieva, E. A., Alexieva, V. S. & Popova, L. P. 2002. Treatment with salicylic acid decreases the effects of paraquat on photosynthesis. Plant Physiology, 159, 685-6. Doi/10.1104/pp.109.139352.

Essa .A, Sayed .H, Fazal. J , Khan Muhammad Ali, Imtiaz Muhammad, Said Fazal, Ismail Muhammad, Khan Salman, Ali Hayssam M. , Hatamleh Ashraf Atef, Al-Dosary Munirah Abdullah, Mosa Walid F. A., Shah Farooq. 2023. Salicylic acid-mitigates abiotic stress tolerance via altering defense mechanisms in Brassica napus (L.). Frontiers in Plant Science. Volume 14. Doi/10.3389/fpls.2023.1187260.

Farooq, M., Basra, S. M. A., & Wahid, A. 2008. Improving the performance of transplanted rice by seed priming. Plant Growth Regulation, 55(2), 245-254. <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9155-x>

Gerami, M., Ghorbani, A. and Karimi, S. 2018. Role of salicylic acid pretreatment in alleviating cadmium -induced toxicity in Salvia officinalis L. Iranian Journal of Plant Biology 10 : 81 -95.

Gürbüz, R., Alptekin, H. 2024. Effect of Pre- and Post-Emergence Herbicides on Weed Control and Yield in Sunflower (Helianthus annuus L.). Turkish Journal of Agricultural Research, 11(2): 141-156. doi: 10.19159/tutad.1412074.

Hayat, Q., Hayat, S., Irfan, M., & Ahmad, A. 2010. Effect of exogenous salicylic acid under changing environment: A review. Environmental and Experimental Botany, 68(1), 14-25.

Heap, I. 2023. The international survey of herbicide resistant weeds. Weed Science Society of America.

Heath, R.L. and Packer, L. 1968. Photoperoxidation in Isolated Chloroplast, I. Kinetics and Stoichiometry of Fatty Acid Peroxidation. Achieves of Biochemistry and Biophysics, 125, 180-198.

Kaya, A. and Yigit, E. 2014. The physiological and biochemical effects of salicylic acid on sunflowers (Helianthus annuus) exposed to flurochloridone. Ecotoxicology and Environmental Safety. 106(3): 232-238. Doi/10.1016/j.ecoenv.2014.04.041

Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., and Khan, N. A. 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. Front Plant Science 6: 462.

Knezevic, S. Z., Datta, A., Scott, J., & Lin, H. 2020. Integrating herbicide and non chemical weed management options: A systems approach. Crop Protection, 136, 105242.

Koo, Y. M., Heo, A. Y. and Choi, H. W. 2020. Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. The Plant Pathology Journal 36: 1 -10. Doi/10.5423/PPJ.RW.12.2019.0295

- Krantev, A., Yordanova, R., Janda, T., Szalai, G., and Popova, L. 2008.** Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. *Plant Physiology*. 165(9): 920–931.
- Mehak, G., Akram, N. A., Ashraf, M., Kaushik, P., El-Sheikh, M. A., & Ahmad, P. (2021).** Methionine-induced regulation of growth, secondary metabolites and oxidative defense system in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants subjected to water deficit stress. *PLOS ONE*, 16(11), e0259585.
- Meier, U. (Ed.). 2018.** Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph (2nd ed.). Julius Kühn-Institut. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>
- Noreen, S. Ashraf, M. Hussain, M and Jamil, A. 2009.** Exogenous application of salicylic acid enhances antioxidative capacity in salt stressed sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *Pak. J. Bot.*, 41(1): 473-479.
- Radwan, D. E. M., and Soltan, D. M. 2012.** The negative effects of clethodim in photosynthesis and gas-exchange status of maize plants are ameliorated by salicylic acid pretreatment. *Photosynthetica*. 50(2): 171-179.
- Ramezani, M., Enayati, M., Ramezani, M. and Ghorbani, A. 2021.** A study of different strategical views into heavy metal (oid) removal in the environment. *Arabian Journal of Geosciences* 14: 2225.
- Ramu VS, Paramanantham A, Ramegowda V, Mohan-Raju B, Udayakumar M, Senthil-Kumar M .2016.** Transcriptome Analysis of Sunflower Genotypes with Contrasting Oxidative Stress Tolerance Reveals Individual- and Combined- Biotic and Abiotic Stress Tolerance Mechanisms. *PLoS ONE* 11(6): e0157522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157522>
- Sedghi, M. BASIRI, H, Kh. SHARIFI, R. S. 2013.** Effects of Salicylic Acid on the Antioxidant Enzymes Activity in Sunflower. *Annals of West University of Timișoara, ser. Biology*, 2013, vol XVI (2), pp.67-72.
- Shopova, E., Brankova, L., Katerova, Z., Dimitrova, L., Todorova, D., Sergiev, I., Talaat, N.B. 2021.** Salicylic acid pretreatment modulates wheat responses to glyphosate. *Crops*, 1(2), 88–96. DOI:10.3390/crops1020009
- Silverman, F. P., Petracek, P. D., Fledderman, C. M., Ju, Z., Heiman, D. F. and Warrio, P. 2005.** Salicylate activity. 1. Protection of plants from paraquat injury. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(25), 9764-8. <https://doi.org/10.1021/JF0513819>
- Strobel, N.E., and Kuc, A. 1995.** Chemical and biological inducers of systemic acquired resistance to pathogens protect cucumber and tobacco from damage caused by paraquat and cupric chloride. *Phytopathology*. 85:1306-1310
- Torun, H., Özkil, M., Eymirli, S., Üremiş, İ., Tursun, N., 2021.** The effect of hoeing time for weed management on yield and yield criteria of sunflowers (*Helianthus annuus* L.). *Plant Protection Bulletin*, 61(4): 46-56. DOI: 10.16955/bitkorb.908510
- Traxler C, Gaines TA, Küpper A, Luemmen P, Dayan FE. 2023.** The nexus between reactive oxygen species and the mechanism of action of herbicides. *J Biol Chem*. Nov;299(11):105267. doi: 10.1016/j.jbc.2023.105267.
- Yavas I., Unay A. 2016.** Effects of zinc and salicylic acid on wheate under drought stress. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 26(4): 2016, Page: 1012-1018
- Aires, E. S., Ferraz, A. K. L., Carvalho, B. L., Teixeira, F. P., Rodrigues, J. D. and Ono, E. O. 2022.** Foliar application of salicylic acid intensifies antioxidant system and photosynthetic efficiency in tomato plants. *Bragantia*, 81, e1522. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210320>
- Sharma, M., Gupta, S. K., Majumder, B., Maurya, V. K., Deeba, F., Alam, A., & Pandey, V. 2018.** Proteomics unravel the regulating role of salicylic acid in soybean under yield limiting drought stress. *Plant physiology and biochemistry: PPB*, 130, 529–541. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.001>
- Miura, K., & Tada, Y. 2014.** Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in plant science*, 5, 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00004>

Sadak, M. S., El-Lethy, S. R. and Dawood, M. G. 2013. Physiological role of benzoic acid and salicylic acid on growth, yield, some biochemical and antioxidant aspects of soybean plant. *World Journal of Agricultural Sciences*, 9(6): 435-442. [http://www.idosi.org/wjas/wjas9\(6\)14/4.pdf](http://www.idosi.org/wjas/wjas9(6)14/4.pdf)

Singh, M., Singh, G., Goyat, S., Gawdiya, S., Sheoran, S. and Sathyanarayana, E. 2026. Foliar application of salicylic acid enhances yield, oil quality and economic returns of *Linum usitatissimum* L. under different irrigation regimes. *Front. Agron.* 8:1804737. doi: 10.3389/fagro.2026.1804737

Bukhsh, M. A. A. H. A., Malik, A. U., Ishaque, M. and Sadiq, S. H. 2009. Performance of sunflower in response to exogenously applied salicylic acid under varying irrigation regimes. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 19(3), 130-134.

Soltani, N., Nurse, R. E., Shropshire, C. and Sikkema, P. H. 2011. Weed management in cranberry bean with linuron. *Canadian Journal of Plant Science*, 91(5):881-888. <https://doi.org/10.4141/CJPS2011-018>

Fuerst, E. P., & Norman, M. A. 1991. Interactions of Herbicides with Photosynthetic Electron Transport. *Weed Science*, 39(3), 458-464. doi:10.1017/S0043174500073227

Sibi, M., Mirzakhani, M., Gomarian, M. and Yaqobi, S. H. 2014. Effects of water stress and salicylic acid application on oil yield and some physiological characteristics of sunflower cultivars (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(1), 1-14. doi: 10.22059/ijfcs.2014.51031

Hossini, F., Rahnama Ghahfarokhi, A. and meskarbashee, M. 2026. Foliar Application of Cytokinin Hormone and Salicylic Acid on Morphological Traits, Yield Traits of Sunflower Drought Stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 36(1), 135-150. doi: 10.22034/saps.2024.61745.3224

Noreen, S., & Ashraf, M. 2010. Modulation of salt (NaCl)-induced effects on oil composition and fatty acid profile of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of salicylic acid. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *90*(15), 2608-2616. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4129>

Ruiz, R.A. and Maddonni, G.A. 2006. Sunflower seed weight and oil concentration under different post-flowering source-sink ratios. *Crop Science*, 46(2), 671-680. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0139>

Steer, B. T., & Hocking, P. J. 1987. Characters of sunflower genotypes (*Helianthus annuus* L.) suited to irrigated production. *Field Crops Research*, 15(3-4), 369-387.

Hocking, P. J., Randall, P. J., & Pinkerton, A. 1987. Sulphur nutrition of sunflower (*Helianthus annuus*) as affected by nitrogen supply: Effects on vegetative growth, the development of yield components, and seed yield and quality. *Field Crops Research*, 16(2), 157-175. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(87\)90005-0](https://doi.org/10.1016/0378-4290(87)90005-0)

Effect of Salicylic Acid Foliar Application on Oxidative Stress Alleviation, Antioxidant System Responses and Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) under Linuron Herbicide Treatment

H. Saki¹, A. Abdali Mashhadi², E. Elahi Fard³ and A. Ghatei^{4*}

1, 2, 3 & 4) Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran.

*Corresponding author : ghateiali@asnrukh.ac.ir

This article is taken from a doctoral dissertation.

Received date: 2025.07.20

Accepted date: 2025.10.20

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of foliar application of salicylic acid on yield and the alleviation of linuron-induced oxidative stress in sunflower. The experiment was conducted as a factorial arrangement in a randomized complete block design (RCBD) with three replications during the 2021–2022 growing season. Experimental factors included different levels of linuron herbicide (0, 0.25, 0.5, 0.75, and 1 L ha⁻¹) and foliar application of salicylic acid (0, 0.5, 1, and 2 mM). Application of linuron alone significantly increased grain yield, thousand-seed weight, and sunflower dry matter, while reducing weed dry weight. The interaction between linuron and salicylic acid was significant for oil yield, number of seeds per head, catalase activity, and malondialdehyde content. The highest oil yield (1459 kg ha⁻¹) was obtained with 1 L ha⁻¹ linuron combined with 0.5 mM salicylic acid, which was 102% higher than the control. The maximum seed yield (3937.9 kg ha⁻¹) and thousand-seed weight (55.7 g) were observed with 1 L ha⁻¹ linuron representing increases of 50% and 19%, respectively, compared to the control. Moreover, the highest catalase activity and the lowest malondialdehyde content were recorded in treatments containing higher linuron concentrations (0.75 and 1 L ha⁻¹) combined with 0.5 mM salicylic acid. Overall, foliar application of 0.5 mM salicylic acid effectively alleviated the potential adverse effects of linuron by activating the antioxidant system (increasing catalase activity) and reducing oxidative stress indicators (malondialdehyde), thereby improving sunflower performance in some cases. Therefore, the combined application of linuron and salicylic acid can be recommended as an effective management strategy to enhance sunflower oil yield.

Key words: Oxidative stress, oil yield and catalase enzyme activity.