



Original Article

Evaluation of the Efficacy of some Premixed Herbicides for Controlling Wild Mustard (*Sinapis arvensis*) Using Chlorophyll *a* Fluorescence in the Presence and Absence of Salicylic Acid

Seyedeh Asieh Khatami¹, Mohammad Taghi Alebrahim^{*2}, Elham Samadi Kalkhoran³

¹ Guest Researcher in department of plant production and genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

² Professor in department of plant production and genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

³ Assistant Professor of Plant Protection Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Hamedan, Iran.

Article Info

Received:

February 16 2025

Accepted:

May 13 2025

First published online:

June 22, 2025

Corresponding Author:

Mohammad Taghi
Alebrahim

Email:

m.t.alebrahim@gmail.com

Key words: Hormone,
Minimum fluorescence,
Maximum fluorescence,
Photosynthesis.

Abstract

Chlorophyll *a* fluorescence is a reliable physiological indicator for determining changes induced in the photosynthetic system and can be altered by various factors that are indirectly involved in photosynthesis. Two greenhouse experiments were conducted to study the effect of salicylic acid (SA) in combination with premixed herbicides including iodosulfuron-methyl + mesosulfuron-methyl sodium + diflufenican (Othello) and pinoxaden + florasolam (Axial One) on chlorophyll *a* fluorescence parameters of wild mustard (*Sinapis arvensis*). The results showed that application of both herbicides decreased the maximum fluorescence (F_m) and the maximum photochemical efficiency of photosystem II (F_v/F_m), while increasing the minimum fluorescence (F_o). Application of Othello at a rate of 528 g a.i. ha⁻¹ resulted in a 30.78% reduction in the F_v/F_m ratio, whereas application of Axial One at 300 g a.i. ha⁻¹ caused a 72.30% reduction, compared to the untreated control (without herbicide and salicylic acid), seven days after herbicide application. Correlation analysis revealed significant relationships between chlorophyll *a* fluorescence parameters (F_m and F_v/F_m) and weed dry weight under different herbicide treatments. In contrast, minimum fluorescence (F_o) showed a negative correlation with dry weight, with the strongest negative relationship observed under the Axial One treatment. Overall, all herbicide treatments significantly reduced the dry weight of wild mustard, while the application of salicylic acid had no detectable effect on herbicide efficacy.

Cite this article: Khatami, S.A., Alebrahim, M.T. & Samadi Kalkhoran, E. (2025). Evaluation of the efficacy of some premixed herbicides for controlling wild mustard (*Sinapis arvensis*) using chlorophyll *a* fluorescence in the presence and absence of salicylic acid. Iran. J. of Weed Sci. 21(1): 184-201. https://ijws.areeo.ac.ir/article_135817.html





مقاله پژوهشی

ارزیابی کارایی برخی علف‌کش‌های پیش‌آمیخته در کنترل خردل وحشی (*Sinapis arvensis*) با استفاده از فلورسانس کلروفیل *a* در حضور و عدم حضور سالیسیلیک اسید

سیده آسیه خاتمی^۱، محمدتقی آل‌ابراهیم^{۲*}، الهام صمدی کلخوران^۳

^۱ پژوهشگر مدعو گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۲ استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۳ استادیار پژوهشی بخش تحقیقات گیاه پزشکی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.

چکیده

فلورسانس کلروفیل *a* یک شاخص فیزیولوژیکی معتبر است که تغییرات القا شده در سیستم فتوسنتزی را نشان می‌دهد و می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی قرار گیرد که به صورت غیرمستقیم فرآیند فتوسنتز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. دو آزمایش گلخانه‌ای، به منظور مطالعه اثر ترکیب سالیسیلیک اسید با علف‌کش‌های پیش‌آمیخته یدوسولفوروئیل متیل + مزوسولفوروئیل متیل + دیفلوفنیکان (اتللو) و پینوکسادن + فلوراسولام (آکسیالوان) بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل *a* خردل وحشی انجام شد. نتایج آزمایش نشان دادند در نتیجه کاربرد هر دو علف‌کش، فلورسانس حداکثر (F_m) و حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) کاهش و فلورسانس حداقل (F_0) افزایش یافت. به طوری که در ۵۲۸ و ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار از اتللو و آکسیالوان بدون سالیسیلیک اسید به ترتیب باعث کاهش ۳۰/۷۸ و ۷۷/۳۰ درصدی میزان F_v/F_m نسبت به تیمار بدون علف‌کش و سالیسیلیک اسید، در هفت روز بعد از کاربرد علف‌کش شدند. همچنین یافته‌ها نشان دادند که در تیمار علف‌کش اتللو، ارتباط مثبت و معنی‌داری بین فلورسانس حداکثر، حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و وزن خشک علف‌هرز مشاهده شد، در حالی که فلورسانس حداقل همبستگی منفی با وزن خشک داشت که به کاهش کارایی فتوسنتزی اشاره دارد. در تیمار علف‌کش آکسیالوان، بیشترین همبستگی منفی بین فلورسانس حداقل و وزن خشک مشاهده گردید. با توجه به نتایج به دست آمده تمام تیمارهای علف‌کشی باعث کاهش وزن خشک خردل وحشی شدند و کاربرد سالیسیلیک اسید تأثیری بر کارایی علف‌کش‌های آزمایش شده نداشت.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۲/۲۳

تاریخ انتشار برخط:

۱۴۰۴/۰۴/۰۱

نویسنده مسئول:

محمدتقی آل‌ابراهیم

ایمیل:

m.t.alebrahim@gmail.com

واژه‌های کلیدی: فلورسانس

حداقل، فلورسانس حداکثر، فتوسنتز،

هورمون.

استناد: آل‌ابراهیم، م. ت.، خاتمی، س. آ.، صمدی کلخوران، ا. (۱۴۰۴). ارزیابی کارایی برخی علف‌کش‌های پیش‌آمیخته در کنترل خردل وحشی (*Sinapis arvensis*) با استفاده از فلورسانس کلروفیل *a* در حضور و عدم حضور سالیسیلیک اسید. دانش علف‌های هرز ایران، ۲۱(۱): ۱۸۴-۲۰۱.

https://ijws.areeo.ac.ir/article_135817.html



مقدمه

گیاهان زراعی به‌طور مداوم تحت فشار رقابتی ناشی از علف‌های هرز قرار دارند (Nosratti *et al.*, 2020). علف‌های هرز یکی از مهمترین عوامل محدود کننده تولید در گیاهان زراعی هستند که باعث خسارت زیادی به محصول می‌گردند (Zimdahl, 2004). به نحوی که میزان خسارت ناشی از آنها در ایران به‌طور متوسط ۲۵ تا ۳۰ درصد برآورد شده‌است (Nosratti *et al.*, 2020). این گیاهان علاوه بر رقابت با گیاهان زراعی و باغی در دریافت مواد غذایی، آب و نور (Maclaren *et al.*, 2020) میزبان بسیاری از عوامل بیماری‌زا و آفات نیز می‌باشند (Mousavi *et al.*, 2010). رویکردهای مختلف از جمله فیزیکی، مکانیکی، بیولوژیکی و شیمیایی برای کنترل علف‌های هرز وجود دارد (Quan *et al.*, 2023).

در میان روش‌های کنترل علف‌های هرز، کنترل شیمیایی یکی از ساده‌ترین و موفق‌ترین شیوه‌های مدیریت می‌باشد. مدیریت صحیح علف‌های هرز توسط علف‌کش‌ها باعث سرکوب مؤثر جوانه‌زنی و رشد علف‌های هرز شده و در نتیجه افزایش عملکرد گیاهان زراعی را به دنبال دارد (Alebraim *et al.*, 2012; Khatami *et al.*, 2017a; Khatami *et al.*, 2017b). علف‌کش‌ها مواد شیمیایی هستند که برای کاهش رشد و نمو گیاهان به کار می‌روند و به طور فزاینده‌ای برای مدیریت علف‌های هرز در کشاورزی استفاده می‌شوند (Dickeduisberg *et al.*, 2012). سرعت عمل علف‌کش روی گونه‌های هدف و همچنین گونه‌های غیرهدف می‌تواند از یک

واکنش بسیار آهسته تا یک واکنش بسیار سریع پس از کاربرد متفاوت باشد (Mehdizadeh *et al.*, 2021). گونه‌های غیرهدف معمولاً از ظرفیت بالاتری برای متابولیسم سریع علف‌کش‌ها برخوردارند. در نتیجه، علف‌کش‌ها در این گونه‌ها دارای نیمه‌عمر نسبتاً کوتاهی هستند. در مقابل، فرآیند تجزیه و غیرفعال‌سازی علف‌کش در علف‌های هرز هدف با سرعت کمتری انجام می‌شود، به گونه‌ای که نیمه‌عمر این ترکیبات در بافت‌های گیاه هدف معمولاً حدود ۴ تا ۶ ساعت گزارش شده‌است (Brown *et al.*, 1993).

علف‌کش آکسیالوان (پینوکسادن، ۴۵ گرم در لیتر + فلوراسولام، ۵ گرم در لیتر) علف‌کشی دو منظوره انتخابی در گندم (*Triticum aestivum* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) می‌باشد که توسط شرکت سینجنتا معرفی شده است. علف‌کش پینوکسادن (آکسیال) متعلق به گروه فنیل پیرازولین-ها و بازدارنده استیل کوآنزیم آ کربوکسیلاز (ACCase) است که جهت کنترل علف‌های هرز باریک برگ از دم روباهی (*Alopecurus myosuroides*)، چچم (*Lolium temulentum*)، خونی‌واش (*Phalaris minor*) و ارزن وحشی (*Setaria viridis*) در مزارع گندم و جو ثبت شده است (Zand *et al.*, 2019). علف‌کش فلوراسولام از خانواده تریازولوپیریمیدین سولفانامید و بازدارنده استولاکتات سینتاز (ALS) است (Zand *et al.*, 2019). این علف‌کش با خاصیت انتخابی جهت کنترل علف‌های هرز پهن‌برگ در غلات از جمله گندم، جو، یولاف (*Avena sativa*)، چاودار

جذب شده به صورت فلورسانس منتشر یا به صورت گرما آزاد می‌گردد (Hassannejad *et al.*, 2020). انتشار فلورسانس زمانی بارزتر می‌گردد که به دلیل عوامل تنش‌زا انتقال الکترون در زنجیره‌ی انتقال الکترون سیستم فتوستتزی به‌طور کامل یا جزئی مسدود گردد. که این افزایش شدت فلورسانس می‌تواند به عنوان شاخصی از کاهش فعالیت فتوستتزی در گیاهان باشد (Hassannejad *et al.*, 2020; Rastogi *et al.*, 2020; Samadi Kalkhoran & Alebrahim, 2024). به‌طوری‌که تغییرات ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی، تعادل بین سرعت جذب نور و سرعت استفاده از انرژی را در فرآیند انتقال الکترون مختل می‌کند (Goltsev *et al.*, 2016; Hassannejad *et al.*, 2020; Swoczyna *et al.*, 2022). علاوه بر این، کلروفیل فلورسانس قادر است اثرات علف‌کش‌های بازدارنده *PSII* و حتی علف‌کش‌های با نحوه عمل متفاوت بر فرآیندهای فتوستتزی گیاهان را ارزیابی نماید (Khalid *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2019).

هورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی با القای بیان ژن‌های مرتبط با تنش، فعال‌سازی آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و تجمع ترکیبات محافظ، نقش مهمی در افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های اکسیداتیو دارند. این ترکیبات می‌توانند پاسخ گیاه به تنش‌های ناشی از عوامل محیطی یا علف‌کش‌ها را بهبود بخشند. سالیسیلیک اسید نیز به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان، در تحریک سیستم دفاعی گیاه و افزایش تحمل به تنش‌های زنده و غیرزنده مؤثر است (Tran *et al.*, 2007; Horváth *et al.*, 2007). مطالعات نشان داده‌اند که سالیسیلیک

(*Secale cereale*) و تریتیکاله (*Triticosecale*) (wittmack) معرفی شده است (Mehmeti *et al.*, 2018). نتایج پژوهش‌های انجام‌شده درباره کارایی علف‌کش آکسیالوان نشان می‌دهد که علف‌های هرز آپرا (*Apera spica-venti* L.)، بی‌تی‌راخ (*Gallium aparine* L.)، فراموشم نکن (*Myosotis arvensis* L.)، کیسه کشیش (*Capsella bursa-pastoris* L.)، گندمک (*Stellaria media* L.)، شقایق (*Papaver rhoeas* L.) را تقریباً ۸۶ تا ۱۰۰ درصد کنترل کرده‌است (Idziak *et al.*, 2012)؛ همچنین آکسیالوان توانست یولاف بهاره (*Avena fatua* L.) را در مزرعه گندم تا ۹۵ درصد کنترل کند (Manea *et al.*, 2016). علف‌کش دو منظوره یدوسولفورون متیل سدیم + مزوسولفورون متیل + دیفلوفنیکان + ایمن‌کننده مفن پیر دی اتیل (اتللو) از گروه سولفونیل‌اوره به‌منظور کنترل علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ در مزارع گندم استفاده می‌شود. نحوه اثر مزوسولفورون و یدوسولفورون متیل، اختلال در عمل آنزیم استولاکتات سینتاز می‌باشد. علف‌کش دیکلوفنیکان، مانع از عمل آنزیم فیتئون دسچوراز (PDS) می‌شود که آنزیم اصلی در بیوسنتز رنگدانه‌های فرعی کاروتنوئیدهاست (Ghassam *et al.*, 2018).

مکانیسم فتوستتز به شدت تحت تأثیر تنش‌های غیرزیستی مختلف (Dey *et al.*, 2022) از طریق تأثیر بر واکنش‌های شیمیایی فتوسیستم I (PSI) و فتوسیستم II (PSII) و بیوسنتز کلروفیل قرار می‌گیرد (Sharma *et al.*, 2020; Dey *et al.*, 2022). در این صورت طی فرآیند فتوستتز، قسمتی از انرژی که

اسید می‌تواند تحمل گیاهان به تنش ناشی از علف‌کش پاراکوات را افزایش دهد. در گیاهچه‌های ذرت، پیش‌تیمار با اسید سالیسیلیک موجب حفظ محتوای کلروفیل و بهبود عملکرد فتوسنتزی پس از مصرف پاراکوات شد (Shahrtash et al., 2011)؛ همچنین، در گیاهچه‌های جو، استفاده از سالیسیلیک اسید پس از کاربرد علف‌کش پاراکوات، خسارت ناشی از گیاه‌سوزی را کاهش داده و مانع کاهش کلروفیل شد (Ananieva et al., 2002). به‌طور کلی، سالیسیلیک اسید بدون حضور علف‌کش تأثیری منفی بر گیاه نداشته و سبب شادابی گیاهچه‌ها شد. پژوهش رادوان و سلطان (Radwan & Soltan, 2012) نشان داد که کاربرد سالیسیلیک اسید قبل از استفاده از علف‌کش کلتودیم باعث بهبود محتوای کلروفیل شد.

با توجه به اهمیت کنترل مؤثر علف‌های هرز در سیستم‌های زراعی و همچنین نقش تعدیل‌کننده

سالیسیلیک اسید در کاهش تنش ناشی از علف-کش‌ها در گیاهان زراعی، هدف از این تحقیق بررسی تأثیر علف‌کش‌های اتللو و آکسیالوان، به‌صورت منفرد و همراه با سالیسیلیک اسید، بر کنترل خردل وحشی و همچنین پاسخ‌های فیزیولوژیک آن، به‌ویژه تغییرات فلورسانس کلروفیل *a* به‌عنوان شاخصی از فعالیت فتوسنتزی، بود.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تغییرات فلورسانس کلروفیل ناشی از کاربرد علف‌کش‌های یدوسولفورون متیل + مزوسولفورون متیل + دیفلوفنیکان و پینوکسادن + فلوراسولام (جدول ۱) به تنهایی و در ترکیب با سالیسیلیک اسید^۱ در خردل وحشی (*Sinapis arvensis*)، آزمایش‌هایی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به‌صورت جداگانه در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی به ترتیب در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ اجرا گردید.

جدول ۱. مشخصات و مقدار مصرف علف‌کش‌های به کار برده شده در آزمایش

Table 1. Characteristics and recommended doses of the herbicides used in the experiment.

Common name	Trade name	Formulation	Recommended dose (g a.i. ha ⁻¹)
Iodosulfuron methyl sodium+ mesosulfuron methyl + diflufenican + safener	Otello	OD 6%	132
Pinoxaden + florasulam	Axial one	EC 5%	75

فاکتورهای آزمایش شامل مقادیر مختلف علف‌کش‌های اتللو (صفر، ۳۳، ۶۶، ۱۳۲، ۲۶۴ و ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار) و آکسیالوان (صفر، ۱۸/۷۵، ۳۷/۵، ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار) و سالیسیلیک اسید (صفر و یک میلی‌مولار)

بودند. بذر خردل وحشی از مرکز تحقیقات کشاورزی مغان تهیه شده بود. به منظور شکست خواب، بذور خردل وحشی در جیبرلیک اسید ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. سپس بذور جهت پیش‌جوانه‌زنی در دستگاه

^۱ Salicylic acid (SA)

علف‌کش و با حجم مصرفی معادل ۳۰۰ لیتر در هکتار، با استفاده از سمپاش پشته‌ای اعمال گردید (Radwan & Soltan, 2012).

برای اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل با استفاده از دستگاه فلوریمتر^۱، برگ‌های توسعه یافته-ی بالای بوته در هر تکرار و تیمار به فاصله‌های یک، سه، پنج و هفت روز پس از سمپاشی انتخاب شدند (Yaghoubian *et al.*, 2016). برگ‌های منتخب برای مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی با استفاده از کلیپس‌های ویژه قرار گرفتند، تا تمامی مراکز واکنش فتوسنتز فعال شوند و برای انتقال الکترون آماده گردند. پس از آن، یک پالس نوری با طول موج ۶۵۰ نانومتر و شدت ۳۰۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه و به مدت چهار ثانیه به برگ‌ها تابانده شد و شاخص‌های فلورسانس حداقل (F_0)، فلورسانس حداکثر (F_m)، حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) اندازه‌گیری شدند (Kheirizadeh Arough *et al.*, 2016). فلورسانس متغیر (F_v) از اختلاف بین فلورسانس حداکثر (F_m) و حداقل (F_0) محاسبه شد ($F_v = F_m - F_0$) و حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) از رابطه $(F_m - F_0) / F_m$ به دست آمد. سه هفته پس از تیمار علف‌کش‌ها، از هر تکرار دو بوته برداشت و متوسط وزن تر آنها اندازه‌گیری، سپس به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده و متوسط وزن خشک آنها اندازه‌گیری گردید.

فرض نرمال بودن داده‌های خام با آزمون

ژرمیناتور با شرایط دمایی 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد و شرایط فتوپریود ۱۶/۸ ساعت روشنایی/تاریکی با شدت نور ۱۸۰۰۰ لوکس به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند (Anderson, 1997). گلدان‌های پلاستیکی به قطر دهانه ۱۵ و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر با نسبت مساوی از خاک، خاکبرگ و ماسه بادی پر و بذور در عمق نیم سانتیمتر کشت شدند. خاک استفاده شده برای پر کردن گلدان‌ها از چند نقطه یک مزرعه زراعی در اطراف شهر اردبیل (عدم کاربرد آفت‌کش‌ها و کشت و کار در مزرعه مذکور به مدت چند سال) به طور تصادفی برداشت و ترکیب شدند. گلخانه در شرایط ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی با دمای روزانه تقریباً ۲۷ و دمای شبانه ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار داشت (Van Rensen & Vredenberg, 2009).

پس از سبز شدن بذور علف‌هرز، سه بوته در هر گلدان نگهداری و بقیه تنک شدند. تیمارهای آزمایشی در مرحله سه تا چهار برگی گیاهچه‌ها، انجام شدند. میزان مصرف علف‌کش‌ها براساس سطح هر گلدان محاسبه و محلول سم با حجم مصرفی معادل ۳۰۰ لیتر در هکتار تهیه شد. حجم محلول مورد نیاز برای هر گلدان با توجه به سطح آن تنظیم گردید. عملیات سمپاشی در ساعات غروب با استفاده از سمپاش پشته‌ای مجهز به نازل بادبزی (تی-جت) و با فشار کاری ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. تیمار سالیسیلیک اسید با غلظت یک میلی‌مولار به صورت محلول‌پاشی برگ‌ی سه روز پیش از اعمال علف‌کش انجام شد. محلول تهیه‌شده مشابه تیمار

^۱ Fluorometer; Optic Science-OS-30p USA

شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) و همگنی واریانس‌ها با آزمون لون (Levene) در نرم‌افزار SPSS بررسی شد. پس از اطمینان از برقراری فروض (یا اعمال تبدیل داده)، تجزیه واریانس با استفاده از رویه GLM در نرم‌افزار SAS (Version 9.1) انجام گرفت و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت پذیرفت. داده‌های صفات مختلف مورد بررسی با مدل‌های رگرسیونی غیرخطی (نظیر مدل لجستیک سه یا چهار پارامتری)، برازش داده شدند؛ اما به علت خطای استاندارد بالای پارامترها و همچنین معنی‌دار نشدن آن‌ها، انجام نشد. سپس به منظور بررسی صحت مدل، نرمال بودن باقیمانده‌ها دوباره با آزمون شاپیرو-ویلک تأیید گردید. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار 2013 EXCEL استفاده شد.

نتایج و بحث

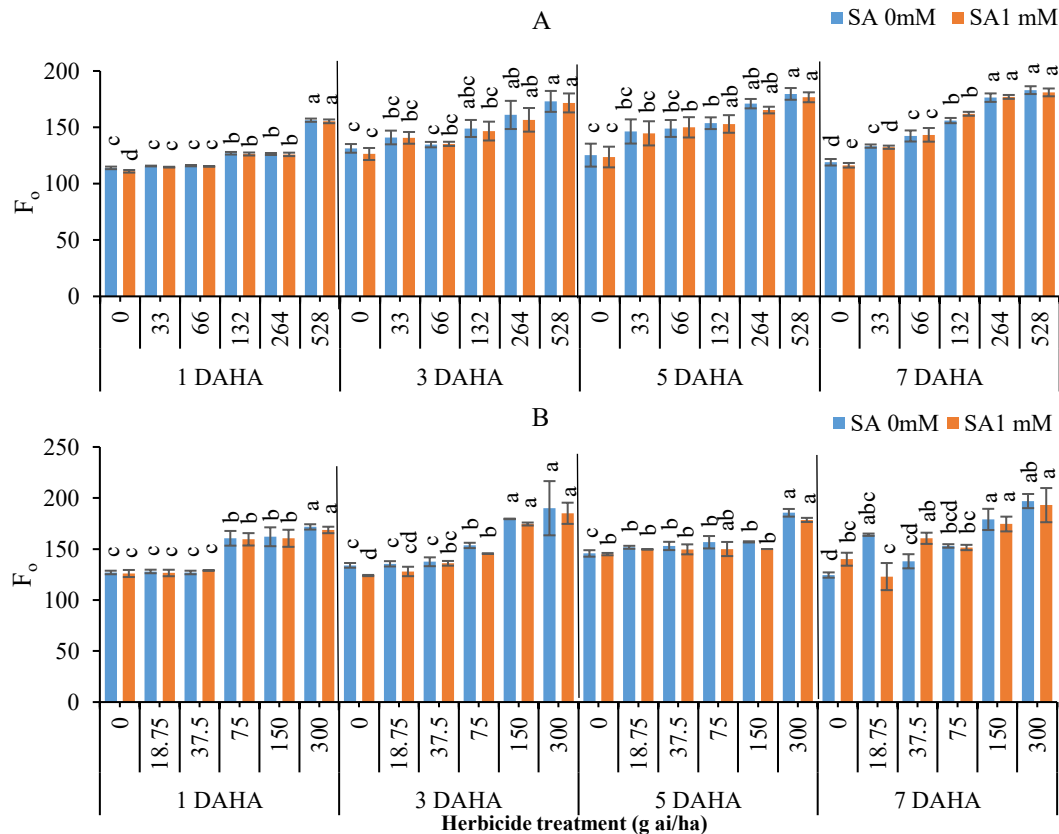
فلورسانس حداقل (F_0)

با توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۱A)، میزان F_0 در دزهای مختلف علف‌کش اتللو صرف‌نظر از کاربرد سالیسیلیک اسید تفاوت معنی‌داری با تیمار عدم کاربرد علف‌کش داشت. بیشترین تفاوت برای دزهای ۲۶۴ و ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار به ثبت رسید. بیشترین میزان F_0 (۱۸۳) با افزایش ۳۴/۹۷ درصدی نسبت به تیمار عدم کاربرد علف‌کش و سالیسیلیک اسید) هفت روز بعد از کاربرد علف‌کش در تیمار ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار و کمترین مقدار (۱۱۱) در تیمار عدم کاربرد علف‌کش با یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید)، یک روز بعد از تیمار علف‌کش بود. در نتیجه کاربرد علف‌کش آکسیال-وان، الگوی تغییرات فلورسانس حداقل (شکل ۱B)

در تیمارهای بدون سالیسیلیک اسید، نشان دهنده سیر صعودی در دزهای مختلف علف‌کش در طول زمان بود. بیشترین اختلاف معنی‌دار برای دزهای ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار بود. بالاترین سطح F_0 (۱۹۷) با افزایش ۳۶/۸۰ درصدی نسبت به تیمار بدون علف‌کش و سالیسیلیک اسید) در هفتمین روز بعد از کاربرد علف‌کش در دز ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار و پایین‌ترین سطح (۱۲۴) در تیمار بدون علف‌کش و سالیسیلیک اسید، در هفتمین روز بعد از کاربرد علف‌کش بود. بالابانوآ و همکاران (Balabanova et al., 2016) در پی کاربرد علف‌کش ایمازاماکس بازدارنده (ALS) در آفتابگردان، شاهد افزایش F_0 ، هدررفت گرمایی در گیرنده‌های فتوسیستم II (F_0/F_m)، هدررفت انرژی در مرکز واکنش فتوسیستم II، کاهش حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و شاخص عملکرد فتوستنتزی شدند. این محققین، علت این تغییرات را در ناتوانی رنگدانه‌های فتوستنتزی در استفاده از انرژی نورانی دریافتی برای انتقال الکترون به جفت کلروفیل a واقع در مرکز واکنش گزارش نمودند. هنگامی که نور در سطح متوسط باشد، بخش غالب آن در فعالیت‌های فتوشیمیایی به مصرف فتوستنتز می‌رسد و بخش کمی از انرژی نورانی به صورت فلورسانس ساطع می‌گردد که به عنوان فلورسانس حداقل (F_0) شناخته می‌شود (Roháček et al., 2008). در حقیقت مقدار F_0 هر چه کمتر باشد، نشان‌دهنده فعالیت فتوستنتزی مطلوب‌تر و آغاز انتقال الکترون و تثبیت سریعتر کربن است و مقدار F_0 بالاتر نشان از آسیب به زنجیره انتقال الکترون در اثر

نشان داد که با افزایش دز علف‌کش لوماکس میزان فلورسانس حداقل افزایش نشان داد (Hasannejad & Porheidar Ghafarbi, 2019).

کاهش ظرفیت کوینون آ^۱ (QA) و عدم اکسیداسیون کامل آن به علت جریان کندتر الکترون است (Quan et al., 2023). نتایج تحقیقی روی گیاه توق



شکل ۱. پاسخ فلورسانس حداقل (Fo) خردل وحشی به دزهای علف‌کش‌های اتللو (A)، آکسیالوان (B) و سالیسیلیک اسید در ۱، ۳، ۵، ۷ روز پس از کاربرد علف‌کش‌ها. بارها نشان دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 1. Response of *Sinapis arvensis* L. minimal fluorescence (Fo) to Othello (A), Axial one (B) doses, and Salicylic Acid at 1, 3, 5 and 7 days after herbicide application. Bars represent standard error.

فلورسانس حداکثر (Fm)

علف‌کش بود که نسبت به تیمار شاهد ۸۳/۶۹ درصد کاهش نشان داد (شکل ۲A). با توجه به نتایج مقایسه میانگین سالیسیلیک اسید نتوانست بر تأثیر علف‌کش بر شاخص فلورسانس حداکثر تأثیرگذار باشد. از سومین روز پس از کاربرد علف‌کش آکسیالوان، میزان فلورسانس حداکثر تفاوت معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نشان داد. بیشترین مقدار Fm (۷۷۵) در تیمار عدم کاربرد علف‌کش همراه با سالیسیلیک اسید و در پنجمین روز پس از تیمار مشاهده شد.

از روز اول پس از تیمار، بوته‌های خردل وحشی تحت کاربرد علف‌کش اتللو کاهش معنی‌داری در مقدار Fm نسبت به تیمار شاهد نشان دادند. بیشترین مقدار Fm (۷۷۰) در تیمار عدم کاربرد علف‌کش همراه با سالیسیلیک اسید و در سه روز پس از کاربرد مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقدار Fm (۲۰۷) مربوط به تیمار ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار بدون سالیسیلیک اسید و در هفت روز پس از کاربرد

^۱ Quinone A

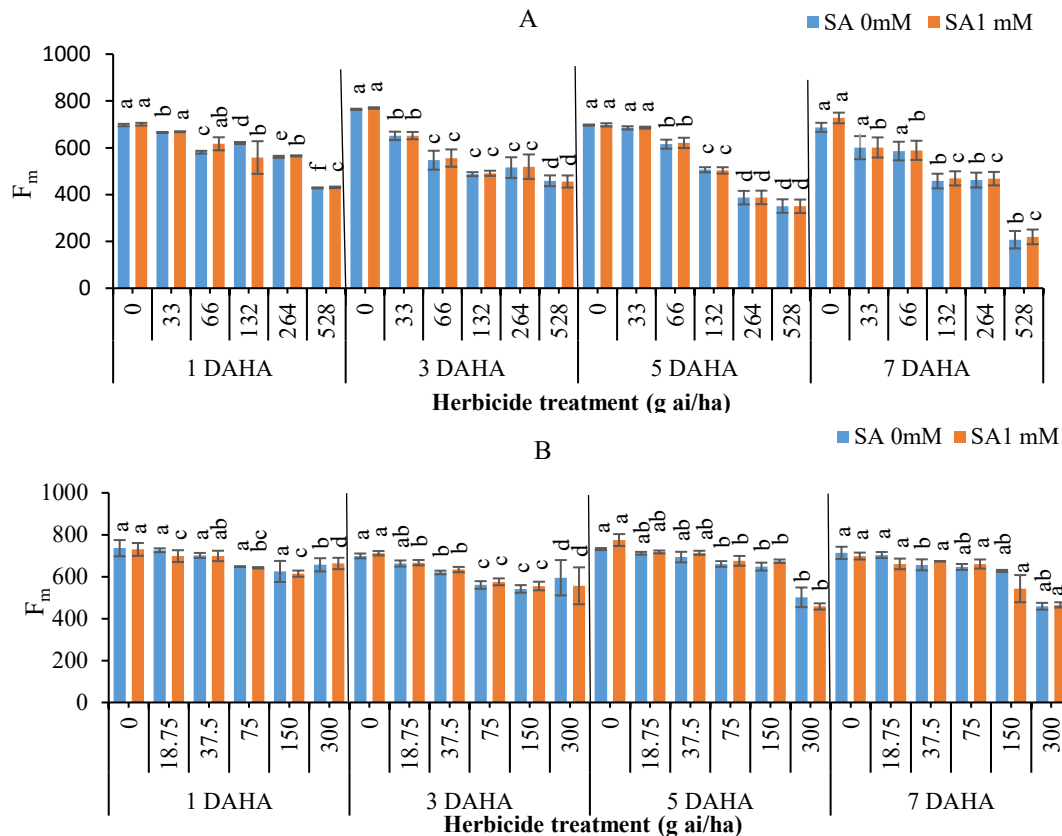
نتایج آزمایشی در گیاه توق و یولاف وحشی نشان داد که با افزایش دز لوماکس و آتلاتیس فلورسانس حداکثر کاهش یافت (Hasannejad & Porheidar, 2019; Ghafarbi, 2019; Khatami et al., 2023).

حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m)

در تیمار علف کش اتللو، بیشترین مقدار F_v/F_m (۰/۸۴۱) در تیمار عدم کاربرد علف کش همراه با سالیسیلیک اسید یک میلی‌مولار و در یک روز پس از تیمار مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقدار این شاخص (۰/۲۲۹) مربوط به دز ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار و در هفت روز پس از کاربرد بود که نسبت به تیمار شاهد ۷۲/۳۰ درصد کاهش نشان داد (شکل ۳A). براساس نتایج مقایسه میانگین، کاربرد سالیسیلیک اسید نتوانست اثر معنی‌داری در کاهش تنش ناشی از اتللو بر شاخص F_v/F_m ایجاد کند. در تیمار آکسیالوان نیز روند مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار F_v/F_m (۰/۸۲۶) در تیمار بدون کاربرد علف کش و سالیسیلیک اسید و در یک روز پس از کاربرد ثبت گردید. کمترین مقدار (۰/۵۷۱) در دز ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار و در هفت روز پس از کاربرد مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد ۳۰/۷۸ درصد کاهش داشت (شکل ۳B).

مقابل، کمترین مقدار F_m (۴۵۹) مربوط به تیمار ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار بدون سالیسیلیک اسید و در هفتمین روز پس از کاربرد بود که نسبت به تیمار شاهد ۶۶/۳۵ درصد کاهش نشان داد (شکل ۲B). فلورسانس کلروفیل شاخصی از وضعیت عملکردی فتوسیستم II و سلامت غشای تیلاکوئید محسوب می‌شود و بیانگر کارایی انتقال الکترون در زنجیره نوری است (Bilger & Bjorkman, 1994).

مقدار فلورسانس حداکثر (F_m) زمانی اندازه‌گیری می‌شود که تمامی مراکز واکنش فتوسیستم II در اثر یک پالس نوری اشباع‌کننده به‌طور کامل بسته شده و گیرنده‌های اولیه الکترون (کویون‌ها) در حالت احیا قرار گرفته باشند. در این وضعیت، ظرفیت فتوشیمیایی به حداقل رسیده و انرژی جذب‌شده عمدتاً به صورت نشر فلورسانس آزاد می‌شود. در شرایط تنش، اختلال در تثبیت کربن و کاهش ظرفیت مصرف الکترون موجب تجمع سریع‌تر الکترون‌ها در زنجیره انتقال و تسریع بسته شدن مراکز واکنش می‌شود؛ در نتیجه سیستم سریع‌تر به سطح F_m می‌رسد. با این حال، آسیب ساختاری یا عملکردی به PSII می‌تواند مقدار مطلق F_m و در نهایت فلورسانس متغیر (F_v) را کاهش دهد (Falqueto et al., 2017). F_m در اثر تابش فوتون‌های نوری و احیای همه ناقل‌های الکترون و بسته بودن (اشباع) همه مراکز واکنشی ایجاد می‌شود.



شکل ۲. پاسخ فلورسانس حداکثر (F_m) خردل وحشی به دزهای علف‌کش‌های اتللو (A)، آکسیال وان (B) و سالیسیلیک اسید در ۱، ۳، ۵، ۷ روز پس از کاربرد علف‌کش‌ها. بارها نشان دهنده‌ی خطای استاندارد هستند.

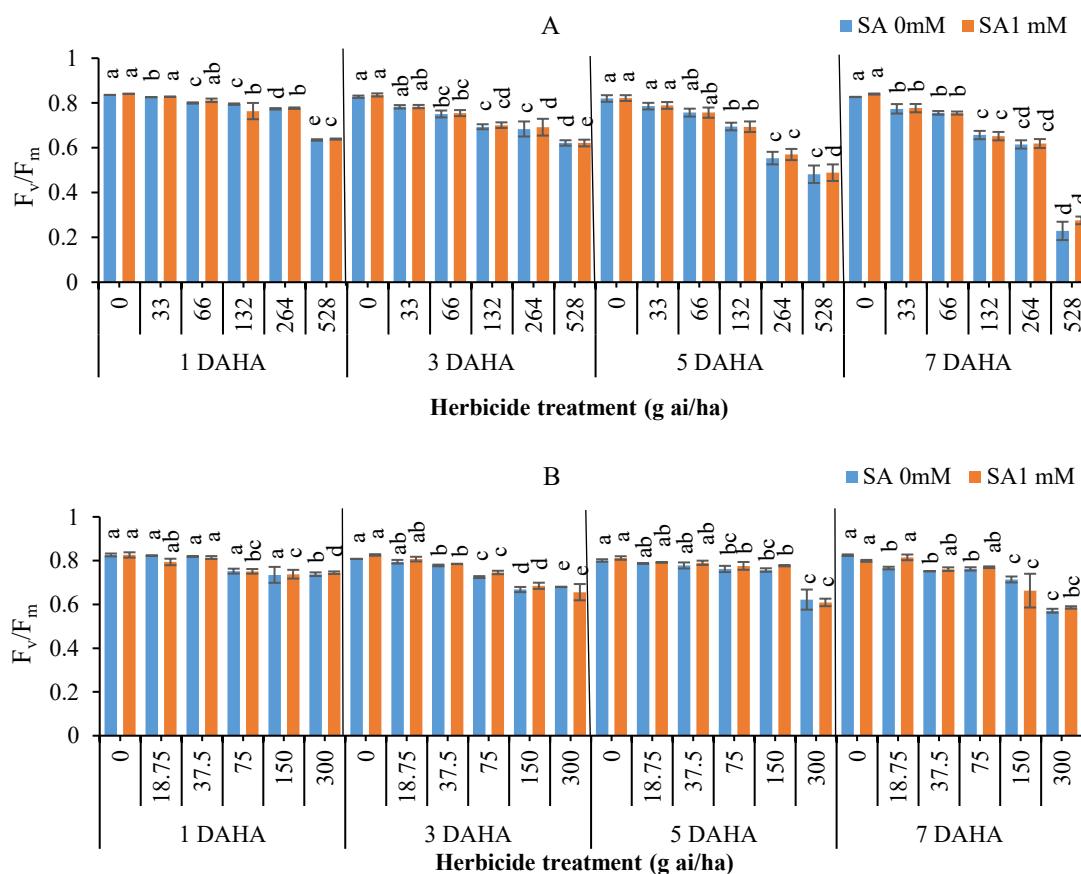
Figure 2. Response of *Sinapis arvensis* L. maximal fluorescence (F_m) to Othello (A), Axial One (B) doses, and Salicylic Acid at 1, 3, 5, and 7 days after herbicide application. Bars represent standard error.

(Maxwell & Johnson, 2000). حمامی و همکاران (Hammami et al., 2014) در بررسی اثر علف‌کش ستوکسیدیم (از بازدارنده‌های ACCase روی یولاف وحشی (*Avena ludoviciana*) Durieu)، شاهد کاهش حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) بودند. این محققین، استفاده از پارامترهای فلورسانس کلروفیل a نسبت به برخی صفات مورفولوژیک را مناسب گزارش کردند و دریافتند که با ارزیابی پارامترهای فلورسانس، می‌توان پیش از ظهور اثرات ظاهری، تأثیر یا عدم تأثیر علف‌کش را تشخیص داد. نسبت فلورسانس متغیر (F_v) به فلورسانس حداکثر (F_m) یعنی F_v/F_m

تنش‌های محیطی موجب افزایش فلورسانس حداکثر و کاهش حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) می‌شوند که نشان‌دهنده گسستگی رنگدانه‌های برداشت نور از فتوسیستم I می‌باشد و عملکرد کوانتومی فتوسیستم II را کاهش می‌دهد. شاخص F_v/F_m نشان‌دهنده حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II در شرایطی است که تمام مراکز واکنش فتوسیستم II باز باشند. توضیح اینکه در بسیاری از گونه‌های گیاهی زمانی که F_v/F_m در حد ۰/۸۳ و بیشتر شود، بدین مفهوم است که تنش بر گیاه وارد نشده است و لذا مقادیر کمتر از این مقدار، حاکی از وجود تنش در گیاهان است

برانگیخته شده با انرژی نورانی تلف می‌شود. کاهش نسبت F_v/F_m اغلب برای تشخیص بازدارندگی نوری در پاسخ به تنش‌های مختلف به کار می‌رود (Zivcak *et al.*, 2014; Brestič *et al.*, 2015). برخی محققین، پارامتر حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) را شاخص قوی‌تری جهت ارزیابی اثرات علف‌کش در مدت زمان کوتاهی بعد از سمپاشی دانسته‌اند (Hammami *et al.*, 2014; Linn *et al.*, 2020; Samadi-Kalkhoran *et al.*, 2021).

بیانگر حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II برای تبدیل انرژی نورانی جذب شده به انرژی شیمیایی است (Kocheva *et al.*, 2004). کاهش آن، نشان‌دهنده آسیب‌های وارده به مراکز واکنش فتوسیستم II می‌باشد و افزایش آن، بیانگر کارایی بالای فتوسیستم II است. مقدار F_v/F_m هرگز به عدد یک نمی‌رسد، چرا که در هر شرایطی F_v نمی‌تواند با F_m برابر شود (Björkman & Demmig, 1987). در پی کاهش نوسانات و آزاد شدن گرما، همواره مقداری از انرژی جذب شده از مولکول‌های



شکل ۳. پاسخ حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) خردل وحشی به دزهای علف‌کش‌های اوتلو (A)، آکسیال وان (B) و سالیسیلیک اسید در ۱، ۳، ۵، ۷ روز پس از کاربرد علف‌کش‌ها. بارها نشان دهنده‌ی خطای استاندارد هستند.

Figure 3. Response of *Sinapis arvensis* maximum quantum yield of photosystem II (F_v/F_m) to Othello (A), Axial one (B) doses, and Salicylic Acid at 1, 3, 5, and 7 days after herbicide application. Bars represent standard error.

کاربرد علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین در سیب‌زمینی باعث کاهش حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) از طریق اختلال در فعالیت فتوسیستم II شدند (Samadi Kakhoran et al., 2021). نتایج آزمایشی در گیاه توق نشان داد که با افزایش دز علف‌کش لوماکس فلورسانس حداکثر و حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II کاهش و فلورسانس حداقل افزایش یافت (Hasannejad & Porheidar Ghafarbi, 2019). کاربرد تری‌بنورون متیل میزان فتوستنتر و محتوای کلروفیل را تحت تأثیر قرارداد. به نظر می‌رسد تخریب کلروپلاست‌ها و ناتوانی در فتوستنتر، اثرات اصلی تیمارهای تری‌بنورون متیل و سایر مهارکننده‌های ALS باشد (Liu et al., 2017).

وزن تر و خشک خردل وحشی

وزن تر و خشک خردل وحشی تحت تأثیر تیمارهای مختلف علف‌کش اتللو، صرف‌نظر از پیش تیمار با سالیسیلیک اسید، در مقایسه با تیمار عدم کاربرد علف‌کش کاهش یافت. وزن تر و خشک حتی در دزهای پایین تر از دز توصیه شده هم کاهش داشته است. سالیسیلیک اسید در تیمار بدون علف‌کش باعث افزایش وزن تر و خشک خردل وحشی گردید اما این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۴A). بیشترین و کمترین وزن تر (۲/۱۵ و ۰/۱۵ گرم بر بوته) به ترتیب در تیمار عدم کاربرد علف‌کش اتللو با سالیسیلیک اسید (یک میلی‌مولار) و تیمار ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار بدون محلول-پاشی سالیسیلیک اسید بود. در مورد وزن خشک نیز،

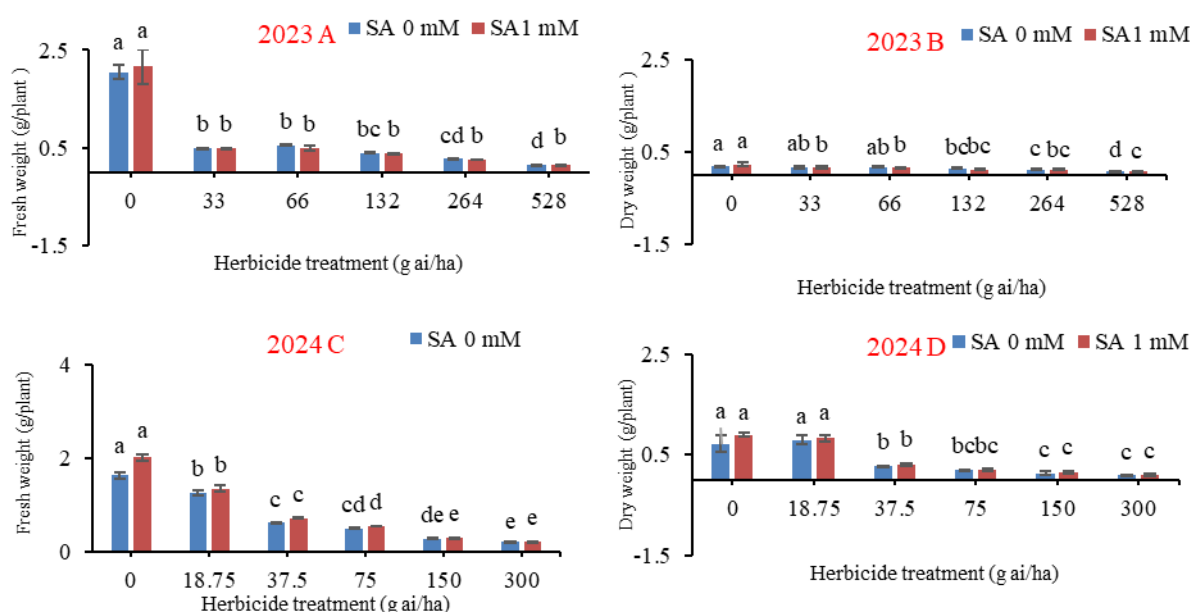
بیشترین و کمترین مقدار (۰/۲۲۹ و ۰/۰۶۸ گرم بر بوته) به ترتیب مربوط به تیمار عدم کاربرد علف‌کش با پیش تیمار یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید و تیمار ۵۲۸ گرم ماده مؤثره در هکتار و پیش تیمار با یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید بود که باعث کاهش ۶۳/۳۰ درصدی وزن خشک نسبت به تیمار بدون کاربرد علف‌کش و سالیسیلیک اسید گردید.

کاربرد علف‌کش آکسیالوان، وزن تر و خشک خردل وحشی را حتی در مقادیر پایین تر از دز توصیه شده هم کاهش داد (شکل ۴B). بالاترین و پایین‌ترین میزان وزن تر (۲/۰۱ و ۰/۲۰) به ترتیب در تیمار بدون علف‌کش آکسیالوان با سالیسیلیک اسید و دز ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار بدون سالیسیلیک اسید ثبت شد. در ارتباط با وزن خشک هم، بالاترین و پایین‌ترین سطح (۰/۹۰۲ و ۰/۰۸۶) در تیمار بدون علف‌کش با یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید و دز ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار بدون سالیسیلیک اسید ثبت شد. کاهش ۸۸/۱۰ درصدی وزن خشک در دز ۳۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار نسبت به تیمار بدون کاربرد علف‌کش و سالیسیلیک اسید مشاهده شد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد کاربرد علف‌کش‌ها موجب کاهش وزن تر و خشک خردل وحشی گردید که این امر بیانگر اختلال در رشد و فعالیت متابولیکی گیاه تحت تنش علف‌کشی است. با توجه به قرار گرفتن آنزیم ALS در پلاستیدها و کلروپلاست‌ها (Shimizu et al., 2008)، مهار این آنزیم توسط علف‌کش‌های گروه سولفونیل‌اوره می‌تواند به‌طور مستقیم با اختلال در بیوستز اسیدهای

از آسیب اکسیداتیو جلوگیری کند (Vafabakhsh *et al.*, 2008; Khatami *et al.*, 2022). با این حال، در پژوهش حاضر تأثیر سالیسیلیک اسید در کاهش اثر منفی علف‌کش‌ها بر وزن تر و خشک محدود و در برخی موارد از نظر آماری معنی‌دار نبود، که نشان می‌دهد شدت تنش ناشی از علف‌کش احتمالاً فراتر از ظرفیت حفاظتی سالیسیلیک اسید در شرایط این آزمایش بوده است.

آزمینه شاخه‌دار و به‌طور غیرمستقیم از طریق ایجاد تنش اکسیداتیو، بر عملکرد دستگاه فتوسنتزی تأثیر بگذارد. این اختلال منجر به کاهش ظرفیت تثبیت CO_2 ، برهم خوردن تعادل انتقال الکترون و در نهایت کاهش تجمع ماده خشک می‌شود (Hussain *et al.*, 2010). در مقابل، سالیسیلیک اسید به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد و ترکیب سیگنال‌دهنده دفاعی، از طریق تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، می‌تواند تا حدودی



شکل ۴. پاسخ وزن تر و وزن خشک خردل وحشی به دزهای علف‌کش‌های اتللو (A, B) و آکسیال وان (C, D) و سالیسیلیک اسید سه هفته پس از کاربرد علف‌کش. بارها نشان دهنده‌ی خطای استاندارد هستند. آزمایش‌ها به ترتیب در سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ انجام گردید.

Figure 4. Response of *Sinapis arvensis* L. fresh and dry weight to Othello (A, B), Axial One (C, D), and salicylic acid, three weeks after herbicide application. Bars represent standard error. The experiments were conducted in 2023 and 2024.

فلورسانس کلروفیل به عنوان شاخص‌های غیرتخریبی، قادرند تغییرات فیزیولوژیکی ناشی از تنش علف‌کش را به‌خوبی منعکس کنند. در تیمار علف‌کش اتللو (جدول ۲A)، بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار بین فلورسانس حداکثر (F_m) و وزن خشک گیاه مشاهده شد ($P < 0.01$ ، $r = 0.963$ ، 0.964). همچنین، فلورسانس حداقل (F_0)

همبستگی بین صفات فلورسانس کلروفیل با وزن تر و خشک علف‌هرز خردل وحشی

نتایج بررسی همبستگی بین پارامترهای فلورسانس کلروفیل اندازه‌گیری‌شده در هفت روز پس از کاربرد علف‌کش‌ها با وزن تر و خشک بوته‌های خردل وحشی در سه هفته پس از تیمار علف‌کش‌ها، نشان‌دهنده ارتباط معنی‌داری بین این صفات بود (جدول ۶). یافته‌ها نشان دادند که پارامترهای

همبستگی منفی معنی‌داری با وزن خشک نشان داد، که می‌تواند بیانگر کاهش کارایی فتوسنتزی در نتیجه آسیب به فتوسیستم II باشد. در مقابل، حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم $(F_v/F_m)_{II}$ با وزن خشک همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. در علف‌کش آکسیالوان نیز بیشترین همبستگی بین F_o و وزن خشک مشاهده شد ($r = -0.885$, $P < 0.05$) (جدول ۲B). شناسایی همبستگی معنی‌دار میان شاخص‌های فلورسانس کلروفیل حاصل از روش‌های نمونه‌برداری غیرتخریبی و سریع با مقادیر

وزن خشک به‌دست‌آمده از نمونه‌برداری‌های تخریبی و زمان‌بر در علف‌هرز خردل وحشی، می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای پایش سریع و غیرمستقیم تأثیر علف‌کش‌ها بر این علف‌هرز مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج با مطالعات پیشین که به نقش فلورسانس کلروفیل در ارزیابی اثرات تنش‌های شیمیایی بر فتوسنتز و رشد گیاه اشاره دارند، هم‌راستا است (Abbaspoor & Streibig, 2007; Hammami *et al.*, 2014).

جدول ۲. ضرایب همبستگی بین پارامترهای فلورسانس کلروفیل و وزن تر و خشک خردل وحشی (A: اتللو، B: آکسیالوان)

Table 2. Correlation coefficients between chlorophyll fluorescence parameters and fresh and dry weight of *Sinapis arvensis* L. (A: Othello, B: Axial One)

		Dry weight (SA 0 mM)	Dry weight (SA1 mM)	Fresh weight (SA 0 mM)	Fresh weight (SA 1 mM)	F _o (SA 0 mM)	F _o (SA 1 mM)	F _m (SA 0 mM)	F _m (SA 1 mM)	F _v /F _m (SA 0 mM)	F _v /F _m (SA 1 mM)
(A) Traits	Dry weight (SA 0 mM)	1									
	Dry weight (SA1 mM)	0.91*	1								
	Fresh weight (SA 0 mM)	0.68	0.88*	1							
	Fresh weight (SA 1 mM)	0.66	0.87*	0.99*	1						
	F _o (SA 0 mM)	-0.94**	-0.94**	-0.77	-0.76	1					
	F _o (SA 1 mM)	-0.91*	-0.94**	-0.80	-0.79	0.99**	1				
	F _m (SA 0 mM)	0.96**	0.94	0.68	0.67	-0.91*	-0.89*	1			
	F _m (SA 1 mM)	0.96**	0.96**	0.74	0.72	-0.92**	-0.90*	0.99**	1		
	F _v /F _m (SA 0 mM)	0.95**	0.86*	0.57	0.55	-0.85*	-0.81*	0.97**	0.96**	1	
	F _v /F _m (SA 1 mM)	0.95**	0.89*	0.60	0.59	-0.87*	-0.84*	0.98**	0.97**	0.99**	1
(B) Traits	Dry weight (SA 0 mM)	1									
	Dry weight (SA1 mM)	0.99**	1								
	Fresh weight (SA 0 mM)	0.95**	0.98**	1							
	Fresh weight (SA 1 mM)	0.92**	0.96**	0.99**	1						
	F _o (SA 0 mM)	-0.54	-0.60	-0.70	-0.73	1					
	F _o (SA 1 mM)	-0.88*	-0.84*	-0.83*	-0.78	0.63	1				
	F _m (SA 0 mM)	0.72	0.72	0.75	0.73	-0.79	-0.88*	1			
	F _m (SA 1 mM)	0.66	0.67	0.73	0.73	-0.92**	-0.84*	0.90**	1		
	F _v /F _m (SA 0 mM)	0.67	0.69	0.75	0.75	-0.88*	-0.83*	0.97**	0.93**	1	
	F _v /F _m (SA 1 mM)	0.77	0.75	0.78	0.75	-0.81*	-0.95*	0.93**	0.96**	0.92**	1

* و ** به ترتیب معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد.

* and **: Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد علف‌کش‌های اتللو و آکسیالوان موجب افزایش معنی‌دار فلورسانس حداقل (F_o) و کاهش فلورسانس حداکثر (F_m) و حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (F_v/F_m) در خردل وحشی گردید که نشانه بروز اختلال در عملکرد فتوسیستم II تحت تنش علف‌کشی است. این تغییرات فیزیولوژیک با کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک گیاه در سه هفته پس از کاربرد علف‌کش همراه بود، به‌طوری‌که حتی در دزهای پایین‌تر از مقدار توصیه‌شده نیز کاهش رشد مشاهده شد. کاربرد سالیسیلیک اسید پیش

از مصرف علف‌کش‌ها در اغلب موارد نتوانست اثر معنی‌داری در کاهش تنش ایجادشده یا تعدیل کاهش رشد نشان دهد. همچنین همبستگی معنی‌دار بین پارامترهای فلورسانس اندازه‌گیری‌شده در هفت روز پس از تیمار و وزن خشک سه هفته بعد، نشان داد که شاخص‌های فلورسانس کلروفیل می‌توانند به‌عنوان نشانگرهای زودهنگام پیش‌بینی‌کننده کاهش رشد در اثر تنش علف‌کش مورد استفاده قرار گیرند. در مجموع، نتایج نشان داد سالیسیلیک اسید در شرایط این آزمایش تأثیر محسوسی بر تعدیل اثر علف‌کش‌های اتللو و آکسیالوان در کنترل خردل وحشی نداشت.

منابع

- Abbaspoor, M., & Streibig, J.C. 2007. Monitoring the efficacy and metabolism of phenylcarbamates in sugar beet and black nightshade by chlorophyll fluorescence parameters. *Pest Manag. Sci.* 63:576-585.
- Alebrahim, M.T., Rashed Mohassel, M.H., Wilcockson, S., Baghestani, M.A., Ghorbani, R. 2012. Evaluating of some preemergence herbicides for lambsquarter and redroot pigweed control in potato fields. *Plant Protec.* 25: 358-367.
- Ananieva, E.A., Alexieva, V.S., Popova, L.P. 2002. Treatment with salicylic acid decreases the effects of paraquat on photosynthesis. *J. Plant Physiol.* 159(7): 685-693.
- Anderson, R.L. 1997. Cultural systems can reduce reproductive potential of winter annual grasses. *Weed Technol.* 11(3): 608-613.
- Balabanova, D.A., Paunov, M., Goltsev, V., Cuypers, A., Vangronsveld, J., Vassilev, A. 2016. Photosynthetic performance of the imidazolinone resistant sunflower exposed to single and combined treatment by the herbicide imazamox and an amino acid extract. *Front. Plant Sci.* 7: 1559.
- Bhagat, K.P., Kumar, R.A., Ratnakumar, P., Kumar, S., Bal, S.K., Agrawal, P.K. 2014. Photosynthesis and associated aspects under abiotic stresses environment. *Approaches plant stress manag.* 191-205.
- Bilger, W., & Björkman, O. 1994. Relationships among violaxanthin deep oxidation, thylakoid membrane conformation, and nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching in leaves of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Planta.* 193: 238-246.
- Björkman, O., & Demmig, B. 1987. Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta.* 170: 489-504.
- Brestic, M., Zivcak, M., Kunderlikova, K., Sytar, O., Shao, H., Kalaji, H.M., Allakhverdiev, S.I. 2015. Low PSI content limits the photoprotection of PSI and PSII in early growth stages of chlorophyll b-deficient wheat mutant lines. *Photosynth. Res.* 125: 151-166.
- Brown, H.M., Brattsten, L.B., Lilly, D.E., Hanna, P.J. 1993. Metabolic pathways and residue levels of thifensulfuron methyl in soybeans. *J. Agric. Food Cem.* 41(10): 1724-1730.
- Dey, P., Datta, D., Pattnaik, D., Dash, D., Saha, D., Panda, D., Bhatta, B.B., Parida, S., Mishra, U.N., Chauhan, J., Pandey, H. 2022. Physiological, biochemical, and molecular adaptation mechanisms of photosynthesis and respiration under challenging environments. In *Plant perspectives to global climate changes*. Academic Press. 79-100.
- Dickeduisberg, M., Steinmann, H.H. Theuvsen, L. 2012. Erhebungen zum Einsatz von Glyphosat im deutschen Ackerbau. *Julius-Kühn-Archiv.* 434: 459.

- Falqueto, A.R., da Silva Júnior, R.A., Gomes, M.T.G., Martins, J.P.R., Silva, D.M., Partelli, F.L. 2017. Effects of drought stress on chlorophyll *a* fluorescence in two rubber tree clones. *Sci. Hortic.* 224: 238-243.
- Ghassam, M.A., Alizadeh, H., Oveisi, M., Baghestani, M.A. 2018. Interaction effects of different concentrations of Mesosulfuron + Iodosulfuron + Diflufenican (Othello) herbicide and soil moisture content on control of *Sinapis arvensis* in wheat. *Iranian J. of Weed Sci.* 14(1): 59-69.
- Goltsev, V.N., Kalaji, H.M., Paunov, M., Băba, W., Horaczek, T., Mojski, J., Kociel, H., Allakhverdiev, S.I. 2016. Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of plant photosynthetic apparatus. *Russian J. Plant Physiol.* 63(6): 869-893.
- Hammami, H., Mohassel, M.H.R., Parsa, M., Bannayan-Aval, M., Zand, E. 2014. Behavior of sethoxydim alone or in combination with turnip oils on chlorophyll fluorescence parameter. *Not. Sci. Biol.* 6(1): 112-118.
- Hasannejad, S., & Porheidar Ghafarbi, S. 2019. The effect of Lomax alone or in combination with castor oil on chlorophyll *a* fluorescence of common cocklebur (*Xanthium strumarium* L.), *Iranian J. of Weed Sci.* 15(2): 109-121.
- Hassannejad, S., Lotfi, R., Ghafarbi, S.P., Oukarroum, A., Abbasi, A., Kalaji, H.M., Rastogi, A. 2020. Early identification of herbicide modes of action by the use of chlorophyll fluorescence measurements. *Plants.* 9(4): 529.
- Horváth, E., Szalai, G., Janda, T. 2007. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *J. Plant Growth Regul.* 26: 290-300.
- Hussain, M.I., González, L., Reigosa, M.J. 2010. Phytotoxic effects of allelochemicals and herbicides on photosynthesis, growth and carbon isotope discrimination in *Lactuca sativa*. *Allelopathy J.* 26(2): 157-174.
- Idziak, R., Kierzek, R., Sip, D., Krawczyk, R. 2012. Possibility of using pinoksaden and florasulam in mixtures with other herbicides for weed control in winter wheat. *Prog. Plant Prot.* 52(4): 898-902.
- Khalid, M.H.B., Raza, M.A., Yu, H.Q., Sun, F.A., Zhang, Y.Y., Lu, F.Z., Si, L., Iqbal, N., Khan, I., Fu, F.L., Li, W.C. 2019. Effect of shade treatments on morphology, photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybeans (*Glycine max* L. Merr.). *Appl. Ecol. Environ.* 17(2).
- Khatami, S.A., Alebrahim, M.T., Barmaki, M. 2023. Effect of mesosulfuron methyl + iodosulfuron methyl herbicide in combination with salicylic acid on wild oat (*Avena fatua*). *Iranian J. of Weed Sci.* 19(1), 25-39.
- Khatami, S.A., Alebrahim, M.T., Majd, R. 2017b. The effect of rimsulfuron application time and dose on weed control and potato (*Solanum tuberosum*) tuber yield. *Iranian J. of Weed Sci.* 12(2): 185-198.
- Khatami, S.A., Alebrahim, M.T., Mohebodini, M., Majd, R. 2017a. Tuber yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) as affected by different dosage applications of rimsulfuron at its various growth stages. *J. Crop Ecophysiol.* 13(1): 153-170.
- Khatami, S.A., Barmaki, M., Alebrahim, M.T., Bajwa, A.A. 2022. Salicylic acid pre-treatment reduces the physiological damage caused by the herbicide mesosulfuron-methyl+ iodosulfuron-methyl in wheat (*Triticum aestivum*). *Agronomy.* 12(12): 3053.
- Kheirizadeh Arough, Y., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M. Barmaki, M. 2016. Effect of zinc and bio fertilizers on antioxidant enzymes activity, chlorophyll content, soluble sugars and proline in Triticale under salinity condition. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj-Napoca.* 44: 116-124.
- Kocheva, K., Lambrev, P., Georgiev, G., Goltsev, V. Karabaliev, M. 2004. Evaluation of chlorophyll fluorescence and membrane injury in the leaves of barley cultivars under osmotic stress. *Bioelectrochemistry.* 63(1-2): 121-124.
- Linn, A.I., Zeller, A.K., Pfündel, E.E., Gerhards, R. 2020. Features and applications of a field imaging chlorophyll fluorometer to measure stress in agricultural plants. *Precis. Agriculture.* 22 (3): 947-963.
- Liu, X.Q., Yu, C.Y., Dong, J.G., Hu, S.W., Xu, A.X. 2017. Acetolactate synthase-inhibiting gametocide amidosulfuron causes chloroplast destruction, tissue autophagy, and elevation of ethylene release in rapeseed. *Front. Plant Sci.* 8: 1625.
- Maclaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., Dehnen-Schmutz, K. 2020. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agro. Sustain. Dev.* 40: 1-29.
- Manea, D.N., Ștef, R., Peț, I., Ienciu, A.A., Grozea, I., Cărbăț, A. 2016. Control of *Avena fatua* Species (wild oat) a weed in expansion in banat area. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture.* 73(1): 44-48.
- Maxwell, K., & Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence *a* practical guide. *J. exp. Bot.* 51(345): 659-668.
- Mehdizadeh, M., Mushtaq, W., Siddiqui, S.A., Ayadi, S., Kaur, P., Yeboah, S., Mazraedost, S., AL-Taey, D.K. Tampubolon, K. 2021. Herbicide residues in agroecosystems: Fate, detection, and effect on non-target plants. *Rev. Agric. Sci.* 9: 157-167.
- Mehmeti, A., Pacanoski, Z., Fetahaj, R., Kika, A., Kabashi, B. 2018. Weed control in wheat with post-emergence herbicides. *Bulg. J. Agric. Sci.* 24 (1): 74-79.
- Mousavi, S.K., Soori, N., Zeidali, E., Azadbakht, N., Ghiasvand, M. 2010. Comparison of weed floristic composition in fruit gardens in Khorramabad. *Iranian J. Field Crop. Res.* 8(2): 252-268.

- Nosratti, I., Sabeti, P., Chaghamirzaee, G., Heidari, H. 2020. Weed problems, challenges, and opportunities in Iran. *Crop Prot.* 134: 104371.
- Quan, L., Chen, K., Chen, T., Li, H., Li, W., Cheng, T., Xia, F., Lou, Z., Geng, T., Sun, D., Jiang, W. 2023. Monitoring weed mechanical and chemical damage stress based on chlorophyll fluorescence imaging. *Front. Plant Sci.* 14: 1188981.
- Radwan, D.E.M. & 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: 171-179.
- Rastogi, A., Kovar, M., He, X., Zivcak, M., Kataria, S., Kalaji, H. M., Skalicky, M., Ibrahimova, U.F., Hussain, S., Mbarki, S., Brestic, M. 2020. JIP-test as a tool to identify salinity tolerance in sweet sorghum genotypes. *Photosynthetica.* 58: 333-343.
- Roháček, K., Soukupová, J., Barták, M. 2008. Chlorophyll fluorescence: a wonderful tool to study plant physiology and plant stress. *Plant Cell Compartments-Selected Topics. Research Signpost, Kerala, India*, 41: 104.
- Samadi Kalkhoran, E., Alebrahim, M.T., Mohammad doust Chaman Abad, H.R., Streibig, J.C., Ghavidel, A., Tseng, T.M.P. 2021. The joint action of some broadleaf herbicides on potato (*Solanum tuberosum* L.) weeds and photosynthetic performance of potato. *Agriculture.* 11(11): 1103.
- Samadi Kalkhoran, E., & Alebrahim, M.T. 2024. Feasibility assessment of halosulfuron and flumioxazin applications in potato (*Solanum tuberosum*) using chlorophyll *a* fluorescence technique. *Iranian J. of Weed Sci.* 20(1): 77-97.
- Sharhrtash, M., Mohsenzadeh, S., Mohabatkar, H. 2011. Salicylic acid alleviates paraquat oxidative damage in maize seedling. *Asian J. Exp. Biol. Sci.* 2(3): 377-382.
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G.P., Bali, A.S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., Khanna, K., Bakshi, P., 2020. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *J. Plant Growth Regul.* 39: 509-531.
- Shimizu, M., Goto, M., Hanai, M., Shimizu, T., Izawa, N., Kanamoto, H., Tomizawa, K.I., Yokota, A., Kobayashi, H. 2008. Selectable tolerance to herbicides by mutated acetolactate synthase genes integrated into the chloroplast genome of tobacco. *Plant physiol.* 147(4): 1976-1983.
- Sun, L., Xu, H., Hao, H., An, S., Lu, C., Wu, R., Su, W. 2019. Effects of bensulfuron-methyl residue on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in leaves of cucumber seedlings. *Plos One.* 14(4): e0215486.
- Swoczyna, T., Kalaji, H.M., Bussotti, F., Mojski, J., Pollastrini, M. 2022. Environmental stress-what can we learn from chlorophyll *a* fluorescence analysis in woody plants? A review. *Front. Plant Sci.* 13:1048582.
- Tran, L.S.P., Urao, T., Qin, F., Maruyama, K., Kakimoto, T., Shinozaki, K., Yamaguchi-Shinozaki, K. 2007. Functional analysis of AHK1/ATHK1 and cytokinin receptor histidine kinases in response to abscisic acid, drought, and salt stress in Arabidopsis. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS).* 104(51): 20623-20628.
- Vafabakhsh, J., Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A. 2008. Effects of drought stress on radiation use efficiency and yield of winter Canola (*Brassica napus* L.) Iran. *Field Crop Res.* 6: 193-208.
- Van Rensen, J.J.S. & Vredenberg, W.J. 2009. Higher concentration of QB nonreducing photosystem II centers in triazine-resistant *Chenopodium album* plants as revealed by analysis of chlorophyll fluorescence kinetics. *J. Plant Physiol.* 166: 1616-1623.
- Yaghoobian, Y., Siadat, S.A., Moradi Telavat, M.R., Pirdashti, H. 2016. Quantify the response of purslane plant growth, photosynthesis pigments and photosystem II photochemistry to cadmium concentration gradients in the soil. *Russian J. Plant Physiol.* 63: 77-84.
- Zand, E., Baghestani, M.A., Nezamabadi, N., Shimi, P., Mousavi, S.K. 2019. A guide for herbicides in Iran. University Press Center, 216 pp.
- Zimdahl, R.L. 2004. Weed-Crop Competition: A Review. Blackwell publishing. 99(2): 131.
- Zivcak, M., Brestic, M., Kalaji, H.M., Govindjee, G. 2014. Photosynthetic responses of sun-and shade-grown barley leaves to high light: is the lower PSII connectivity in shade leaves associated with protection against excess of light? *Photosynth. Res.* 119: 339-354.