اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر تعدیل تنش اکسیداتیو، سیستم آنتی‌اکسیدانی و عملکرد آفتابگردان تحت تیمار علف‌کش 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، ملاثانی، ایران.

نویسنده مسئول*: ghateiali@asnrukh.ac.ir

این مقاله برگرفته از رساله دکتری می‌باشد.

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۰۴/۲۹ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸**

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد و کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از کاربرد علف‌کش لینورون در آفتابگردان انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل سطوح مختلف علف‌کش لینورون (عدم کاربرد، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار) و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک (عدم کاربرد، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مولار) بود. کاربرد علف‌کش لینورون به تنهایی باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه، وزن هزار دانه و ماده خشک آفتابگردان و کاهش وزن خشک علف‌های هرز شد. اثر متقابل علف‌کش و اسید سالیسیلیک بر عملکرد روغن، تعداد دانه در طبق، فعالیت کاتالاز و میزان مالون‌دی‌آلدئید معنی‌دار بود. بالاترین عملکرد روغن (۱۴۵۹ کیلوگرم در هکتار) با کاربرد ۱ لیتر در هکتار لینورون و ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به‌دست 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 به‌ترتیب ۵۰ و ۱۹ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. همچنین بیشترین فعالیت کاتالاز و کم‌ترین میزان مالون‌دی‌آلدئید در ترکیب تیماری شامل سطوح بالای علف‌کش (۰/۷۵ و یک لیتر) همراه با اسید سالیسیلیک ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده شد. به‌طور کلی، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار توانست با فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی (افزایش کاتالاز) و کاهش شاخص تنش اکسیداتیو (مالون‌دی‌آلدئید)، اثرات منفی احتمالی علف‌کش را تعدیل و در برخی موارد عملکرد آفتابگردان را بهبود بخشد. بنابراین، استفاده هم‌زمان این دو ماده می‌تواند به عنوان یک راهکار مدیریتی مفید در جهت افزایش عملکرد روغن آفتابگردان توصیه گردد.

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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 می باشد 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). علف‌کش لینورون، یک علف‌کش 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 به‌عنوان 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 می شود (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 می تواند 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). محلول‌پاشی 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 علف‌کش 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 علف‌کش پاراکوات در گیاهان مختلف شده است (Silverman *et al*., 2005). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک ۲۴

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

ساعت قبل از مصرف علف‌کش پاراکوات روی گیاهچه های 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 *at 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 درآفتابگردان 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 بلوک های 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 و۳۶ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۲۲ متر ارتفاع از سطح دریا اجرا گردید (جدول۱). 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 (به‌صورت پس رویشی در مرحله ۱۰-۸ برگی آفتابگردان) اجرا گردید. انتخاب فاصله زمانی ۳ روز بین محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و کاربرد علف‌کش لینوران 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

علف‌کش کلتودیم در ذرت، کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید و بهبود سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی را گزارش نمودند (Radwan and Soltan, 2012). از سوی دیگر گزارش شده است که کاربرد اسید سالیسیلیک ۲۴ ساعت قبل از علف‌کش گلایفوسیت در گندم، باعث کاهش مؤثر شاخص‌های 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 آنتی‌اکسیدانی 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 ۵۱-۴۸ درصد است. جهت آماده‌سازی 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 سانتی‌متر و فاصله بذرها روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر بود. یک خط نکاشت بعنوان فاصله بین کرت‌های آزمایشی در نظر گرفته شد. در هر محل کشت ۳ عدد بذر به عمق ۳-۲ سانتی‌متر قرار داده شد و بعد از سبز شدن در مرحله ۴-۲ برگی گیاهچه‌ها تنک شدند. قبل از اجرای آزمایش، نمونه‌هایی مرکب از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک تهیه و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک محل آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. مرحله ی محلول پاشی سالیسیلیک اسید در مرحله ی ۸ الی۱۰ برگی گیاه آفتابگردان انجام گردید و ۳ روز بعد از آن تیمار سم لینورون اعمال شد. ۲۸ روز بعد از اعمال علفکش، 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 علف‌های هرز، در درون پاکت‌ها در آونی با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت نگهداری و پس از اطمینان از خشک بودن، نمونه‌ها توزین شد. مقدار مصرفی کودهای شیمیایی NPK طبق گزارش تجزیه خاک در دو مرحله اجرا گردید (جدول ۲). همچنین نحوه‌ی آبیاری در این طرح به صورت جوی و پشته بود. اعمال تیمارهای مذکور با سمپاش پشتی شارژی بعد از کالیبره کردن انجام شد.

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

سال	ماه	دمای حداکثر (سانتی‌گراد)	دمای حداقل (سانتی‌گراد)	میزان بارندگی (میلی‌متر)	میزان تبخیر (میلی‌متر)
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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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

عمق خاک (سانتی‌متر)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	نیتروژن (N) (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	فسفر (P) (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاس (K) (میلی‌گرم 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 بذرشمار محاسبه گردید. بذرهای 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 دی آلدئید 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 برگی (کد BBCH ۱۸) و پنج روز پس از کاربرد علفکش انجام شد. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز از روش ابی[1] (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

[1]- Aebi

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

Packer (۱۹۶۸) تعیین کرد، که محصول نهایی پراکسیداسیون چربی است. در ابتدا نیم‌گرم برگ ۱۰ میلی‌لیتر تری کلرو استیک اسید ۰/۱ درصد عصاره‌گیری شده و به‌مدت ۱۵ دقیقه در ۱۵۰۰۰ هزار دور سانتریفیوژ قرار گرفت. به ازای هر یک میلی‌لیتر عصاره، ۴ میلی لیتر محلول تری کلرو استیک اسید ۲۰ درصد حاوی ۰/۵ درصد الکل ترت بوتیل الکل (TBA) اضافه گردید. ظرف حاوی عصاره به‌مدت ۳۰ دقیقه در ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد و سپس ظرف حاوی عصاره در حمام یخ خنک شد. عصاره‌ها به‌مدت ده دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. قرائت در طول موج-های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر انجام گردید (شاهد ۲ میلی‌لیتر الکل TBA و یک میلی‌لیتر 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 می‌باشد).

تجزیه آماری داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه۹/۴) 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 علف‌کش لینورون بر عملکرد ماده خشک آفتابگردان در سطح یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثرات اصلی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل آن با لینورون فاقد معنی‌داری آماری تشخیص داده شد. بالاترین میزان ماده خشک (۱۲۷۴۹ و ۱۲۶۶۷ کیلوگرم در هکتار) به‌ترتیب 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 علف‌کش) نشان دادند (جدول ۴). افزایش چشمگیر زیست‌توده رویشی در پاسخ به کاربرد لینورون را می‌توان به مهار مؤثر طیف وسیعی از علف‌های هرز (به‌ویژه سوروف، تاج‌خروس و سلمه‌تره) نسبت داد که با کاهش وزن خشک علف‌های هرز از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار همراه بود. این رخداد، رقابت بر سر منابع حیاتی مانند نور، آب و عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن را به شدت کاهش می‌دهد 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 اندام‌های هوایی انباشته سازد. به بیان دیگر، به‌نظر می‌رسد که در شرایط عدم کنترل علف‌های هرز، منبع اصلی محدودکننده رشد آفتابگردان، همانا رقابت بین‌گونه‌ای بوده است و حذف این رقابت، پتانسیل ژنتیکی گیاه را برای تولید زیست‌توده آشکار ساخته است. در مقابل، عدم معنی‌داری اثر اسید سالیسیلیک بر ماده خشک آفتابگردان در این آزمایش، یافته‌ای قابل تأمل است که چند تفسیر فیزیولوژیک برای آن می‌توان متصور شد. نخست آنکه اسید سالیسیلیک اگرچه به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد، می‌تواند با افزایش هدایت روزنه‌ای، جذب CO_2 و تعرق، تبادلات گازی و عملکرد

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

فتوسنتزی را بهبود دهد و در نهایت باعث افزایش سطح برگ یا زیست‌توده شود (Aires *et al*., 2022). اما در شرایطی که تنش اکسیداتیو حاصل از علف‌کش، به‌طور مستقیم ساختار فتوسیستم‌های گیاه زراعی را تخریب نکند (همان‌گونه که در سطوح متوسط و بالای لینورون، افزایش ماده خشک مشاهده شد)، اثر تقویتی اسید سالیسیلیک بر زیست‌توده رویشی چندان محسوس نخواهد بود. به‌عبارت دیگر، لینورون در دُزهای مصرفی این پژوهش، اگرچه با القای گونه‌های فعال اکسیژن باعث بروز تنش اکسیداتیو در آفتابگردان می‌شود (که با تغییرات معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید 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 می‌گذارد. از سوی دیگر، اسید سالیسیلیک ممکن است به‌جای اختصاص دادن کربوهیدرات‌های فتوسنتزی به ساقه و برگ (ماده خشک رویشی)، منابع را به‌سوی تولید دانه و روغن (شاخص برداشت) هدایت نماید، که این تفسیر با افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و روغن در تیمارهای ترکیبی طبق جدول ۵ همخوانی کامل دارد. اسید سالیسیلیک ممکن است، به‌ویژه تحت شرایط تنش، با تقویت بازتخصیص کربن و نیتروژن به مخزن و بهبود برخی مؤلفه‌های عملکرد دانه و شاخص برداشت همراه باشد، بااین‌حال، این اثر به غلظت، روش کاربرد و وضعیت گیاه وابسته است (Sharma *et al*., 2018; Miura & Tada, 2014). شواهد موجود نشان می‌دهند که اسید سالیسیلیک می‌تواند در برخی گیاهان و به‌ویژه تحت تنش، با تقویت انتقال مجدد کربن و نیتروژن به اندام‌های 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 کربوهیدرات‌های فتوسنتزی نیست. در سویا تحت خشکی، تیمار اسید سالیسیلیک با افزایش بازتخصیص کربن و نیتروژن به مخزن‌های 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 کرده‌اند. 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 نمی‌کنند (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 اندام‌های رویشی و زایشی را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نکردند (Singh *et al*., 2026). محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در مرحله رویشی، در برخی شرایط آزمایشی، توانسته است عملکرد بیولوژیک آفتابگردان را افزایش دهد، بااین‌حال، میزان این پاسخ به وضعیت آبی و مرحله کاربرد وابسته است (Bukhsh *et al*., 2009). اما این افزایش اغلب در شرایط اعمال تنش‌های غیرزیستی شدید (خشکی یا شوری) گزارش شده است، جایی که سیستم آنتی‌اکسیدانی نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ ساختار کلروپلاست و تداوم فتوسنتز دارد. در پژوهش حاضر، به‌نظر می‌رسد که نقش غالب در تعیین زیست‌توده نهایی، نه توانایی

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

آنتی‌اکسیدانی ذاتی گیاه، بلکه شدت رقابت علف‌های هرز بوده است؛ چراکه حتی در غیاب اسید سالیسیلیک، افزایش غلظت لینورون به‌تنهایی توانست ماده خشک را به حداکثر برساند. همچنین، دُزهای بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی‌مولار) نه‌تنها اثری افزایشی بر ماده خشک نداشتند، بلکه در برخی ترکیبات (مثلاً ۱ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) کاهش نسبی زیست‌توده مشاهده شد که می‌تواند ناشی از اثرات آللوپاتیک یا القای تنش هورمونی در غلظت‌های فراتر از آستانه بهینه باشد. در مجموع، می‌توان چنین استنباط کرد که عملکرد ماده خشک آفتابگردان در این آزمایش، عمدتاً تابعی از موفقیت در کنترل علف‌های هرز است و اسید سالیسیلیک اگرچه نقش مؤثری در تعدیل تنش اکسیداتیو و بهبود اجزای عملکرد دانه دارد، اما تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر تولید زیست‌توده 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 علف‌کش لینورون بر وزن خشک علف‌های هرز در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر اصلی اسید سالیسیلیک و اثر متقابل این دو تیمار فاقد معنی‌داری بود (جدول ۳). این یافته به روشنی حاکی از آن است که کاهش زیست‌توده علف‌های هرز در این پژوهش، بیشتر و به‌طور مستقل از غلظت اسید سالیسیلیک مصرفی، ناشی از عملکرد مستقیم علف‌کش لینورون بوده است. به عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک نه به‌تنهایی و نه در تعامل با لینورون، نتوانسته است تغییر معنی‌داری در وزن خشک نهایی علف‌های هرز ایجاد کند. مقایسه میانگین سطوح علف‌کش نشان داد که بیشترین وزن خشک علف‌هرز (۱۲۱۷ کیلوگرم در هکتار) در شرایط عدم کاربرد لینورون ثبت شد که بیانگر توانایی بالای جامعه علف‌های هرز (شامل سوروف، تاج‌خروس، سلمه‌تره 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 علف‌هرز به‌طور معنی‌دار و پله‌ای کاهش یافت و کم‌ترین میزان (۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) در بالاترین سطح مصرفی (۱ لیتر در هکتار) حاصل شد. این روند کاهشی معنی‌دار، مؤید کارایی مطلوب لینورون در مهار طیف وسیعی از علف‌های هرز مزارع آفتابگردان است و با نتایج پژوهش‌های پیشین در خصوص تأثیر این علف‌کش بر کاهش زیست‌توده علف‌های هرز همخوانی دارد (Heap, 2023; Gürbüz & Alptekin, 2024). اما نکتهٔ شایان تأمل، عدم تأثیر معنی‌دار اسید سالیسیلیک بر وزن خشک علف‌هرز است. هرچند برخی از محققان پیشنهاد کرده‌اند که اسید سالیسیلیک می‌تواند با افزایش حساسیت علف‌های هرز به علف‌کش‌ها، کارایی کنترل شیمیایی را بهبود بخشد (Khan *et al*., 2015؛ Farooq *et al*., 2008) اما نتایج پژوهش حاضر چنین اثر هم‌افزایی را تأیید نمی‌کند. چندین توجیه فیزیولوژیک و اکولوژیک برای این عدم پاسخ قابل ارائه است. نخست آن‌که در این آزمایش، اسید

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

سالیسیلیک سه روز قبل از علف‌کش به‌صورت محلول‌پاشی بر روی آفتابگردان اعمال شد. اگرچه این فاصله زمانی برای القای سیستم آنتی‌اکسیدانی در گیاه زراعی مؤثر بوده است (همان‌گونه که با افزایش فعالیت کاتالاز و کاهش مالون‌دی‌آلدئید تأیید گردید)، اما ممکن است برای ایجاد تغییرات فیزیولوژیک قابل‌توجه در علف‌های هرز (که اهداف مستقیم محلول‌پاشی نبوده‌اند) کافی نبوده باشد. همچنین غلظت‌های به‌کاررفته اسید سالیسیلیک (۰/۵ تا ۲ میلی‌مولار) اگرچه برای تعدیل تنش اکسیداتیو در آفتابگردان بهینه بوده، اما ممکن است برای تحریک پاسخ‌های دفاعی یا افزایش جذب علف‌کش در علف‌های هرز در آستانهٔ مؤثر قرار نداشته باشد (Ramu *et al*., 2016). دوم آن‌که لینورون از علف‌کش‌های گروه فنیل‌اوره‌هاست و با مهار انتقال الکترون در فتوسیستم II، فرایند فتوسنتز را مختل می‌کند. مهارکننده‌های فتوسیستم II با اتصال به پروتئین D1، انتقال الکترون به پلاستوکوینون را مسدود می‌کنند؛ در نتیجه تبدیل انرژی نورانی به انرژی الکتروشیمیایی مختل می‌شود و به‌طور مستقیم فرایند فتوسنتز را مختل می‌کند (Fuerst & Norman, 1991). مطالعات نشان داده‌اند که لینورون در دُزهای مشخص می‌تواند کنترل قابل‌توجهی ایجاد کند، اما این نتیجه به معنی مؤثر بودن هر غلظت پایین برای همه گونه‌ها نیست (Soltani *et al*., 2011). بنابراین، قدرت بالای لینورون در کنترل علف‌هرز به‌حدی بوده که جایی برای اثرات تکمیلی یا تعدیل‌کنندهٔ اسید سالیسیلیک باقی نگذاشته است. به عبارت دیگر، در شرایطی که علف‌کش به‌تنهایی قادر به کاهش ۴۱ درصدی وزن خشک علف‌هرز (از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) است، افزودن اسید سالیسیلیک نمی‌تواند اثر قابل‌اندازه‌گیری بر این صفت بیفزاید. سوم آن‌که، اسید سالیسیلیک تأثیر معنی‌داری بر افزایش زیست‌توده رویشی گیاه زراعی نداشت. از آنجا که هر گونه افزایش غیرمستقیم توان رقابتی آفتابگردان (از طریق افزایش رشد یا سطح برگ) می‌تواند به‌طور ثانویه بر جمعیت علف‌های هرز تأثیر بگذارد، عدم تغییر معنی‌دار در ماده خشک آفتابگردان توسط اسید سالیسیلیک، توجیه‌گر عدم تأثیر غیرمستقیم این ترکیب بر وزن خشک علف‌هرز است. به‌عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک اغلب از طریق تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و بهبود فرایندهای زایشی عمل کرده است، نه از طریق تغییر محسوس در رقابت رویشی. چهارمین موردی که می‌توان به آن اشاره کرد واکنش متفاوت گونه‌های علف‌های هرز به اسید سالیسیلیک است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که پاسخ علف‌های هرز به اسید سالیسیلیک وابسته به گونه است و ممکن است برخی گونه‌ها با افزایش رشد یا تغییر در متابولیسم به اسید سالیسیلیک پاسخ دهند (Khan *et al*., 2015). در این مطالعه، جامعه علف‌هرز شامل گونه‌های متنوعی بود که احتمال دارد واکنش‌های متفاوتی نشان داده باشند و در نتیجه اثر کلی خنثی یا غیرمعنی‌دار شده است. همچنین ممکن است اسید سالیسیلیک در غلظت‌های بالاتر (بیش از ۲ میلی‌مولار) بتواند بر فیزیولوژی علف‌هرز مؤثر باشد، اما در این آزمایش چنین غلظت‌هایی بررسی نشد. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Farooq و همکاران (۲۰۰۸) که گزارش کردند اسید سالیسیلیک

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

می‌تواند حساسیت علف‌های هرز را به علف‌کش افزایش دهد، در تناقض نیست، بلکه نشان می‌دهد که این اثر وابسته به شرایط آزمایش، نوع علف‌کش، گونه علف‌هرز، غلظت و زمان کاربرد است. در مطالعهٔ مذکور، اسید سالیسیلیک بر روی بذر یا گیاهچهٔ علف‌هرز اعمال شده بود، در حالی که در پژوهش حاضر، اسید سالیسیلیک تنها روی گیاه زراعی محلول‌پاشی شد و علف‌های هرز به‌طور مستقیم تحت تأثیر آن قرار نگرفتند. از سوی دیگر، تحقیقات جدیدتر نشان داده‌اند که اسید سالیسیلیک می‌تواند از طریق افزایش تحمل گیاه هدف، به‌طور غیرمستقیم کارایی علف‌کش را بهبود بخشد، اما این بهبود در کاهش زیست‌توده علف‌هرز نیست، بلکه در حفظ عملکرد گیاه زراعی در حضور علف‌کش 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، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط این آزمایش، عامل اصلی و تعیین‌کننده در کاهش وزن خشک علف‌های هرز، تنها کاربرد علف‌کش لینورون بوده و اسید سالیسیلیک با دُزها و روش کاربرد به‌کاررفته، تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم قابل‌توجهی بر مهار علف‌های هرز نداشته است. این یافته از دیدگاه مدیریت تلفیقی علف‌های هرز حائز اهمیت است، چراکه نشان می‌دهد در شرایطی که علف‌کش مؤثری مانند لینورون در دُز مناسب استفاده شود، افزودن اسید سالیسیلیک تنها به‌منظور افزایش مهار علف‌هرز ضرورتی ندارد، اما می‌تواند به‌عنوان 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 علف‌کش لینورون بر عملکرد دانه آفتابگردان در سطح یک درصد معنی‌دار بود، در حالی که اثر اصلی اسید سالیسیلیک فاقد معنی‌داری آماری بود. اثر متقابل لینورون × اسید سالیسیلیک نیز در سطح خطای پنج درصد معنی‌دار نبود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر اصلی علف‌کش نشان داد که بالاترین عملکرد دانه (۳۹۳۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار یک لیتر در هکتار لینورون به‌دست آمد که نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد علف‌کش با عملکرد ۲۶۲۴ کیلوگرم در هکتار) افزایشی حدود ۵۰ درصد را نشان می‌دهد (جدول ۴). تیمارهای ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار لینورون از این نظر تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند که حاکی از دستیابی به بیشینهٔ پاسخ عملکردی در دُزهای میانی تا بالای علف‌کش است. این افزایش چشمگیر را می‌توان به کاهش معنی‌دار وزن خشک علف‌های هرز (از ۱۲۱۷ به ۷۱۳ کیلوگرم در هکتار) نسبت داد که به‌نوبه‌ی خود، رقابت بر سر منابع حیاتی (آب، نور و عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن) را به شدت کاهش داده است. در چنین شرایطی، گیاه آفتابگردان با بهره‌مندی از سطح برگ بیشتر، شاخص سطح برگ بهبودیافته و کارایی مصرف نور بالاتر، توانسته است فتوسنتز خالص را افزایش داده و بخش بیشتری از ماده‌ی 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 قابل‌توجه است و نشان‌دهندهٔ 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 بهینه (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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 تعدیل‌کنندهٔ اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه، هنگامی به‌حداکثر می‌رسد که علف‌کش 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. مقایسهٔ 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 درجهٔ 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 آنتی‌اکسیدانی، کاهش پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و بهبود انتقال مجدد مواد به دانه، عملکرد دانه را تا آستانهٔ 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، دامنهٔ 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 علف‌کش لینورون و اسید سالیسیلیک و نیز اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد روغن آفتابگردان در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). این معنی‌داریِ 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

حاصلضرب عملکرد دانه در درصد روغن به‌دست می‌آید، به‌عنوان 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 به‌طور کلی افزایش یافته است، اما این افزایش در حضور اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار به‌حداکثر 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 رتبهٔ بعدی قرار گرفت و اختلاف ناچیزی با تیمار برتر داشت. این یافته به‌وضوح 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 شبکهٔ 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 غشاها در مواجهه با علف‌کش‌ها جلوگیری می‌کند و زمینه را برای ادامهٔ 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 به‌طور نامتناسب با افزایش عملکرد دانه بالا می‌برد. سوم آن‌که نکتهٔ شایان توجه اینکه اثر

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

متقابل بر عملکرد روغن در سطح یک درصد معنی‌دار شد، در حالی که اثر متقابل بر عملکرد دانه در سطح پنج درصد معنی‌دار نبود. این تفاوت آشکار نشان می‌دهد 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 (به‌ویژه ۰/۷۵ و ۱ لیتر لینورون همراه با ۰/۵ میلی‌مولار 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 یافته‌های دولت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی دارد که گزارش کردند محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در مرحلهٔ گلدهی، بالاترین درصد روغن را در آفتابگردان به همراه دارد. همچنین Sedghi و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که اسید سالیسیلیک با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، شرایط فیزیولوژیک مطلوب‌تری برای پر شدن دانه و انباشت روغن فراهم می‌کند. چهارم آن‌که نکته قابل توجه دیگر آن بود که در تمام سطوح علف‌کش، غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بهترین پاسخ را در عملکرد روغن ایجاد کرد و افزایش غلظت به ۱ و ۲ میلی‌مولار نه‌تنها افزایش بیشتری به همراه نداشت، بلکه در برخی موارد (مانند ۱ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با عملکرد ۱۴۳۳ کیلوگرم در هکتار) نسبت به غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، کاهش جزئی نشان داد. این پدیده را می‌توان با اثر هورمزیس (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) توجیه کرد. در غلظت‌های پایین (۰/۵ میلی‌مولار)، اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک سیگنال دهندهٔ تنش عمل کرده و بدون ایجاد آسیب، سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی را به‌گونه‌ای فعال می‌کند که هزینهٔ متابولیکی آن با مزایای حفاظتی آن جبران می‌شود. اما در غلظت‌های بالاتر (۱ و ۲ میلی‌مولار)، اسید سالیسیلیک ممکن است خود به‌عنوان یک عامل تنش‌زای اکسیداتیو عمل کرده، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش دهد، یا با تحریک سنتز اتیلن، ریزش دانه‌های جوان را تشدید کند (Ramu *et al*., 2016; Mehak *et al*., 2021). همچنین، غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک ممکن است با انحراف مسیر کربوهیدرات‌ها به سمت تولید ترکیبات دفاعی (فنل‌ها و لیگنین) به‌جای لیپیدها، از سنتز روغن بکاهد. مورد پنجم، نقش سطوح علف‌کش در تعیین پاسخ به اسید سالیسیلیک است. در سطوح پایین لینورون (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، به‌دلیل کنترل ناقص علف‌های هرز و بقای رقابت شدید، عملکرد پایهٔ روغن در سطح پایینی قرار دارد. در این شرایط، حتی افزودن اسید سالیسیلیک (حتی در غلظت بهینهٔ ۰/۵ میلی‌مولار) نمی‌تواند کمبود شدید منابع را جبران کند و بنابراین، اثر افزایشی آن چندان محسوس نیست. به‌عبارت روشن‌تر، اثر تعدیل‌کنندهٔ اسید سالیسیلیک بر سنتز روغن، هنگامی به‌حداکثر می‌رسد که گیاه زراعی از بستر رقابتی مناسبی برخوردار باشد (یعنی علف‌های هرز به‌خوبی کنترل شده باشند). در مقابل، در سطوح بالای علف‌کش (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 قابل‌توجهی از پتانسیل ژنتیکی

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

گیاه را در تولید روغن آشکار سازد. در مجموع، نتایج این بخش به‌وضوح نشان می‌دهد که عملکرد روغن به‌عنوان 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 محدودهٔ ۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار (سه روز پیش از کاربرد علف‌کش)، به‌عنوان 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 آستانهٔ ۰/۵ میلی‌مولار نه‌تنها 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 آفتابگرداندر 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 به‌دست 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 به‌نوبهٔ خود، رقابت بر سر منابع حیاتی (آب، نور و عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن) را به شدت کاهش داده است. در چنین شرایطی، گیاه آفتابگردان با بهره‌مندی از سطح برگ بیشتر، شاخص سطح برگ بهبودیافته و کارایی مصرف نور بالاتر، توانسته است فتوسنتز خالص را افزایش داده و در دورهٔ 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 دورهٔ 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 دورهٔ 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

(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، نه‌تنها 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 حاصلضرب 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). به‌عبارت 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. به‌عبارت 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

معنی‌داری بر این صفت نداشته است. با این حال، بررسی روند داده‌ها نشان می‌دهد که در غیاب تنش علف‌کش (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 علف‌کش، این اثر با افزایش تعداد دانه و رقابت درون‌گیاهی خنثی می‌شود. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که اثر اسید سالیسیلیک بر وزن هزار دانه، غیرمستقیم و وابسته به شدت تنش (غلظت علف‌کش) و تعادل منبع-مخزن است. پژوهش‌های آتی با اندازه‌گیری دقیق‌تر طول دورهٔ 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 علف‌کش 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، نشان‌دهندهٔ حساسیت بالای فرایندهای تشکیل و استقرار دانه به برهم‌کنش این دو تیمار است. به‌عبارت دیگر، اسید سالیسیلیک توانسته است از طریق مکانیسم‌های فیزیولوژیک خاص، بر تعداد دانه‌های تشکیل‌شده 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 آن‌که مقایسه میانگین‌ها روند مثبت کنترل علف‌هرز بر افزایش تعداد دانه در طبق را نشان داد. در سطوح بالای علف‌کش (۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار)، تعداد دانه در طبق به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. به‌عنوان 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 به‌نوبهٔ 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 گِل‌های ماده را در طبق نگهداری کرده و از ریزش آن‌ها جلوگیری کند. دوم آن‌که نقش تعدیل‌کنندهٔ اسید سالیسیلیک در کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش بقای دانه از نکات قابل توجه است. در هر سطح از علف‌کش، کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش تعداد دانه نسبت به تیمارهای فاقد اسید سالیسیلیک گردید. به‌عنوان 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 آنتی‌اکسیدانی، 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 لولهٔ گرده، 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 آنتی‌اکسیدانی، یکپارچگی غشاها را در شرایط تنش حفظ کرده و از ریزش اندام‌های تولیدمثلی جلوگیری می‌کند. سوم آن‌که، قابل‌توجه‌ترین یافته در این بخش، ثبت بالاترین تعداد دانه در طبق (۱۱۲۰ عدد) در تیماری است که در آن علف‌کش لینورون به‌کار 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 نکتهٔ 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 قابل‌توجهی داشته است. این رفتار وابسته به صفت، نشان‌دهندهٔ 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. به‌عبارت 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

پژوهش‌های Sharma و همکاران (۲۰۱۸) در سویا همخوانی دارد که نشان دادند اسید سالیسیلیک می‌تواند بازتخصیص کربن و نیتروژن را به مخزن‌های زایشی افزایش دهد. یکی از مواردی می‌توان اشاره نمود عدم رقابت درون‌گیاهی شدید در غیاب علف‌کش است. در تیمار عدم کاربرد لینورون، هرچند علف‌های هرز وجود داشتند و رقابت می‌کردند، اما تعداد طبق‌های تشکیل‌شده بر روی بوته‌های آفتابگردان به‌دلیل عدم سمیت علف‌کش، بیشتر بود. اسید سالیسیلیک با کاهش ریزش دانه‌های جوان در این طبق‌ها، توانست تعداد دانه را به حداکثر برساند. در مقابل، در تیمارهای دارای علف‌کش، گرچه رقابت علف‌هرز کاهش یافته بود، اما خود علف‌کش 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. به‌نظر می‌رسد در تیمار عدم کاربرد لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، چون تنش مضاعفی از سوی علف‌کش 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 علف‌کش (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، به‌دلیل 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 علف‌کش (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) نه‌تنها افزایش بیشتری به همراه نداشت، بلکه در برخی موارد کاهش نسبی نشان داد. به‌عنوان 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 هورمزیس (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 رابطهٔ معکوس تعداد دانه و وزن هزار دانه است. مقایسهٔ روند تغییرات تعداد دانه در طبق با وزن هزار دانه در جدول ۵ وجود یک رابطهٔ جبرانی منفی را آشکار می‌سازد. در تیمارهایی که تعداد دانه به‌حداکثر 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 رابطهٔ

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 رابطهٔ 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 تغذیهٔ 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 نشان‌دهندهٔ وجود رابطهٔ جبرانی منفی میان این دو صفت است. بنابراین، برای دستیابی به تعادل مطلوب بین تعداد و وزن دانه و در نتیجه، بیشینهٔ عملکرد، ترکیب لینورون در محدودهٔ 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 گِل‌ها، 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 معنی‌داریِ اثر متقابل، حاکی از آن است که

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

فعالیت کاتالاز تحت تأثیر ترکیب این دو تیمار قرار گرفته و پاسخ گیاه به کاربرد اسید سالیسیلیک، به شدت به سطح تنش ناشی از علف‌کش وابسته است. کاتالاز یکی از آنزیم‌های کلیدی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی است که نقش اصلی آن، سم‌زدایی پراکسید هیدروژن و تبدیل آن به آب و اکسیژن می‌باشد. افزایش فعالیت این آنزیم، معمولاً پاسخی به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش اکسیداتیو است. مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز به‌ترتیب در تیمار ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار 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 نشان‌دهندهٔ فعال‌سازی شدید سیستم دفاعی در پاسخ به تنش ترکیبی علف‌کش و اسید سالیسیلیک است. روند کلی تغییرات نشان می‌دهد که در سطوح پایین و متوسط علف‌کش (۰/۲۵ تا ۰/۷۵ لیتر در هکتار)، افزایش غلظت لینورون همراه با اسید سالیسیلیک (به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار) موجب افزایش معنی‌دار فعالیت کاتالاز شده است. با این حال، در بالاترین سطح علف‌کش (۱ لیتر در هکتار)، این روند افزایشی متوقف شده و در برخی موارد کاهش یافته است (مانند تیمار ۱ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با فعالیت ۹۵/۴۵ در مقایسه با ۱۰۲/۱ در تیمار ۰/۷۵ لیتر). همچنین در تیمار ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، فعالیت آنزیم به‌طور غیرمنتظره‌ای کاهش یافت (۲۷/۸۴ میکرومول در دقیقه) که نشان‌دهندهٔ اثرات بازدارندهٔ غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک در سطوح پایین علف‌کش است. برای تبیین دقیق‌تر این الگوی پیچیده، چند مکانیسم فیزیولوژیک و بیوشیمیایی قابل طرح است: اول آن‌که یکی از نکات قابل توجه، احتمال پاسخ دوگانهٔ آنزیم کاتالاز به تنش اکسیداتیو است. کاتالاز به‌عنوان یک آنزیم دفاعی، در پاسخ به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از تنش‌های محیطی (از جمله علف‌کش‌ها) معمولاً افزایش فعالیت نشان می‌دهد. لینورون با مهار فتوسیستم II، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را در کلروپلاست افزایش می‌دهد و سلول را با تنش اکسیداتیو مواجه می‌سازد. در این شرایط، افزایش فعالیت کاتالاز به‌عنوان یک پاسخ تطابقی برای سم‌زدایی H_2O_2 عمل می‌کند. این یافته با پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند علف‌کش‌ها می‌توانند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در گیاهان غیرهدف افزایش دهند. با این حال، در غلظت‌های بسیار بالای علف‌کش (مانند ۱ لیتر در هکتار لینورون)، شدت تنش ممکن است از آستانهٔ تحمل گیاه فراتر رفته و سیستم آنتی‌اکسیدانی دچار اختلال شود؛ به‌گونه‌ای که دیگر توانایی افزایش فعالیت کاتالاز را نداشته باشد. این پدیده در پژوهش Kaya و Yigit (۲۰۱۴) بر روی آفتابگردان تحت تیمار علف‌کش فلوروکلریدون نیز مشاهده شد، جایی که فعالیت کاتالاز در گیاهان تیمارشده با علف‌کش نسبت به شاهد کاهش یافت. به‌عبارت دیگر، افزایش غلظت علف‌کش تا یک آستانهٔ مشخص، فعالیت کاتالاز را تحریک می‌کند، اما فراتر از آن، سمیت علف‌کش ممکن است به ساختار آنزیم یا مسیرهای بیوسنتزی آن آسیب برساند. مورد دوم نقش

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

تعدیل‌کنندهٔ اسید سالیسیلیک (وابسته به غلظت و سطح تنش) است. اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک سیگنال‌دهندهٔ تنش، می‌تواند با فعال‌سازی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، تحمل گیاه را افزایش دهد. پژوهش Sedghi و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر روی آفتابگردان، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را افزایش می‌دهد. همچنین، مطالعه‌ای 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 می‌دهد که این اثر تحریکی، شدیداً وابسته به غلظت اسید سالیسیلیک و سطح تنش زمینه‌ای (غلظت علف‌کش) است. غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، در تمام سطوح علف‌کش (به‌جز ۱ لیتر) باعث افزایش فعالیت کاتالاز گردید و بهترین پاسخ را در سطح ۰/۷۵ لیتر لینورون ایجاد کرد. اما غلظت‌های بالاتر (۱ و ۲ میلی‌مولار) در برخی سطوح علف‌کش، نه‌تنها افزایش بیشتری به همراه نداشتند، بلکه در مواردی (مانند ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار و ۰/۵ لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار) باعث کاهش معنی‌دار فعالیت کاتالاز شدند. این رفتار را می‌توان با اثر هورمزیس (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) توجیه کرد. در غلظت‌های پایین (۰/۵ میلی‌مولار)، اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک محرک ملایم عمل کرده و با القای مسیرهای سیگنالینگ دفاعی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهد. اما در غلظت‌های بالاتر (۱ و ۲ میلی‌مولار)، ممکن است خود به‌عنوان یک عامل تنش‌زای اکسیداتیو عمل کرده، با افزایش تولید گونه‌های 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 تیمارشده با علف‌کش در مقایسه با گیاهان بدون اسید سالیسیلیک، کاهش داده است که مؤید اثرات دوگانه و وابسته به شرایط این ترکیب است. سوم آن‌که، یکی از یافته‌های قابل‌توجه پژوهش حاضر، افزایش چشمگیر فعالیت کاتالاز در تیمارهای ترکیبی ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک (۱۰۲ میکرومول در دقیقه) و ۱ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک (۹۵/۴۵ میکرومول در دقیقه) است. این افزایش، فراتر از جمع اثرات سادهٔ هر یک از تیمارهاست و نشان‌دهندهٔ یک اثر هم‌افزایی (سینرژیک) میان علف‌کش و اسید سالیسیلیک در فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی است. به‌نظر می‌رسد لینورون با ایجاد تنش اکسیداتیو، بستر مناسبی برای پاسخ دفاعی فراهم می‌کند و اسید سالیسیلیک با غلظت بهینه، این پاسخ را تشدید می‌نماید. با این حال، در بالاترین سطح علف‌کش (۱ لیتر در هکتار)، شدت تنش به‌حدی است که حتی اسید سالیسیلیک نیز نمی‌تواند به‌طور 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 گونه‌های فعال اکسیژن در آن‌ها افزایش یابد و اسید سالیسیلیک می‌تواند با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، این

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

ظرفیت را ارتقا دهد. مورد چهارم مقایسهٔ روند تغییرات فعالیت کاتالاز با میزان مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، یک رابطهٔ معکوس آشکار را نشان می‌دهد. در تیمارهایی که فعالیت کاتالاز به‌حداکثر رسیده است (مانند ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با فعالیت ۱۰۲ میکرومول در دقیقه)، میزان مالون‌دی‌آلدئید 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 مالون‌دی‌آلدئید به بالاترین مقدار (۲۷/۷۷ میکرومول در گرم) رسیده است. این رابطهٔ معکوس، گویای نقش کلیدی کاتالاز در کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و حفاظت از یکپارچگی غشای سلولی است. به‌عبارت دیگر، افزایش فعالیت کاتالاز با سم‌زدایی مؤثر H_2O_2، از تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (که عامل اصلی پراکسیداسیون لیپیدها هستند) جلوگیری کرده و در نتیجه، مالون‌دی‌آلدئید کاهش می‌یابد. پژوهش‌های پیشین نیز این رابطه را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، Kaya و Yigit (۲۰۱۴) نشان دادند که اگرچه علف‌کش فلوروکلریدون باعث کاهش فعالیت کاتالاز و افزایش مالون‌دی‌آلدئید در آفتابگردان شد، اما پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک، از افزایش مالون‌دی‌آلدئید 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 مالون‌دی‌آلدئید گردید. مورد پنجم، بررسی دقیق‌تر داده‌ها نشان می‌دهد 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 ایجادشده به نسبت ملایم است و اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار می‌تواند به‌خوبی فعالیت کاتالاز را افزایش دهد. اما در این سطوح، غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی‌مولار) اثر معکوس داشته و فعالیت کاتالاز را کاهش می‌دهند (به‌ویژه در تیمار ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار با فعالیت ۲۷/۸۴). این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط تنش ملایم، گیاه به تحریک دفاعی بیش از حد نیاز ندارد و غلظت‌های 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 میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بهترین پاسخ را ایجاد کرده و حتی غلظت ۲ میلی‌مولار 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 به‌حدی است که هیچ‌یک از غلظت‌های اسید سالیسیلیک نمی‌تواند فعالیت کاتالاز را به سطح تیمار ۰/۷۵ لیتر برساند. این الگوی وابسته به شدت تنش، نشان‌دهندهٔ وجود آستانه‌ای از تحمل است که فراتر از آن، سیستم آنتی‌اکسیدانی توانایی پاسخ‌دهی مؤثر را از دست می‌دهد. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم کاتالاز در آفتابگردان، پاسخی حساس و پیچیده به برهم‌کنش لینورون و اسید سالیسیلیک دارد. افزایش فعالیت کاتالاز در تیمارهای ترکیبی (به‌ویژه ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) بیانگر فعال‌سازی موفق سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو است که با کاهش مالون‌دی‌آلدئید و بهبود عملکرد روغن همراه بوده است. با این حال، این پاسخ وابسته به غلظت است و غلظت‌های بالاتر اسید سالیسیلیک (۱ و ۲ میلی‌مولار) در سطوح پایین علف‌کش و غلظت‌های بسیار بالای علف‌کش (۱ لیتر در هکتار) می‌توانند اثر معکوس داشته باشند. بنابراین، مدیریت دقیق غلظت‌های علف‌کش و اسید سالیسیلیک برای دستیابی به پاسخ مطلوب فیزیولوژیک ضروری است. پژوهش‌های آتی با اندازه‌گیری هم‌زمان فعالیت سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز)، میزان پراکسید هیدروژن و بیان ژن‌های مرتبط با کاتالاز، می‌تواند به روشن‌تر شدن مکانیسم‌های مولکولی این برهم‌کنش کمک کند. همچنین، با توجه به اثرات دوگانهٔ اسید سالیسیلیک، بررسی دامنهٔ غلظت‌های بین ۰/۵ تا ۱ میلی‌مولار با فواصل دقیق‌تر (مثلاً ۰/۲۵ میلی‌مولار) برای تعیین غلظت بهینه در سطوح مختلف تنش، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود.

مالون‌دی‌آلدئید

مالون‌دی‌آلدئید یکی از مهم‌ترین محصولات نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی است که به‌عنوان یک شاخص معتبر و رایج برای سنجش شدت تنش اکسیداتیو در گیاهان شناخته می‌شود. پراکسیداسیون لیپیدها، زنجیره‌ای از واکنش‌های شیمیایی است که در اثر حملهٔ گونه‌های فعال اکسیژن به اسیدهای چرب غیراشباع موجود در غشاهای سلولی (به‌ویژه غشای کلروپلاست، میتوکندری و شبکهٔ آندوپلاسمی) رخ می‌دهد و منجر به کاهش سیالیت غشاء، افزایش نفوذپذیری، اختلال در عملکرد کانال‌های یونی و در نهایت، از کار افتادن اندامک‌های سلولی می‌شود. بنابراین، افزایش سطح مالون‌دی‌آلدئید نشان‌دهندهٔ آسیب اکسیداتیو گسترده به ساختار سلول است و کاهش آن، بیانگر کارایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل علف‌کش لینورون و اسید سالیسیلیک بر میزان مالون‌دی‌آلدئید در گیاه آفتابگردان در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). این معنی‌داریِ قوی، حاکی از آن است که تأثیر اسید سالیسیلیک بر کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، شدیداً به سطح تنش ناشی از علف‌کش وابسته است و این دو عامل به‌گونه‌ای برهم‌کنش دارند که پاسخ نهایی، فراتر از اثرات جمع سادهٔ آن‌هاست. مقایسه میانگین اثرات متقابل الگوی روشنی را نشان می‌دهد: بالاترین میزان مالون‌دی‌آلدئید (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 می‌توان به حضور علف‌های هرز و تنش‌های زمینه‌ای (مانند نوسانات دما و رطوبت) نسبت داد که خود باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تخریب غشا می‌شوند. در مقابل،

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

کم‌ترین میزان مالون‌دی‌آلدئید (۸/۲۷ میکرومول در گرم) در تیمار ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک مشاهده شد که نسبت به شاهد کاهشی حدود ۲۳۵ درصد را نشان می‌دهد. این کاهش چشمگیر، نشان‌دهندهٔ نقش حفاظتی فوق‌العادهٔ اسید سالیسیلیک در مهار پراکسیداسیون لیپیدها، به‌ویژه در سطوح مؤثر علف‌کش است. برای شرح عمیق‌تر این الگوی پاسخ، چند مکانیسم فیزیولوژیک و بیوشیمیایی قابل طرح است: اول آن‌که، یکی از نکات قابل توجه رابطهٔ معکوس و هم‌بستهٔ مالون‌دی‌آلدئید با فعالیت آنزیم کاتالاز است. مقایسهٔ هم‌زمان داده‌های جدول ۵، یک رابطهٔ معکوس قوی را میان میزان مالون‌دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم کاتالاز آشکار می‌سازد. در تیمارهایی که فعالیت کاتالاز به‌حداکثر رسیده است (مانند ۰/۷۵ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با فعالیت ۱۰۲ میکرومول در دقیقه)، میزان مالون‌دی‌آلدئید به کم‌ترین مقدار کاهش یافته است. در مقابل، در تیمار شاهد که کاتالاز در پایین‌ترین سطح فعالیت (۱۱/۱۴ میکرومول در دقیقه) قرار دارد، مالون‌دی‌آلدئید بالاترین مقدار را نشان می‌دهد. این هم‌بستگی معکوس، گویای نقش کلیدی کاتالاز در سم‌زدایی H_2O_2 و جلوگیری از تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) از طریق واکنش فنتون است. H_2O_2 به‌تنهایی یک گونه فعال اکسیژن به نسبت پایدار است، اما در حضور یون‌های آهن یا مس، به رادیکال هیدروکسیل تبدیل می‌شود که بسیار واکنش‌پذیر است و عامل اصلی شروع زنجیرهٔ پراکسیداسیون لیپیدها محسوب می‌شود. بنابراین، افزایش فعالیت کاتالاز با حذف به‌موقع H_2O_2، از تولید رادیکال‌های هیدروکسیل جلوگیری کرده و در نتیجه، پراکسیداسیون لیپیدها و تجمع مالون‌دی‌آلدئید کاهش می‌یابد. این یافته با پژوهش‌های Ananieva و همکاران (۲۰۰۲) و Radwan و Soltan (۲۰۱۲) همخوانی کامل دارد که نشان دادند کاربرد اسید سالیسیلیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، از افزایش مالون‌دی‌آلدئید در مواجهه با علف‌کش‌ها جلوگیری می‌کند. در مورد دوم، همان‌گونه که در سایر صفات (کاتالاز و عملکرد روغن) نیز مشاهده شد، اثر اسید سالیسیلیک بر کاهش مالون‌دی‌آلدئید وابسته به غلظت است. غلظت ۰/۵ میلی‌مولار در تمام سطوح علف‌کش (به‌ویژه ۰/۷۵ و ۱ لیتر در هکتار) باعث کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید گردید. با این حال، در برخی تیمارها مانند ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، افزایش غیرمنتظرهٔ مالون‌دی‌آلدئید(۲۳/۰۹ میکرومول در گرم) نسبت به تیمارهای مشابه با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار (۱۵/۱۵ میکرومول در گرم) مشاهده شد. همچنین در سطح ۰/۵ لیتر لینورون، کاربرد ۱ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک با مالون‌دی‌آلدئید برابر ۱۴/۹۲ میکرومول در گرم، در حالی که غلظت ۰/۵ میلی‌مولار در همین سطح علف‌کش، مالون‌دی‌آلدئید را به ۱۸/۲ میکرومول در گرم کاهش داده بود (که خود یک ناهنجاری آماری جزئی محسوب می‌شود، اما روند کلی نشان‌دهندهٔ افزایش مالون‌دی‌آلدئید در غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک است). این الگوی دوگانه را می‌توان به اثر هورمزیس (دُز پایین محرک و دُز بالا بازدارنده) نسبت داد. در غلظت‌های پایین (۰/۵ میلی‌مولار)، اسید سالیسیلیک با

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی، از پراکسیداسیون لیپیدها جلوگیری می‌کند. اما در غلظت‌های بالاتر (۱ و ۲ میلی‌مولار)، ممکن است خود به‌عنوان یک ترکیب پرواکسیدان عمل کرده، یا با مهار موقت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند کاتالاز یا آسکوربات پراکسیداز)، زمینه را برای افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و در نتیجه، افزایش مالون‌دی‌آلدئید فراهم آورد. همچنین، غلظت‌های بالای اسید سالیسیلیک می‌توانند 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 به‌طور کلی مالون‌دی‌آلدئید را کاهش می‌دهد، اما در غلظت‌های بسیار بالا یا در ترکیب با برخی علف‌کش‌ها، اثرات متناقضی می‌تواند داشته باشد. مورد سوم، وابستگی پاسخ مالون‌دی‌آلدئید به شدت تنش علف‌کش است. بررسی دقیق‌تر داده‌ها نشان می‌دهد که در سطوح پایین علف‌کش (۰/۲۵ و ۰/۵ لیتر در هکتار)، میزان مالون‌دی‌آلدئید در تیمارهای فاقد اسید سالیسیلیک به نسبت بالا است (به‌ترتیب ۱۷/۰۸ و ۱۳/۵۶ میکرومول در گرم). این افزایش، بیشتر ناشی از رقابت علف‌های هرز و تنش‌های ثانویه ناشی از آن است، نه خود علف‌کش. در این سطوح، کاربرد اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار تا حدودی مالون‌دی‌آلدئید را کاهش می‌دهد، اما به‌دلیل شدت پایین تنش، اثر محافظتی چندان برجسته نیست. در مقابل، در سطح ۰/۷۵ لیتر لینورون که تنش اکسیداتیو ناشی از علف‌کش به‌اندازهٔ کافی برای فعال‌سازی سیستم دفاعی شدید است، غلظت ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بهترین اثر کاهشی را بر مالون‌دی‌آلدئید نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد در این سطح، یک هم‌افزایی (سینرژیک) میان تنش ناشی از علف‌کش (که به‌عنوان محرک اولیه، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش می‌دهد) و اسید سالیسیلیک (که به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ سیستم آنتی‌اکسیدانی عمل می‌کند) وجود دارد. اما در بالاترین سطح علف‌کش (۱ لیتر در هکتار)، شدت تولید گونه‌های فعال اکسیژن به‌حدی است که حتی غلظت بهینهٔ اسید سالیسیلیک (۰/۵ میلی‌مولار) نیز نمی‌تواند به‌طور کامل از افزایش مالون‌دی‌آلدئید جلوگیری کند. به‌عنوان نمونه، در تیمار ۱ لیتر لینورون + ۰/۵ میلی‌مولار، مالون‌دی‌آلدئید برابر ۹/۰۸ میکرومول در گرم است که از تیمار ۰/۷۵ لیتر + ۰/۵ میلی‌مولار (۸/۲۷) بیشتر است. این موضوع نشان‌دهندهٔ وجود آستانهٔ تحملی برای سیستم آنتی‌اکسیدانی است که فراتر از آن، حتی اسید سالیسیلیک نیز نمی‌تواند از تخریب غشاها جلوگیری کند (Noreen *et al*., 2009; Essa *et al*., 2023). در مورد چهارم، کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید در تیمارهای ترکیبی (به‌ویژه ۰/۷۵ و ۱ لیتر لینورون همراه با ۰/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک) با افزایش معنی‌دار عملکرد روغن در همین تیمارها همراه بود. این هم‌بستگی مثبت، نشان‌دهندهٔ اهمیت حفاظت از غشاها در فرایند بیوسنتز روغن است. آنزیم‌های کلیدی مسیر سنتز اسیدهای چرب (مانند استیل‌کوآ کربوکسیلاز و سنتاز اسید چرب) در غشای کلروپلاست و شبکهٔ آندوپلاسمی مستقر هستند و هرگونه آسیب اکسیداتیو به این ساختارها، کارایی آنزیم‌ها را کاهش داده

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

و سنتز روغن را مختل می‌کند. بنابراین، کاهش مالون‌دی‌آلدئید توسط اسید سالیسیلیک، با حفظ یکپارچگی غشاها، زمینه را برای افزایش درصد روغن و در نتیجه، افزایش عملکرد روغن فراهم می‌سازد. همچنین، کاهش مالون‌دی‌آلدئید در مرحلهٔ پر شدن دانه، از ریزش دانه‌های جوان جلوگیری کرده و تعداد دانه در طبق را افزایش می‌دهد. این تفسیر با یافته‌های 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 می‌بخشد. پنجم آن‌که، در تیمار عدم کاربرد لینورون + ۲ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، با وجود بالاترین تعداد دانه در طبق (۱۱۲۰ عدد)، میزان مالون‌دی‌آلدئید برابر ۱۶/۲۲ میکرومول در گرم بود که نسبت به تیمار ۰/۲۵ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار (۱۱/۱۲) و ۰/۵ لیتر لینورون + ۲ میلی‌مولار (۱۲/۷۲) بیشتر است. این افزایش نسبی مالون‌دی‌آلدئید در غلظت بالای اسید سالیسیلیک در غیاب علف‌کش، نشان‌دهندهٔ اثر پرواکسیدانی احتمالی اسید سالیسیلیک در غلظت‌های بالا است. به‌عبارت دیگر، وقتی تنش زمینه‌ای (علف‌کش) وجود ندارد و گیاه در شرایط نسبتاً عادی قرار دارد، اسید سالیسیلیک با غلظت ۲ میلی‌مولار ممکن است با ایجاد اختلال در تعادل ردوکس سلول، به‌عنوان یک عامل تنش‌زای خفیف عمل کرده و باعث افزایش جزیی مالون‌دی‌آلدئید شود. با این حال، همین افزایش ملایم مالون‌دی‌آلدئید ، به‌عنوان یک سیگنال تنش، می‌تواند مسیرهای دفاعی را فعال کرده و در نهایت به افزایش تعداد دانه منجر شود. این یافته نشان می‌دهد که اثر اسید سالیسیلیک بر مالون‌دی‌آلدئید، نه تنها به غلظت، بلکه به سطح تنش زمینه‌ای نیز بستگی دارد و در غیاب تنش، غلظت‌های بالای آن ممکن است اثرات متفاوتی داشته باشند. در مجموع، نتایج این بخش به‌وضوح نشان می‌دهد که اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، با افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید ، نقش مؤثری در حفاظت از غشاهای سلولی در برابر پراکسیداسیون لیپیدهای ناشی از علف‌کش لینورون ایفا می‌کند. این کاهش مالون‌دی‌آلدئید، 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 غلظت‌های بالاتر (۱ و ۲ میلی‌مولار) در برخی شرایط، نه‌تنها سودمند نیستند، بلکه ممکن است خود باعث افزایش استرس اکسیداتیو و پراکسیداسیون لیپیدها شوند. بنابراین، مدیریت دقیق غلظت اسید سالیسیلیک (بهینهٔ ۰/۵ میلی‌مولار) در برنامه‌های زراعی که با کاربرد علف‌کش لینورون همراه است، برای دستیابی به حداکثر حفاظت از غشاها و بهبود عملکرد، ضروری به‌نظر می‌رسد. پژوهش‌های آتی با اندازه‌گیری هم‌زمان میزان H_2O_2، پراکسیداسیون لیپیدهای خاص (مانند کلروپلاستی) و بیان ژن‌های مرتبط با سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، می‌تواند به روشن‌تر شدن مکانیسم‌های مولکولی این برهم‌کنش کمک کند.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

جدول۳: تجزیه واریانس وزن خشک، عملکرد دانه، عملکرد روغن، وزن هزار دانه، تعداد دانه در طبق، کاتالاز و مالون‌دی‌آلدئید در آفتابگردان و وزن خشک علف هرز

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		وزن خشک آفتابگردان	وزن خشک علف هرز	عملکرد دانه	عملکرد روغن	وزن هزار دانه	تعداد دانه در طبق	کاتالاز	مالون‌دی‌آلدئید
بلوک	۲	۶۳۰۸۷۵^{ns}	۲۰۲۰۷^{ns}	۸۶۶۰۱^{ns}	۴۹۰۲^{ns}	۱/۰۷^{ns}	۱۳۸۴^{ns}	۲۴/۴^{ns}	۴/۲^{ns}
علف‌کش 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**
علف‌کش 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

*، ** و ^{ns} به‌ترتیب نشان دهنده‌ی معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

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

سطوح علف‌کش 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^{e}	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}	۵۲/۲^{ab}
۱	۳۹۳۷/۹^{a}	۱۲۶۶۷^{a}	۷۱۳^{a}	۵۵/۷^{a}

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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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

تیمارهای آزمایش		عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار)	تعداد دانه در طبق	آنزیم کاتالاز (میکرومول در دقیقه)	مالون دی آلدئید (میکرومول در گرم)
علف‌کش لینورون (لیتر در هکتار)	اسید سالیسیلیک (میلی‌مولار)					
عدم کاربرد	عدم کاربرد	۱۹۹۲/۹^{i}	۷۲۱/۴^{j}	۵۵۳^{f}	۱۱/۱۴^{l}	۲۷/۷۷ ^{a}
	۰/۵	۲۴۴۷/۹^{hi}	۸۳۲/۴^{ij}	۸۳۶^{de}	۱۲/۶۸^{l}	۲۷/۱۹ ^{a}
	۱	۲۵۰۲/۵^{ghi}	۸۶۲/۴^{hij}	۶۹۵^{ef}	۴۶/۱^{ij}	۱۶/۹۵ ^{cd}
	۲	۳۵۵۲/۹$^{a-e}$	۱۲۹۶/۸^{abcd}	۱۱۲۰/۷^{a}	۵۲/۱۳^{hij}	۱۶/۲۲ ^{cde}
۰/۲۵	عدم کاربرد	۲۷۷۲/۹^{fgh}	۹۲۳/۷^{ghij}	۸۳۴^{de}	۵۶/۹۵^{ghi}	۱۷/۰۸ ^{cd}
	۰/۵	۲۹۹۰$^{e-h}$	۹۸۹/۷^{fghi}	۸۳۷^{de}	۵۴/۹ ^{ghi}	۱۵/۱۵ ^{def}
	۱	۳۲۰۶/۴$^{c-g}$	۱۱۳۰^{cdefg}	۹۸۸/۷^{abcd}	۲۷/۸۴^{k}	۲۳/۰۹ ^{b}
	۲	۳۲۹۲/۹$^{b-f}$	۱۰۹۴/۶^{cdefg}	۹۰۳^{bcde}	۷۹/۲^{cde}	۱۱/۱۲ ^{jkl}
۰/۵	عدم کاربرد	۳۲۵۰$^{e-f}$	۱۰۲۰^{efghi}	۹۳۳/۷^{abcd}	۶۳/۷۴^{fg}	۱۳/۵۶ ^{fghi}
	۰/۵	۳۳۱۵$^{b-f}$	۱۲۵۴/۹^{abcd}	۱۰۳۰/۳^{abcd}	۴۳/۹۲^{j}	۱۸/۲ ^{c}
	۱	۳۰۶۵/۴$^{d-h}$	۱۰۷۴/۵^{defgh}	۸۲۹/۷^{de}	۵۸/۸^{gh}	۱۴/۹۲ ^{defg}
	۲	۳۳۹۰/۴$^{b-f}$	۱۱۵۸/۱^{bcdef}	۱۰۲۹/۷^{abcd}	۷۰/۰۸ ^{ef}	۱۲/۷۲ ^{ghij}
۰/۷۵	عدم کاربرد	۳۸۵۴/۵^{abc}	۱۳۷۳/۲^{ab}	۹۵۶/۷^{abcd}	۸۵/۵۵^{bcd}	۱۰/۲۹ ^{klm}
	۰/۵	۳۹۸۶/۴^{ab}	۱۴۵۰/۱^{a}	۱۰۷۶^{abc}	۱۰۲/۱^{a}	۸/۲۷ ^{m}
	۱	۳۵۵۲/۹$^{a-e}$	۱۲۴۲/۴^{abcde}	۹۶۶/۷^{abcd}	۸۵/۳۹^{bcd}	۱۰/۷۴ ^{jkl}
	۲	۳۵۷۵$^{a-e}$	۱۲۷۶/۳^{abcd}	۱۰۱۰/۳^{abcd}	۶۵/۲۸^{fg}	۱۴/۱۵ ^{efgh}
۱	عدم کاربرد	۳۹۹۷/۵^{ab}	۱۴۴۷/۳^{a}	۱۰۱۳/۳^{abcd}	۷۶/۷^{de}	۱۱/۴۶ ^{Ijk}
	۰/۵	۴۱۷۰/۴^{a}	۱۴۵۹/۲^{a}	۱۰۹۱/۷^{ab}	۹۵/۴۵^{ab}	۹/۰۸ ^{lm}
	۱	۳۷۲۶/۴$^{a-d}$	۱۳۱۸^{abc}	۸۶۱^{cde}	۸۹/۷۲^{bc}	۱۱/۷۶ ^{ijk}
	۲	۳۸۵۶/۴^{abc}	۱۴۳۳/۹^{a}	۱۰۴۲^{abcd}	۷۲/۰۶^{ef}	۱۲/۲۷ ^{hijk}

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

نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که کاربرد علف‌کش لینوران (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 علف‌کش 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 لینوران 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، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت ۰/۵

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

میلی‌مولار سه روز قبل از کاربرد علف‌کش لینوران (در محدوده ۰/۷۵ تا ۱ لیتر در هکتار و در مرحله رشدی ۸-۱۰ برگی معادل (BBCH 14-18) به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مؤثر، کم‌خطر و سازگار با محیط زیست برای افزایش عملکرد کمی و کیفی آفتابگردان از طریق فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی و تعدیل تنش اکسیداتیو ناشی از علف‌کش 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.

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/fols.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 Stoichhiometry 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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 Timişoara, 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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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

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

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]

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. Saki[1], A. Abdali Mashhadi[2], E. Elahi Fard[3] 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.

[Downloaded from cpj.ahvaz.iau.ir on 2026-11-13]