



Original Article

Feasibility Assessment of Halosulfuron and Flumioxazin Applications in Potato (*Solanum tuberosum*) Using Chlorophyll *a* Fluorescence Technique

Elham Samadi Kalkhoran¹, Mohammad Taghi Alebrahim^{1*}

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Article Info

Received:
January 21, 2024

Accepted:
May 14, 2024

First published online:
June 21, 2024

Corresponding Author:
Mohammad Taghi Alebrahim
Email:
m_ebrahim@uma.ac.ir

Key words: Chlorophyll *a* fluorescence, herbicide, maximum fluorescence, minimum fluorescence, variable fluorescence.

Abstract

Chlorophyll *a* fluorescence technique is a very simple, non-destructive, and fast method to evaluate photosynthetic reactions. In order to evaluate the effects of metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin on chlorophyll *a* fluorescence parameters in potato, a greenhouse experiment was carried out in a completely randomized design with three replications in the Agricultural Science and Natural Resources Department of Mohaghegh Ardabili University in 2021. Metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin were used at seven different dosages. Chlorophyll *a* fluorescence was measured using an Opti-Sciences device at 1, 2, 4, and 8 days after herbicide application. Samples were exposed to 650 nm light at an intensity of 3000 $\mu\text{mol photons/m}^2/\text{s}$ after 20 minutes of dark adaptation. The results demonstrated that the highest reduction percentage of potato dry weight (63.75%) was observed with flumioxazin at 250 g a.i. ha^{-1} . The potato dry weight data, fitted with a log-logistic equation illustrated that the lowest ED_{50} (67.89 g a.i. ha^{-1}) was achieved from flumioxazin, indicating its high toxicity to potato. The findings suggested an increase in minimum fluorescence (F_0) and a decrease in maximum fluorescence (F_m) and variable fluorescence (F_v) at four and eight days after spraying due to metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin application. The data revealed that metribuzin and flumioxazin produced the highest and lowest ED_{50} values for chlorophyll *a* fluorescence parameters, respectively. As a result, flumioxazin led to a more significant reduction in photosystem II activity, primarily due to the damage caused to the photosynthetic system in potatoes.

Cite this article: Samadi Kalkhoran, E. and Alebrahim, M.T. (2024). Feasibility assessment of application of halosulfuron and flumioxazin in potato (*Solanum tuberosum*) using chlorophyll *a* fluorescence technique. Iran. J. of Weed Sci. 20(1): 77-97. DOI: 10.22034/ijws.2025.367241.1472.



مقاله پژوهشی

امکان‌سنجی کاربرد هالوسولفورون و فلومیوکسازین در زراعت سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) با استفاده از تکنیک فلورسانس کلروفیل *a*

الهام صمدی کلخوران^۱، محمدتقی آل ابراهیم^{*}

۱- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

تکنیک فلورسانس کلروفیل *a* روشی بسیار ساده، غیر تخریبی و سریع برای ارزیابی واکنش‌های فتوسنتزی می‌باشد. به منظور ارزیابی تأثیر علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل *a* سیب‌زمینی، آزمایشی گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، در گلخانه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین در هفت دز متفاوت استفاده شدند. اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل *a* با دستگاه Opti-Sciences در یک، دو، چهار و هشت روز پس از کاربرد علف‌کش‌ها انجام شد. نمونه‌ها تحت نور ۶۵۰ نانومتر و شدت ۳۰۰۰ میکرومول فوتون/متر مربع/ثانیه پس از تاریکی ۲۰ دقیقه‌ای قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بیشترین درصد کاهش وزن خشک سیب‌زمینی (۶۳/۷۵ درصد) از دز ۲۵۰ گرم ماده مؤثره در هکتار فلومیوکسازین به دست آمد. برازش داده‌های وزن خشک سیب‌زمینی با مدل لوگ لجستیک نشان داد که کمترین میزان ED₅₀ (۶۷/۸۹ گرم ماده مؤثره در هکتار) برای وزن خشک سیب‌زمینی، حاصل از فلومیوکسازین می‌باشد که نشانگر سمیت بالای فلومیوکسازین بر سیب‌زمینی است. یافته‌های پژوهش حاضر، حاکی از افزایش میزان فلورسانس حداقل (F_o) و کاهش میزان فلورسانس حداکثر (F_m) و فلورسانس متغیر (F_v) در چهار و هشت روز پس از سمپاشی در اثر کاربرد علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین می‌باشد. با توجه به نتایج، بالاترین و پایین‌ترین میزان ED₅₀ برای پارامترهای فلورسانس کلروفیل *a* به ترتیب از علف‌کش‌های متری‌بوزین و فلومیوکسازین به دست آمد. بنابراین فلومیوکسازین باعث کاهش بیشتر فعالیت فتوسیستم II در اثر تخریب سیستم فتوسنتزی سیب‌زمینی شد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۲/۲۵

تاریخ انتشار بر خط:

۱۴۰۳/۰۴/۰۱

نویسنده مسئول:

محمدتقی آل ابراهیم

ایمیل:

m_ebrahim@uma.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

علف‌کش،

فلورسانس حداقل، فلورسانس

حداکثر، فلورسانس کلروفیل *a*،

فلورسانس متغیر.

استناد: صمدی کلخوران، ا. و آل ابراهیم، م.ت. (۱۴۰۳). امکان‌سنجی کاربرد هالوسولفورون و فلومیوکسازین در زراعت سیب‌زمینی

(*Solanum tuberosum*) با استفاده از تکنیک فلورسانس کلروفیل *a*. دانش علف‌های هرز ایران، ۲۰(۱): ۷۷-۹۷.

DOI: 10.22034/ijws.2025.367241.1472

ناشر: انجمن علوم علف‌های هرز ایران و موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور

© نویسندگان.

مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی *Solanum tuberosum* (L.) یکی از مهمترین محصولات کشت‌شده در سراسر جهان می‌باشد و از نظر عملکرد و سطح زیر کشت، بعد از گندم، برنج و ذرت در رتبه چهارم قرار دارد (Siddiqui et al., 2024). در ایران، سطح برداشت، میزان تولید و میانگین عملکرد سیب‌زمینی در سال ۱۴۰۲ به ترتیب بیش از ۱۳۱ هزار هکتار، ۴/۶۸۶ میلیون تن و ۳۵/۷ تن در هکتار بوده است (MAJ, 2023). یکی از مهمترین عوامل محدودکننده تولید سیب‌زمینی، علف‌های هرز می‌باشد که موجب کاهش عملکرد و کیفیت آن شده و باعث افزایش هزینه‌های تولید می‌شود (Samadi Kalkhoran et al., 2021; Jabran et al., 2023). در سال‌های اخیر، کاربرد مداوم و گسترده علف‌کش‌ها با نحوه عمل مشابه، سبب توسعه سریع بیوتیپ‌های مقاوم علف‌های هرز (Varah et al., 2024)، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی از جمله آلودگی خاک (Samadi Kalkhoran et al., 2022; Alebrahim et al., 2022)، آب‌های زیرزمینی و آسیب به سلامت انسان (Sharma et al., 2024) و افزایش هزینه‌های تولید شده است. در ایران، علف‌کش‌های متری‌بوزین، پاراکوات و پندی‌متالین برای کنترل علف‌های هرز سیب‌زمینی به ثبت رسیده است. بنابراین، با توجه به محدودبودن تعداد علف‌کش‌های ثبت‌شده در ایران در مقایسه با سایر کشورها و با در نظر گرفتن اینکه کاربرد متوالی این علف‌کش‌ها در مزارع سیب‌زمینی، می‌تواند باعث افزایش ریسک مقاومت

علف‌های هرز در این محصول شود؛ بنابراین تحقیق جهت ارزیابی علف‌کش‌های جدید ضروری به نظر می‌رسد (Alebrahim et al., 2012a).

به‌طور کلی، فلورسانس کلروفیل *a* روشی است غیر تخریبی، سریع و دقیق برای ارزیابی تنش‌های مختلف، از جمله تنش ناشی از علف‌کش‌ها به کار می‌رود (Roeb et al., 2015; Chitband et al., 2017). در آزمایش‌های مربوط به علف‌کش‌ها، برای تعیین متابولیسم علف‌کش در علف‌هرز و گیاه زراعی (Abbaspoor & Streibig, 2007)، تعیین مقاومت علف‌های هرز به علف‌کش‌ها (Pigatto et al., 2020) و تشخیص زودهنگام نحوه عمل علف‌کش (Hassannejad et al., 2020) از فلورسانس کلروفیل *a* استفاده می‌شود. بررسی تغییرات پارامترهای فلورسانس کلروفیل روشی پرکاربرد در ارزیابی کارایی علف‌کش‌های جدید می‌باشد (Quan et al., 2023). حسن‌نژاد و همکاران (Hassannejad et al., 2020) گزارش کردند که با اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل، می‌توان موفق به تشخیص زودهنگام اثرات علف‌کشی در علف‌های هرز و گیاهان زراعی شد. اندازه‌گیری میزان تغییرات فلورسانس کلروفیل *a* یکی از مهمترین روش‌های کمی کردن تداخل علف‌کش‌ها با زنجیره انتقال الکترون است. این تکنیک می‌تواند برای تعیین کارایی اثر علف‌کش به کار رود (Khatami et al., 2023).

به‌طور کلی، دستگاه فتوستزی از دو مجموعه فتوستزی که فتوسیستم نامیده می‌شوند تشکیل شده است. فتوسیستم شامل کلروفیل *a* و نوع خاصی

پروتئین می‌باشد. در فتوسیستم II، دو پذیرنده الکترون در ارتباط با واکنش فلورسانس وجود دارند. QA در مرکز واکنش پروتئین D2 و QB در مرکز واکنش پروتئین D1 قرار دارد. هنگامی که تابش نور به برگ‌های گیاهان در شرایط تاریکی می‌رسد، QA کاهش و فلورسانس افزایش می‌یابد. علف‌کش‌های بازدارنده فتوسیستم II با پیوند به QB مانع از اکسیداسیون مجدد QA توسط QB می‌شوند و به این ترتیب جریان الکترون‌ها در فتوسیستم II متوقف می‌شود. این فرآیند در واکنش بیوشیمیایی با جایگزینی پلاستوکوینون (PQ) در پروتئین D1 در مرکز واکنش فتوسیستم II در زنجیره انتقال الکترون صورت می‌گیرد (Norsworthy et al., 1998). هنگامی که علف‌کش‌های بازدارنده فتوستنر با پروتئین D1 در فتوسیستم II پیوند می‌خورند، دو پیامد مهم به دنبال دارد: اولاً کاهش NADP احیاشده که برای تثبیت CO₂ ضروری است؛ و دوماً، تولید رادیکال‌های آزاد (مانند OH⁻، H₂O₂، Chl³) که موجب فتواکسیداسیون مولکول‌های کلروپلاست، از جمله کلروفیل‌ها و لیپیدهای غیر اشباع می‌شود (Devine & Shukla, 2000). این محدودیت در تثبیت دی‌اکسید کربن منجر به تجمع گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) می‌شود که از افزایش تراوش الکترون‌ها از غشای تیلاکوئید به وجود می‌آید و آسیب‌های اکسیداتیو به غشای فسفولیپیدی تیلاکوئید وارد می‌آورد. این آسیب‌ها باعث شکستن زنجیره انتقال الکترون از فتوسیستم II به I می‌شود. علف‌کش‌هایی که تولید اکسیژن‌های فعال (ROS) می‌کنند و موجب پراکسیداسیون لیپیدی می‌شوند،

استحکام سیستم فتوستنری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این گونه‌های اکسیژن فعال با حمله به لیپیدهای غشایی و تولید رادیکال‌های آزاد لیپیدی، باعث تخریب غشاهای سلولی و پروتئین‌ها می‌شوند (Asada, 2006).

متری‌بوزین علف‌کشی انتخابی، سیستمیک، متعلق به بازدارنده‌های فتوسیستم II و از خانواده تریازینون می‌باشد (Mamnoie et al., 2024). این علف‌کش برای کنترل علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ در مزارع سیب‌زمینی به کار می‌رود (Nassar et al., 2024). هالوسولفورون نیز علف-کشی سیستمیک (Kaur et al., 2023) و از بازدارنده‌های سنتز ALS و از خانواده سولفونیل-اوره‌ها است که در کنترل جگن‌ها و برخی علف‌های هرز پهن‌برگ مؤثر می‌باشد (Garkhal et al., 2024). مطالعات دو ساله‌ای که توسط بویدستون (Boydeston, 2007) انجام شد، نشان داد که استفاده از هالوسولفورون در دزهای ۱۸، ۲۶ و ۳۵ گرم در هکتار به طور متوسط باعث کنترل ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درصدی *Solanum sarrachoides* و ۷۰، ۷۷ و ۷۴ درصدی علف انگشته‌ای (*Digitaria sanguinalis*) شد. علاوه بر این، اعمال هالوسولفورون در دزهای ۵۰ و ۷۵ گرم در هکتار منجر به کاهش تولید غده در گیاه سیب‌زمینی شد (Correia et al., 2019). فلومیوکسازین نیز از علف‌کش‌های بازدارنده پروتوپورفیرینوژن اکسیداز (PPO) و از خانواده N-فنیل‌فتالیمید می‌باشد (Da Silva et al., 2024; Randell-Singleton et al., 2024) که باعث کنترل علف‌های هرز باریک

زراعی می‌پردازند و نتایج این مطالعات را به‌عنوان مبنایی برای پیشنهاد ثبت این علف‌کش‌ها به مراجع ذی‌صلاح یا ارائه آن‌ها به کشاورزان مد نظر قرار می‌دهند. در صورتی که این علف‌کش‌ها از نظر کارایی و ایمنی نتایج قابل قبولی ارائه دهند، ممکن است در آینده برای استفاده در کشت سیب‌زمینی به ثبت برسند. به کمک اندازه‌گیری پارامترهای فلورسانس کلروفیل a ، امکان ارزیابی دقیق تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم علف‌کش‌های هالوسولفورون و فلومیوکسازین بر وزن خشک سیب‌زمینی فراهم می‌شود. در این پژوهش، انتخاب این دو علف‌کش با هدف بررسی امکان استفاده آن‌ها در کشت سیب‌زمینی و مقایسه با علف‌کش متری‌بوزین (به‌عنوان یک علف‌کش ثبت‌شده) صورت گرفته است. همچنین، تعیین دز مؤثر علف‌کش‌های ثبت‌نشده به گونه‌ای که به محصول سیب‌زمینی آسیب نرساند، یکی دیگر از اهداف اصلی این مطالعه است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی تأثیر علف‌کش‌های متری‌بوزین (سنکور، 70% WP)، هالوسولفورون (سمپرا، 75% WG) و فلومیوکسازین (پلج، 50% WP) بر سیب‌زمینی و پارامترهای فلورسانس کلروفیل a آن، آزمایشی به‌صورت طرح کاملاً تصادفی در گلخانه دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۰ انجام شد. مشخصات هر یک از علف‌کش‌های به‌کار برده‌شده در جدول ۱ آمده است.

برگ و پهن‌برگ می‌شود (Chen et al., 2021). هاتچینسون و همکاران (Hutchinson et al., 2005) در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که استفاده پیش‌رویشی از فلومیوکسازین در دزهای ۱۰۵ تا ۱۴۰ گرم در هکتار منجر به ایجاد آسیب‌های قابل توجهی به گیاه سیب‌زمینی می‌شود. در عین حال، در دز ۵۳ گرم در هکتار، هیچ‌گونه آسیب قابل توجهی به گیاه سیب‌زمینی مشاهده نشد. از سوی دیگر، کاربرد فلومیوکسازین در دز ۵۴ گرم در هکتار به‌صورت پس‌رویشی به‌طور مؤثری کنترل ۱۰۰ درصدی علف‌های هرز سلمه‌تره (*Chenopodium album*)، تاج‌خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*)، آمبروسیا (*Ambrosia artemisiifolia*) و هفت‌بند خالدار (*Persicaria maculosa*) را فراهم کرد. با این حال، این دز منجر به بروز آسیب هفت درصدی به گیاه سیب‌زمینی در طی ۲۹ روز پس از سمپاشی شد (Colquhoun et al., 2021).

بسیاری از علف‌کش‌ها ممکن است برای برخی محصولات کشاورزی ثبت نشده باشند، اما این موضوع لزوماً به معنای عدم پتانسیل کاربرد آن‌ها در سایر محصولات زراعی نیست. هدف این پژوهش بررسی اثرات علف‌کش‌های هالوسولفورون و فلومیوکسازین به‌عنوان علف‌کش‌های ثبت‌نشده در سیب‌زمینی است؛ موضوعی که تاکنون تحقیقات کافی پیرامون آن در ایران صورت نگرفته است. از سوی دیگر، بسیاری از پژوهشگران با انجام آزمایش‌های مربوط به علف‌کش‌های ثبت‌نشده، به ارزیابی کارایی و ایمنی این ترکیبات در گیاهان

جدول ۱- مشخصات علف‌کش‌های مورد استفاده در آزمایش.

Table 1. Characteristics of the herbicides used in the experiment.

Common name	Trade name	Chemical family	Mode of action	Formulation	Dose (g a.i. ha ⁻¹)	Manufacturer
Metribuzin	Sencor®	Triazinones	Inhibition of photosynthesis	WP 70%	0, 15.625, 31.25, 62.5, 125, 250, 500, 1000	Bayer
Halosulfuron	Sempre®	Sulfonylureas	Inhibition of acetolactate synthase	WG 75%	0, 1.5625, 3.125, 6.25, 12.5, 25, 50, 100	Nufarm
Flumioxazin	Pledge®	N-Phenylimides	Inhibition of protoporphyrinogen oxidase	WP 50%	0, 3.906, 7.8125, 15.625, 31.25, 62.5, 125, 250	Sumitomo

گرفتند، برآورد و ثبت شد (Roháček *et al.*, 2008). پارامترهای اندازه-گیری شده شامل فلورسانس حداقل (F_0)، فلورسانس حداکثر (F_m) و فلورسانس متغیر (F_v) بود. تمامی اندازه‌گیری‌ها در محدوده‌های زمانی مختلف، از یک برگ نشانه‌گذاری شده انجام شد.

برای آنالیز داده‌های فلورسانس کلروفیل a سیب‌زمینی تحت تأثیر علف‌کش‌ها از نرم‌افزار R ورژن ۲-۲-۴ استفاده شد. برای تعیین ED_{50} علف-کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین از مدل لوگ لجستیک چهار پارامتری استفاده شد (Streibig & Jensen, 2000). معادله

$$U_{ij} = c + (1) \frac{d-c}{1 + \exp\{b(\log(dose) - \log(ED_{50}))\}}$$

U_{ij} بیانگر وزن خشک و پارامترهای مختلف فلورسانس کلروفیل a سیب‌زمینی از جمله فلورسانس حداقل (F_0)، فلورسانس حداکثر (F_m) و فلورسانس متغیر (F_v) که موجب پاسخ در دز i از فرمولاسیون (Z_{ij}) می‌شود. d و c حد بالا و پایین وزن خشک و پارامترهای مختلف فلورسانس و ED_{50} مقدار فرمولاسیون i لازم برای کاهش ۵۰ درصدی وزن خشک و پارامترهای فلورسانس سیب-زمینی بین d و c ، متناسب با شیب خط در محدوده ED_{50} می‌باشد. در آنالیز داده‌ها در صورت معنی-دار نشدن c از مدل لوگ لجستیک سه‌پارامتری (با حذف حد پایین (c)) استفاده شد. صحت و دقت

دزهای متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین در سیب‌زمینی با سه تکرار استفاده شدند. برای این منظور، یک عدد غده سیب‌زمینی رقم آگريا داخل گلدان‌های حاوی خاک، خاک-برگ و ماسه‌بادی با نسبت حجمی مساوی (۱:۱:۱) با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متری در عمق پنج سانتی‌متری قرار داده و پس از اضافه کردن مقداری خاک روی غده، آبیاری شدند. در طول مدت رشد، دمای گلخانه در طول روز بین ۲۵ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد و طول شب ۱۷ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. گیاه سیب‌زمینی در مرحله دو تا چهار برگگی کامل در غروب و با دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد به وسیله سمپاش پستی مدل Inter با خروجی ۳۰۰ لیتر در هکتار و با فشار تقریباً ثابت دو بار مجهز به نازل بادبزی یکنواخت (۸۰۰۲) سمپاشی شدند. سه هفته پس از سمپاشی، گیاهچه‌ها از سطح خاک کف‌بر و داخل پاکت‌های کاغذی گذاشته و به آون با دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت منتقل شدند. سپس وزن خشک آن‌ها با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم (AND، مدل GF-300) ثبت شد. اندازه‌گیری پارامترهای فلورسانس کلروفیل a با دستگاه (Opti-Sciences (OS30p+, USA) در محدوده زمانی یک، دو، چهار و هشت روز پس از کاربرد علف‌کش‌ها انجام شد. مقادیر پارامترهای فلورسانس کلروفیل a برگ، با تابانیدن نوری با طول موج ۶۵۰ نانومتر و شدت ۳۰۰۰ میکرومول فوتون در متر مربع در ثانیه به مدت ۱۰ ثانیه بر برگ‌های توسعه‌یافته بالایی سیب‌زمینی که به وسیله کلیپس‌های مخصوصی به مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی قرار

مدل با آزمون عدم برازش^۱ مورد ارزیابی قرار گرفته است (Ritz & Streibig, 2015).

درصد کاهش وزن خشک سیب‌زمینی با استفاده از معادله دو محاسبه شد. آنالیز تجزیه واریانس داده‌های حاصل از وزن خشک سیب‌زمینی با استفاده از نرم‌افزار SAS ver. 9.2 انجام شد و میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح پنج درصد مقایسه شدند. (۲)

$$HE = (1 - \frac{Y_t}{Y_m} * 100)$$

که در آن Y_t وزن خشک سیب‌زمینی در گلدان تیمار شده و Y_m وزن خشک سیب‌زمینی در گلدان تیمار نشده (تیمار شاهد) می‌باشد.

نتایج و بحث

زیست‌سنجی گیاه کامل سیب‌زمینی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که دزهای مختلف متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین تأثیر معنی‌داری بر درصد کاهش وزن خشک سیب‌زمینی داشت. بیشترین درصد کاهش وزن خشک سیب‌زمینی (۶۳/۷۵ درصد) از کاربرد دز ۲۵۰ گرم ماده مؤثره در هکتار فلوئوکسازین به‌دست آمد که از لحاظ آماری با دز ۱۲۵ گرم ماده مؤثره در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۲). متری‌بوزین و هالوسولفورون در بالاترین دز کاربردی (به‌ترتیب ۱۰۰۰ و ۱۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار) موجب کاهش ۴۰/۷۴ و ۴۷/۰۶ درصدی وزن خشک سیب‌زمینی شد (جدول ۲).

منحنی دز- پاسخ وزن خشک سیب‌زمینی نشان داد که با افزایش دزهای علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین، درصد کاهش وزن خشک سیب‌زمینی افزایش یافت (شکل ۱).

جدول ۳ پارامترهای مدل لوگ لجستیک سه-پارامتری را در دزهای مختلف علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین بر وزن خشک سیب‌زمینی نشان می‌دهد. آزمون عدم برازش در سطح (۰/۰۵) $P \geq$ برای این مدل نسبت به دزهای مختلف علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین برای وزن خشک سیب‌زمینی معنی‌دار نشد (جدول ۳). حداقل دز مورد نیاز برای کاهش ۵۰ درصدی وزن خشک سیب‌زمینی برای علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین به‌ترتیب ۱۵۱۶/۶۸، ۱۹۵/۰۵ و ۶۸/۸۹ گرم ماده مؤثره در هکتار بود (جدول ۳). مقایسه مقادیر ED_{50} علف‌کش‌های مختلف نشان داد که فلوئوکسازین اثرات گیاهسوزی بیشتری نسبت به هالوسولفورون و متری‌بوزین بر سیب‌زمینی داشت (جدول ۳). آل ابراهیم و همکاران (Alebrahim et al., 2012b) در یک مطالعه گلخانه‌ای گزارش کردند که کاربرد پس‌رویشی متری‌بوزین به میزان یک کیلوگرم ماده مؤثره در هکتار باعث کاهش ۳/۷۵ درصدی وزن خشک سیب‌زمینی شد.

جدول ۲- تأثیر دزهای مختلف علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین بر درصد کاهش وزن خشک سیب‌زمینی.

Table 2. Effect of different dosages of metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin on the percentage reduction in potato dry weight.

Herbicide	Dose (g a.i. ha ⁻¹)	Potato dry weight reduction (%)
Metribuzin	0	0 (± 0.00)
	15.625	14.02 (± 7.37)
	31.25	17.98 (± 6.74)
	62.50	17.98 (± 6.04)
	125	22.32 (± 2.33)
	250	24.13 (± 5.55)
	500	31.30 (± 12.99)
	1000	40.74 (± 11.40)
Halosulfuron	0	0 (± 0.00)
	1.5625	10.33 (± 5.50)
	3.125	15.87 (± 7.28)
	6.25	22.78 (± 3.68)
	12.5	23.36 (± 2.17)
	25	23.76 (± 7.94)
	50	31.33 (± 2.82)
	100	48.06 (± 7.57)
Flumioxazin	0	0 (± 0.00)
	3.91	22.61 (± 10.88)
	7.81	34.79 (± 7.20)
	15.625	34.49 (± 4.13)
	31.25	32.03 (± 13.95)
	62.50	48.45 (± 7.05)
	125	56.60 (± 5.11)
	250	63.75 (± 4.65)
LSD ($P < 0.05$)	-	22.29

مقادیر داخل پرانتز نشانگر خطای استاندارد است.

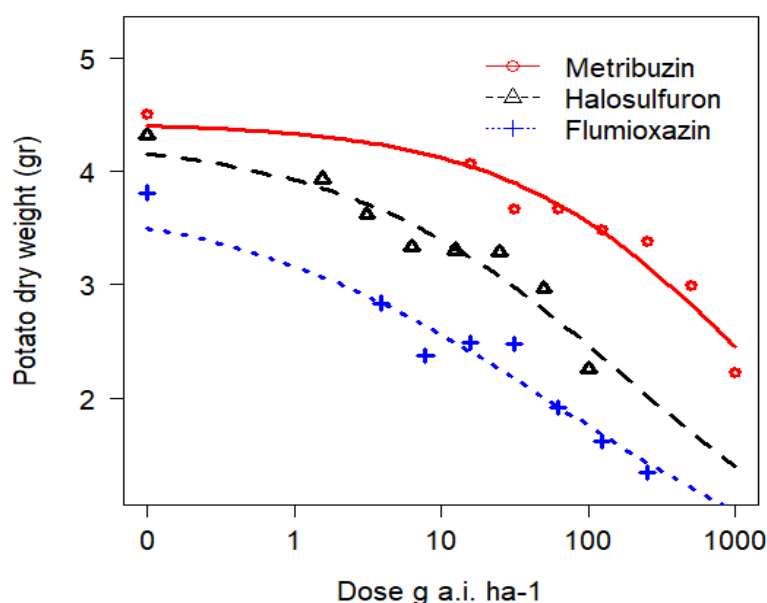
The values in parentheses are standard errors.

جدول ۳- پارامترهای به‌دست‌آمده از تابع لوگ لجستیک سه‌پارامتری برای علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین بر وزن خشک سیب‌زمینی.

Table 3. Estimated parameters of the three-parameter log-logistic equation for metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin on potato dry weight.

Herbicides	b	d	ED ₅₀	Lack of fit
Metribuzin	0.51 (± 0.18)	4.43 (± 0.29)	1516.68 (±728.58)	0.93
Halosulfuron	0.44 (± 0.12)	4.29 (± 0.22)	195.84 (± 93.69)	0.93
Flumioxazin	0.38 (± 0.09)	3.79 (± 0.25)	67.89 (± 32.57)	0.93

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد. b: شیب خط، d: حد بالا و ED₅₀: مقدار دز لازم برای کاهش ۵۰ درصدی وزن خشک سیب‌زمینی. Standard errors in parentheses. b: slope, d: upper limit, and ED₅₀: the dose required to reduce potato dry weight by half.



شکل ۱- تأثیر دزهای مختلف علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین بر وزن خشک سیب‌زمینی.

Figure 1. The effect of different dosages of metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin on potato dry weight.

باشد (جدول ۴). نتایج به دست آمده از کاربرد متری-بوزین بعد از گذشت هشت روز نشان داد که گذشت زمان باعث کاهش میزان ED_{50} پارامترهای مختلف فلورسانس کلروفیل a شد (جدول ۴)؛ به طوری که دز لازم برای کاهش ۵۰ درصدی پارامترهای F_m ، F_o و F_v به ترتیب ۲۲/۱۷، ۱۸۲/۳۲ و ۱۱۱/۸۷ گرم ماده مؤثره در هکتار می‌باشد (جدول ۴).

کاربرد خالص هالوسولفورون در دزهای مختلف روی پارامترهای مختلف فلورسانس کلروفیل a سیب‌زمینی مؤثر بود؛ به طوری که در چهار و هشت روز بعد از کاربرد آن، پارامتر F_o روند صعودی و پارامترهای F_m و F_v در چهار و هشت بعد از کاربرد هالوسولفورون روند نزولی داشت (شکل ۳). کاربرد علف‌کش هالوسولفورون در دزهای ۱۵/۶۴، ۴۰/۶۱، ۳۱/۱۱ گرم ماده مؤثره در هکتار به-ترتیب باعث کاهش ۵۰ درصدی F_o ، F_m و F_v سیب-زمینی چهار روز بعد از کاربرد هالوسولفورون شد

تأثیر علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل

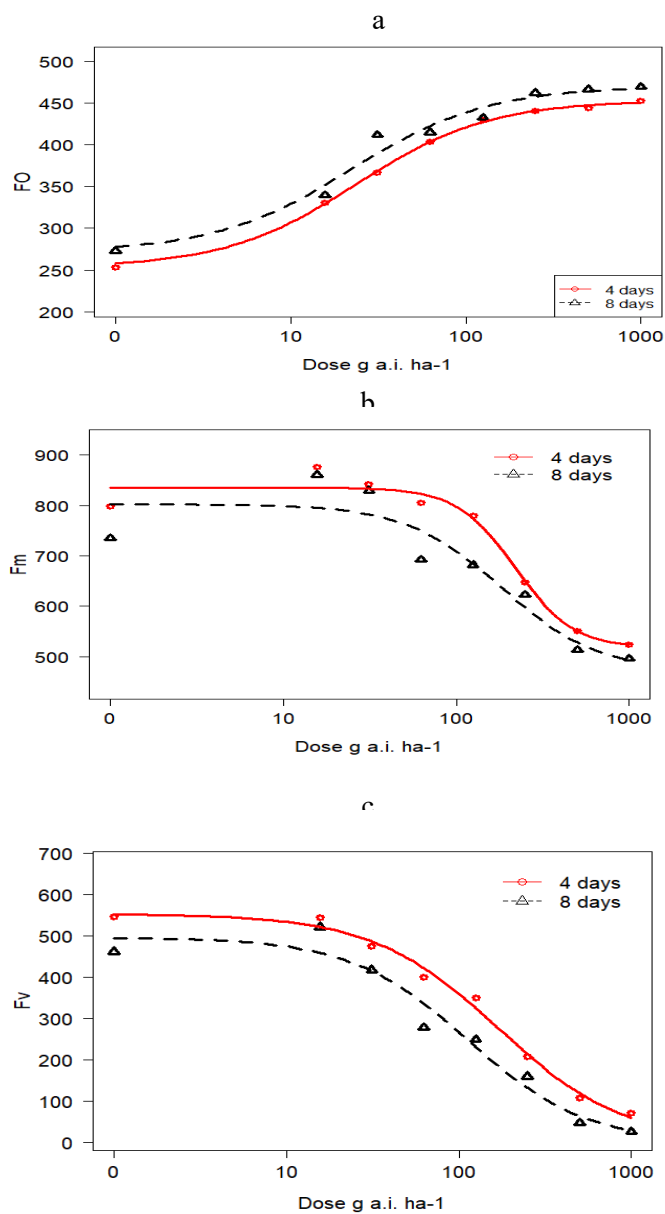
با برآزش داده‌ها به مدل‌های سه و چهار پارامتری لوگ لجستیک به دلیل تخمین ضعیف (معنی‌دار نبودن ED_{50} و معنی‌دار شدن آزمون عدم برآزش)، پارامتر ED_{50} در یک و دو روز بعد از کاربرد علف-کش گزارش نشد. نتایج نشان داد که با افزایش دزهای متری‌بوزین، مقادیر F_o افزایش یافت؛ در حالی که با افزایش دزهای متری‌بوزین، F_m و F_v در چهار و هشت روز بعد از کاربرد متری‌بوزین روند نزولی داشت (شکل ۲). با توجه به مقادیر ED_{50} پارامترها، ملاحظه می‌شود که حداقل دز مورد نیاز برای کاهش ۵۰ درصدی پارامترهای F_o ، F_m و F_v به ترتیب ۲۳/۷۱، ۲۱۸/۳۰ و ۱۶۷/۹۸ گرم ماده مؤثره در هکتار در چهار روز بعد از کاربرد علف‌کش می-

(جدول ۴)؛ درحالی‌که بعد از گذشت هشت روز مقادیر ED_{50} پارامترهای مختلف ذکر شده به ترتیب به میزان‌های ۱۳/۹۴، ۳۲/۷۶ و ۲۲/۲۷ گرم ماده مؤثره در هکتار رسید (جدول ۴).

نتایج نشان داد که با افزایش دزهای فلومیوکسازین، مقادیر F_0 افزایش یافت؛ درحالی‌که با افزایش دزهای متری‌بوزین، F_m و F_v ، در چهار و هشت روز بعد از کاربرد متری‌بوزین روند نزولی داشت (شکل ۴). همان‌طوری‌که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود حداقل میزان دزهای فلومیوکسازین لازم برای کاهش ۵۰ درصدی F_0 ، F_m و F_v سیب‌زمینی چهار روز بعد از کاربرد علف‌کش به ترتیب ۱۳/۶۵، ۶۸/۲۹، ۲۸/۵۹ گرم ماده مؤثره در هکتار و در هشت روز بعد از کاربرد فلومیوکسازین به ترتیب ۱۲/۴۳، ۳۰/۶۹، ۲۳/۳۷ گرم ماده مؤثره در هکتار بود. مقایسه مقادیر ED_{50} علف‌کش‌های مختلف نشان داد که فلومیوکسازین نسبت به هالوسولفورون و متری‌بوزین تأثیر بیشتری بر پارامترهای فلورسانس کلروفیل a داشت.

فلورسانس حداقل بیانگر سطحی از فلورسانس است که در آن پذیرنده کوئینون آ (QA) در شرایط اکسیداسیون کامل قرار دارد (مرکز فتوسیستم II باز هستند). افزایش در میزان فلورسانس اولیه نشانگر تخریب مرکز واکنش فتوسیستم II و تغییر در رنگدانه‌های فتوسیستم II در شرایط تنش باشد (Hanelt, 2018). نور در سطح متوسط باعث تبدیل بخش بیشتر فعالیت‌های فتوشیمیایی به فتوسنتز می‌شود و بخش کمی از انرژی نورانی به‌صورت

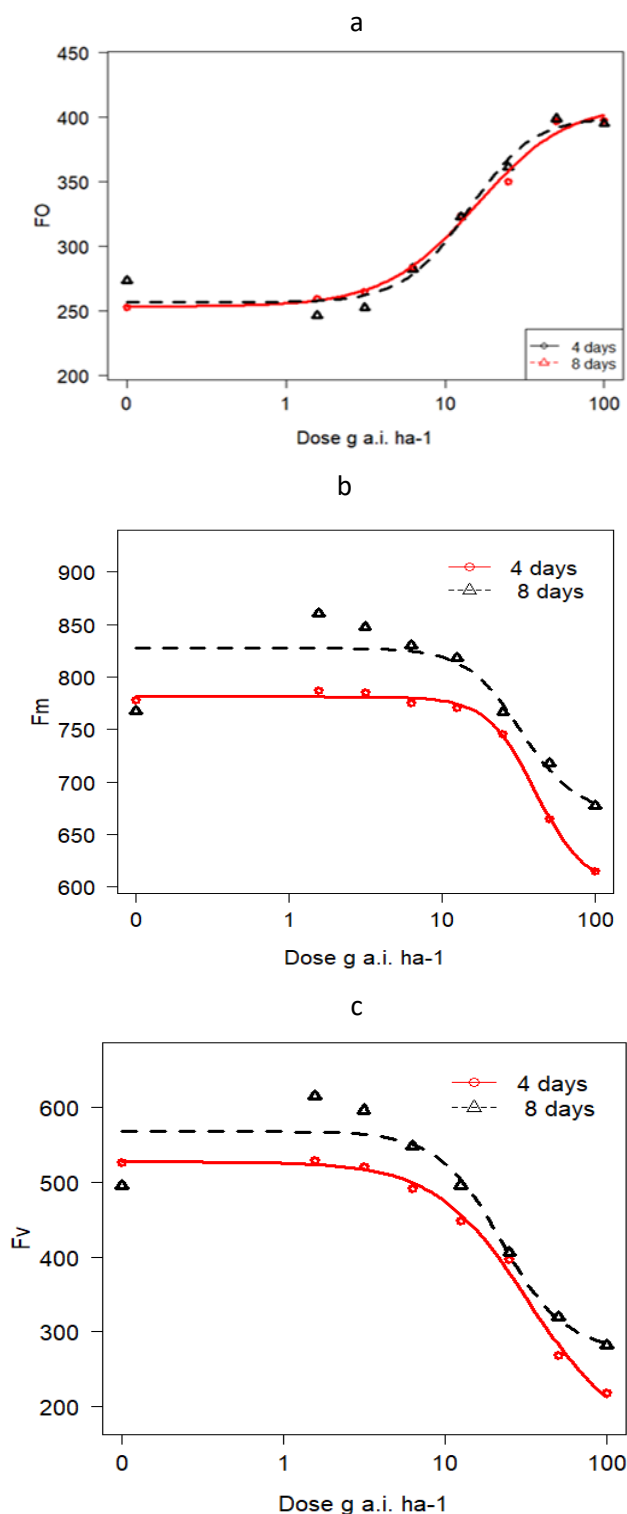
فلورسانس ساطع می‌گردد که به‌عنوان فلورسانس حداقل شناخته می‌شود (Rohacek *et al.*, 2008). درحقیقت، فلورسانس حداقل هر چه کمتر باشد، بدین معناست که فعالیت‌های فتوسنتزی به نحو مطلوبتری در جریان هستند و تثبیت کربن یا به‌عبارتی انتقال الکترون سریعتر آغاز شده است (Lotfi *et al.*, 2022). افزایش فلورسانس حداقل نشان‌دهنده آسیب به زنجیره انتقال الکترون در اثر کاهش ظرفیت کوئینون آ و عدم اکسیداسیون کامل آن به دلیل جریان کند الکترون در طول مسیر فتوسیستم II و در مجموع غیر فعال شدن آن می‌شود (Zlatev & Yordanov, 2004). در واقع افزایش فلورسانس حداقل در نتیجه کاربرد علف‌کش می‌تواند به دلیل کاهش فعالیت فتوسیستم II در اثر تخریب سیستم فتوسنتزی باشد (Cobb & Read, 2010) که در علف‌کش فلومیوکسازین بیشتر اتفاق افتاده است. در اثر ممانعت از انتقال الکترون در فتوسیستم II، گونه‌هایی از اکسیژن فعال تولید می‌شود که این گونه‌های اکسیژن فعال، باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی می‌شوند (Han & Wang, 2002). نتایج نشان داد که فلورسانس حداکثر در اثر کاربرد علف‌کش‌ها کاهش زیادی یافت. کاهش شدید فلورسانس حداکثر در مقادیر بالای علف‌کش می‌تواند به دلیل کاهش فعالیت فتوسیستم II در اثر تخریب سیستم فتوسنتزی باشد (Cobb & Read, 2010; Mehta *et al.*, 2010).



شکل ۲- تأثیر دزهای مختلف متریبوزین بر فلورسانس حداقل

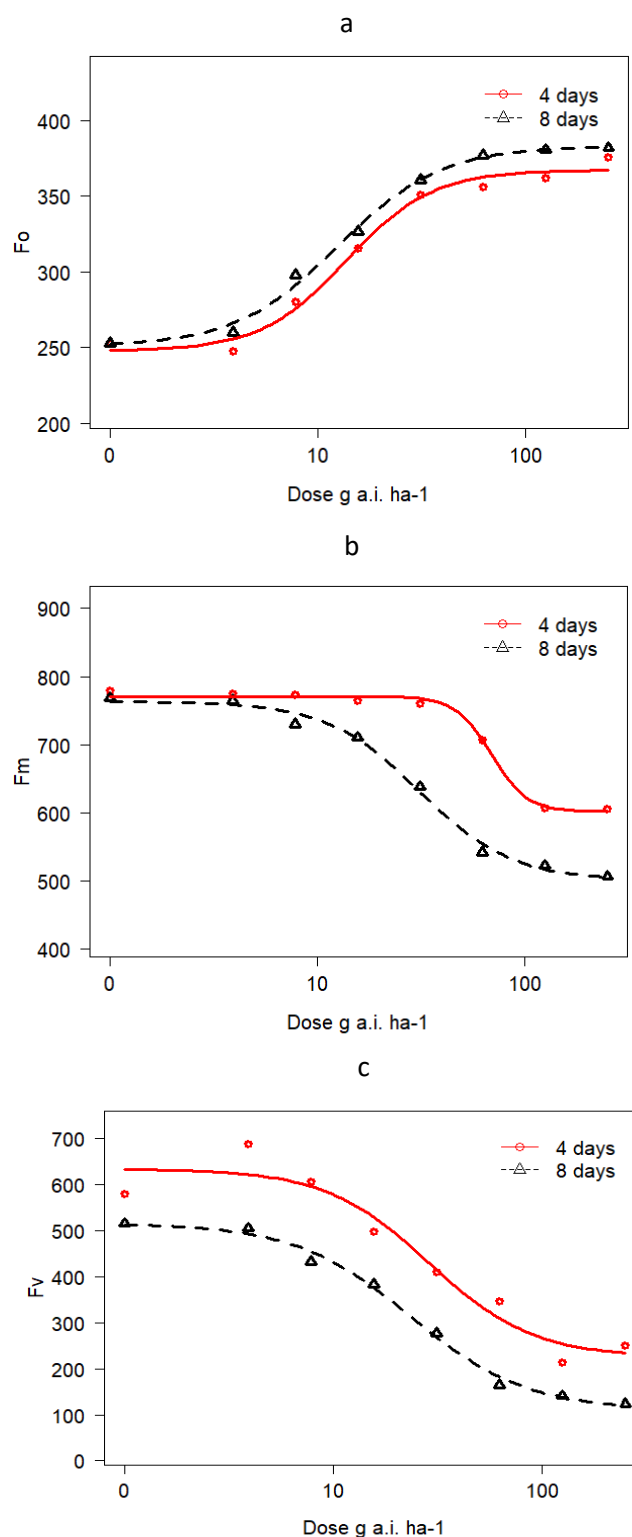
(a)، فلورسانس حداکثر (b) و فلورسانس متغیر (c).

Figure 2. The effect of different metribuzin dosages on minimum fluorescence (a), maximum fluorescence (b), and variable fluorescence (c).



شکل ۳- تأثیر دزهای مختلف هالوسولفورون بر فلورسانس حداقل (a)، فلورسانس حداکثر (b) و فلورسانس متغیر (c).

Figure 3. The effect of different halosulfuron dosages on minimum fluorescence (a), maximum fluorescence (b), and variable fluorescence (c).



شکل ۴- تأثیر دزهای مختلف فلومیوکسازین بر فلورسانس حداقل (a)، فلورسانس حداکثر (b) و فلورسانس متغیر (c).

Figure 4. The effect of different flumioxazin dosages on minimum fluorescence (a), maximum fluorescence (b), and variable fluorescence (c).

جدول ۴- پارامترهای به‌دست‌آمده از تابع لوگ لجستیک سه و چهار پارامتری برای فلورسانس کلروفیل *a* سیب‌زمینی چهار و هشت روز پس از کاربرد متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلومیوکسازین.

Table 4. Estimated parameters of the three- and four-parameter log-logistic equations for metribuzin, halosulfuron, and flumioxazin on fluorescence chlorophyll *a* parameters at 4 and 8 days after treatment.

Metribuzin (4 days after treatment)					
Parameters	b	c	d	ED ₅₀	Lack of fit
F _o	-1.15 (± 0.53)	252.82 (± 21.50)	452.99 (± 19.25)	23.71 (± 8.42)	0.99
F _m	2.54 (± 1.41)	516.90 (± 47.71)	835.34 (± 23.66)	218.30 (± 49.35)	0.11
F _v	1.17 (± 0.19)	-	553.35 (± 29.55)	167.98 (± 29.36)	0.50
Metribuzin (8 days after treatment)					
F _o	-1.11 (± 0.70)	271.66 (± 24.17)	470.02 (± 25.21)	22.17 (± 9.41)	0.99
F _m	1.54 (± 0.53)	470.88 (± 59.70)	802.20 (± 26.29)	182.32 (± 75.75)	0.11
F _v	1.27 (± 0.17)	-	496.35 (± 26.00)	111.87 (± 20.40)	0.50
Halosulfuron (4 days after treatment)					
F _o	-1.50 (± 0.90)	253.07 (± 18.14)	410.33 (± 35.62)	15.64 (± 7.48)	0.98
F _m	2.75 (± 2.46)	600.80 (± 69.69)	781.20 (± 15.53)	40.61 (± 16.32)	0.67
F _v	1.55 (± 0.87)	167.75 (± 108.09)	526.57 (± 25.97)	31.11 (± 15.26)	0.54
Halosulfuron (8 days after treatment)					
F _o	-2.14 (± 1.08)	256.27 (± 14.56)	399.86 (± 22.12)	13.94 (± 4.67)	0.98
F _m	2.40 (± 1.78)	669.88 (± 55.23)	827.49 (± 15.50)	32.76 (± 17.25)	0.67
F _v	2.19 (± 0.94)	274.64 (± 46.84)	567.17 (± 20.67)	22.27 (± 6.35)	0.54
Flumioxazin (4 days after treatment)					
F _o	-2.10 (± 1.30)	247.64 (± 18.10)	367.19 (± 14.99)	13.65 (± 4.88)	0.99
F _m	4.97 (± 12.09)	601.78 (± 47.36)	771.04 (± 22.83)	68.29 (± 21.88)	0.99
F _v	1.74 (± 0.79)	225.60 (± 66.87)	633.37 (± 46.02)	28.59 (± 12.02)	0.94
Flumioxazin (8 days after treatment)					
F _o	-1.75 (± 0.90)	250.83 (± 19.58)	382.98 (± 15.71)	12.43 (± 4.74)	0.99
F _m	1.94 (± 1.55)	500.96 (± 49.10)	763.18 (± 37.91)	30.69 (± 12.01)	0.99
F _v	1.56 (± 0.94)	110.44 (± 67.70)	515.29 (± 57.48)	23.37 (± 10.03)	0.94

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده خطای استاندارد می‌باشد. b: شیب خط، c: حد پایین، d: حد بالا، ED₅₀: مقدار دز لازم برای کاهش ۵۰ درصدی وزن خشک سیب‌زمینی، F_o: فلورسانس حداقل، F_m: فلورسانس حداکثر و F_v: فلورسانس متغیر.

Standard errors in parentheses. b: slope, c: lower limit, d: upper limit, ED₅₀: the dose required to reduce potato dry weight by half, F_o: minimum fluorescence, F_m: maximum fluorescence, and F_v: variable fluorescence.

کرد. بیشتر بودن F_v نشان‌دهنده عملکرد خوب مکانیسم فلورسانس کلروفیل a در شرایط تنش و کاهش سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی است (Baker & Rosenqvist, 2004). کاهش ظرفیت انتقال الکترون توسط متری‌بوزین منجر به افت شدید فلورسانس متغیر می‌شود (Hess, 2000).

استریگ و تیچر (Streibig & Teicher, 2006) گزارش کردند که مرگ بسیاری از گیاهان در اثر کاربرد علف‌کش‌های بازدارنده ACCase، HPPD، PDS و EPSPS تولید اکسیژن‌های فعال می‌باشد ولی مرگ گیاهان بازدارنده‌های ALS در اثر تولید اکسیژن فعال و پراکسیداسیون لپیدی نمی‌باشد. با توجه به اینکه هالوسولفورون، یک بازدارنده ALS است، اثرات غیر مستقیم آن بیشتر از طریق تغییر در متابولیسم گیاهان و اختلال در فرآیندهای بیوشیمیایی می‌باشد. هالوسولفورون با مهار آنزیم ALS که در مسیر سنتز آمینواسیدهای ضروری مانند لوسین، ایزولوسین و والین نقش دارد، باعث اختلال در رشد گیاهان می‌شود. این آمینواسیدها برای ساخت پروتئین‌های ضروری در گیاهان (از جمله آنزیم‌ها و پروتئین‌های فتوسنتزی) اهمیت دارند. کاهش سطح این آمینواسیدها می‌تواند به کاهش ساخت پروتئین‌های فتوسنتزی، مانند ATP سنتاز و پروتئین‌های فتوسیستم II، منجر شود که بر کارایی فتوسنتز تأثیر می‌گذارد. علف‌کش‌های سولفونیل-اوره از جمله هالوسولفورون می‌تواند به‌طور غیر مستقیم بر ساختار و عملکرد فتوسیستم‌های I و II تأثیر بگذارد. این اثر به‌واسطه کاهش تولید پروتئین‌های ضروری برای تشکیل فتوسیستم‌ها،

به‌طور کلی، فلورسانس پس از حدود یک میکرو ثانیه از زمان تابش تا سطح اولیه (F_0) افزایش می‌یابد که این سطح، در زمانی که پذیرنده‌های الکترون تا فتوسیستم II کاملاً اکسید شده‌اند، نشان‌دهنده گسیل فلورسانس می‌باشد (Norsworthy *et al.*, 1998). بر اثر تابش فوتون‌های نوری، تمام ناقل‌های الکترون به فرم احیا درمی‌آیند و تمام مراکز واکنش بسته می‌شوند. فلورسانس کلروفیل a در این زمان، نشانگر فلورسانس حداکثر (F_m) است (Mehta *et al.*, 2010). افزایش فلورسانس از F_0 تا F_m نشان‌دهنده افزایش فعالیت فتوسیستم II است که ناشی از انتقال سریع‌تر الکترون‌ها و افزایش کارایی فتوسنتزی است. کاهش پلاستوکوئینون در این فرآیند نقش مهمی دارد و این تغییرات می‌توانند به‌عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی کارایی فتوسنتز استفاده شوند (Norsworthy *et al.*, 1998). در اثر کاربرد علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین، فلورسانس حداکثر کاهش پیدا می‌کند. کاهش میزان F_m در اثر کاربرد علف‌کش‌ها ناشی از کاهش فعالیت فتوسیستم II در اثر تخریب سیستم فتوسنتزی باشد (Cobb & Read, 2010). با عنایت به اینکه، متری‌بوزین از علف‌کش‌های بازدارنده فتوسیستم II می‌باشد، مانع انتقال الکترون از دهنده الکترون (Q_A) به حامل متحرک الکترون (Q_B) می‌شود (Devine & Shukla, 2000). فلورسانس متغیر (F_v) که از تفاضل F_m و F_0 محاسبه می‌شود، در اثر کاربرد علف‌کش‌های متری‌بوزین، هالوسولفورون و فلوئوکسازین کاهش پیدا

کاهش سطح کلروفیل و در نتیجه اختلال در جذب نور و فرآیندهای انتقال الکترون‌ها در سیستم فتوستنز ایجاد می‌شود. این تغییرات منجر به کاهش کارایی فتوستنز و کاهش میزان تولید انرژی در گیاه می‌شود (Monaco & Creech, 2004). شایان ذکر است که بازدارنده‌های سنتز اسید آمینه با کاهش رشد ریشه‌ها، می‌تواند تأثیرات غیر مستقیم بر جذب آب و مواد غذایی، از جمله عناصر مغذی مهم برای فتوستنز (مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم) بگذارد. این کاهش در جذب مواد مغذی باعث می‌شود که گیاه نتواند به‌طور مؤثر فرآیندهای فتوستنزی خود را انجام دهد (Duke et al., 2012; Saudy et al., 2021). به‌طور کلی، اثر غیر مستقیم هالوسولفورون بر فتوستنز عمدتاً از طریق مهار مسیرهای بیوشیمیایی حیاتی، تغییرات در عملکرد فتوسیستم‌ها، و اختلال در رشد ریشه‌ها ایجاد می‌شود. این اثرات موجب کاهش کارایی فتوستنز و در نهایت آسیب به رشد و عملکرد گیاه می‌شوند. از سویی دیگر، فلومیوکسازین نیز از بازدارنده‌های PPO می‌باشد. این آنزیم در بیوستنز هم در کلروفیل *a* شرکت دارد و سبب تبدیل پروتوپورفیرینون‌اکسیداز به پروتوپورفیرین می‌شود. زمانی که آنزیم PPO توسط علف‌کش بازداشته می‌شود پروتوپورفیرین تجمع پیدا می‌کند. پروتوپورفیرین در اثر جذب نور، رادیکال‌های آزاد را ایجاد می‌کند و باعث پراکسیداسیون لیپیدی و تخریب سلول می‌شود (Duke et al., 1994). با توجه به مطالب بالا، کاهش پارامترهای فلورسانس کلروفیل *a* در اثر کاربرد متری‌بوزین و فلومیوکسازین احتمالاً ناشی از تولید رادیکال‌های

آزاد و پراکسیداسیون لیپیدی می‌باشد (Matringe et al., 1989). رادیکال‌های آزاد باعث پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی می‌شوند که این فرآیند منجر به آسیب غشای تیلاکوئیدی در کلروپلاست‌ها می‌شود. این غشاها محل اصلی عملکرد فتوسیستم II و سایر فرآیندهای فتوستنزی هستند. درحالی‌که هالوسولفورون با تأثیر غیر مستقیم بر فتوستنز عمدتاً از طریق مهار مسیرهای بیوشیمیایی حیاتی، تغییرات در عملکرد فتوسیستم‌ها، و اختلال در رشد ریشه‌ها، باعث کاهش عملکرد فتوسیستم II می‌شود.

به نظر می‌رسد در میان پارامترهای مورد بررسی، پارامتر فلورسانس متغیر شاخص جامع‌تری به منظور ارزیابی تأثیر علف‌کش‌ها بر کارایی فتوسیستم II باشد. فلورسانس اولیه زمانی اندازه‌گیری می‌شود که تمام مراکز واکنش فتوسیستم II باز باشند. بنابراین افزایش آن ممکن است نشان‌دهنده تخریب یا اختلال در ساختار فتوسیستم II باشد، اما به‌تنهایی شاخص دقیقی برای عملکرد فتوسیستم نیست. فلورسانس حداکثر نیز زمانی اندازه‌گیری می‌شود که فتوسیستم II به‌طور کامل بسته باشد. کاهش آن معمولاً به‌تنهایی اطلاعات کافی در مورد کارایی فتوسیستم II ارائه نمی‌دهد. فلورسانس متغیر که از تفاوت فلورسانس حداکثر و حداقل به‌دست می‌آید، اطلاعاتی در مورد توانایی انتقال الکترون در فتوسیستم II ارائه می‌دهد، اما نسبت به فلورسانس حداقل و حداکثر شاخص جامع‌تری است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که علف‌کش فلومیوکسازین نسبت به علف‌کش‌های متری‌بوزین و هالوسولفورون تأثیر بیشتری بر وزن خشک سیب‌زمینی ایجاد کرد. به‌طوری‌که کاربرد دزهای ۱۲۵ و ۲۵۰ گرم ماده مؤثره در هکتار فلومیوکسازین باعث کاهش بیش از ۵۶ درصد شد. همچنین، کاربرد هالوسولفورون با دز ۱۰۰ گرم ماده مؤثره در هکتار نیز کاهش ۴۸ درصدی وزن خشک سیب‌زمینی را به دنبال داشت. با توجه به مقادیر ED_{50} پارامترهای فلورسانس کلروفیل، علف‌کش‌های فلومیوکسازین و هالوسولفورون نسبت به متری‌بوزین باعث کاهش شدید پارامترهای فلورسانس کلروفیل a شد. بنابراین با توجه به تأثیر منفی فلومیوکسازین بر وزن خشک سیب‌زمینی، پیشنهاد می‌شود که دز این علف‌کش در مزارع سیب‌زمینی به دقت کنترل شود تا آسیب‌های ناشی از آن کاهش یابد. همچنین با توجه به اینکه در آزمایش‌های گلخانه‌ای، به دلیل وجود تنش‌های محیطی کمتر (از جمله رقابت محدود و تأثیرات خارجی کمتر)، گیاهان ممکن است به دزهای

پایین‌تر یا حتی دزهای توصیه‌شده حساسیت بیشتری نشان دهند. بنابراین، آزمایش‌های گلخانه‌ای تنها به عنوان مرحله اولیه در تعیین دزهای مناسب محسوب می‌شوند و برای اعتبارسنجی نهایی و به‌دست‌آوردن نتایج قطعی، ضروری است که آزمایش‌ها در شرایط مزرعه‌ای انجام شوند، جایی که عوامل محیطی واقعی و رقابت با علف‌های هرز نیز مد نظر قرار گیرند. به‌طور کلی، تأثیرات منفی دزهای توصیه‌شده در شرایط مزرعه‌ای معمولاً کمتر از شرایط گلخانه‌ای خواهد بود، چرا که شرایط واقعی مزرعه ممکن است اثرات تعدیل‌کننده‌ای را بر نتایج داشته باشند. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای تعیین دزهای بهینه و مؤثر، انجام آزمایش‌های میدانی در شرایط واقعی الزامی است. با توجه به اثرات منفی این علف‌کش‌ها بر سیستم فتوسنتزی گیاهان، توصیه می‌شود از ترکیب علف‌کش‌ها با مواد آنتی‌اکسیدان یا سایر ترکیبات محافظ برای کاهش آسیب‌های اکسیداتیو و بهبود کارایی فتوسنتز استفاده شود. این روش‌ها می‌توانند به بهبود سلامت گیاهان در برابر علف‌کش‌ها کمک کنند.

منابع

- Abbaspoor, M. and 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(6): 576-585.
- Alebrahim, M.T. Majd, R. Rashed Mohassel, M.R. Wilcockson, S. Baghestani, M.A. Ghorbani, R. and Kudsk, P. 2012a. Evaluating the efficacy of pre-and post-emergence herbicides for controlling *Amaranthus retroflexus* L. and *Chenopodium album* L. in potato. *Crop Protect.* 42: 345-350.
- Alebrahim, M.T. Rashed Mohassel, M.H. Wilcockson, S. Baghestani, M.A. Ghorbani, A. and Seragchi, M. 2012b. Evaluating of some herbicides for Lambsquarter and prostrate pigweed control in potato fields. *Electronic J. of Crop Product.* 6(1): 19-37.
- Alebrahim, M.T. Samadi-Kalkhoran, E. and Tseng, T.M.P. 2022. Joint action of herbicides on weeds and their risk assessment on earthworm (*Eisenia fetida* L.). In *New Insights in Herbicide Science*. Intech publisher.

- Asada, K. 2006. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiol.* 141: 391–396
- Baker, N.R. and Rosenqvist, E. 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *J. of Exp. Bot.* 55: 1607-1621.
- Boydston, R.A. 2007. Potato and weed response to post-emergence-applied halosulfuron, rimsulfuron, and EPTC. *Weed Technol.* 21(2): 465-469.
- Chitband, A.A. Ghorbani, R. Rashed Mohassel, M.H. Baghestani, M.A. and Nabizadeh, M. 2017. Using florescence induction curve on the control of *Amaranthus retroflexus* and *Solanum nigrum*. *Iran. J. of Weed Sci.* 12: 151-169.
- Cobb, A.H. and Reade, P.H.R. 2010. *Herbicides and plant physiology*, 2nd ed. Wiley Blackwell Publication. New York. 286 Pp.
- Colquhoun, J.B. Heider, D.J. and Rittmeyer, R.A. 2021. Potato injury risk and weed control from reduced rates of PPO-inhibiting herbicides. *Weed Technol.* 35(4): 635-637
- Correia, N.M. and Carvalho, A.D. 2019. Herbicide selectivity for potato crop. *Hort. Brasileira* . 37(3): 302-308.
- Da Silva, M.M. Almeida, E.I.B. De Sousa, A.M. Ponte, I.S. Ribeiro, B.S.B. De Sousa, D.L. De Sousa, A.C. Da Silva Sousa, W. De Oliveira, L.B.T. and Souza, J.B.C. 2024. Pre-emergence herbicides effects in no-till soybean system with *Panicum maximum* 'BRS Tamani'. *Australian J. Crop Sci.* 18(1): 21-28.
- Devine, M.D. and Shukla, A. 2000. Altered target sites as a mechanism of herbicide resistance. *Crop Protec.* 19(8): 881-889.
- Duke, S.O. Lydon, J. Koskinen, W.C. Moorman, T.B. Chaney, R.L. and Hammerschmidt, R. 2012. Glyphosate effects on plant mineral nutrition, crop rhizosphere microbiota, and plant disease in glyphosate-resistant crops. *J. of Agri. and Food Chem.* 60(42): 10375-10397.
- Duke, S.O. Nandihalli, U.B. Lee, H.I. and Duke, M.V. 1994. Protoporphyrinogen oxidase as the optimal herbicide site in the porphyrin pathway. In: Duke, S.O. Rebiz, C.A. *Porphyrin pesticides*. ACS Series 559, American Chemical Society, Washington, DC, pp. 191-204
- Garkhal, K. Nath, S. and Singh, R. 2024. Weed dynamics and maize productivity as influenced by sole and tank mix application of herbicides. *Indian J. of Weed Sci.* 56(1): 80–83.
- Han, Y.C. and Wang, C.Y. 2002. Physiological basis of bentazon tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) lines. *Weed Biol. Manage.* 2(4): 186–193.
- Hanelt, D. 2018. Photosynthesis assessed by chlorophyll fluorescence. In *Bioassays* (pp. 169-198). Elsevier.
- Hassannejad, S. Lotfi, R. Ghafarbi, S.P. Oukarroum, A. Abbasi, A. Kalaji, H.M. and Rastogi, A. 2020. Early identification of herbicide modes of action by the use of chlorophyll fluorescence measurements. *Plants.* 9(4): 529.
- Hess, F.D. 2000. Light-dependent herbicides: An overview. *Weed Sci.* 48(2): 160-170.
- Hutchinson, P.J. Boydston, R.A. Ransom, C.V. Tonks, D.J. and Beutler, B.R. 2005. Potato variety tolerance to flumioxazin and sulfentrazone. *Weed Technol.* 19(3): 683-696.
- Jabran, K. Ahmad, T. Siddiqui, A.O. Üremiş, İ. and Doğan, M.N. 2023. Weed management in potato. In *Potato Production Worldwide* (pp. 121-131). Academic Press.
- Kaur, P. Kaur, J. and Kaur, H. 2023. Ultimate fate of halosulfuron methyl and its effects on enzymatic and microbial activities in three differently textured soils. *Pedosphere.* 33(6): 880-892.
- Khatami, S.A. Alebrahim, M.T. and 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

- Lotfi, R. Abbasi, A. Kalaji, H.M. Eskandari, I. Sedghieh, V. Khorsandi, H. Sadeghian, N. Yadav, S. and Rastogi, A. 2022. The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiol. and Biochem.* 182: 45-54.
- MAJ. 2023. Crop production. Agriculture of statistic database. Agriculture products. Ministry of Jihad-e-Agric. 1.137. Available online at <http://amar.maj.ir/Portal/Home/Default.aspx?CategoryID=117564e0-507c-4565-9659-fbabfb4acb9b>.
- Mamnoie, E. Karaminejad, M.R. Sabeti, P. Bahrouzi, D. Minbash Moeini, M. and Mojab, M. 2024. Comparison of fenoxaprop-p-ethyl+ metribuzin herbicide with some common herbicides in wheat (*Triticum aestivum* L.) fields. *J. of Crop Product.* 17(1): 145-168.
- Matringe, M. Camadro, J.M. Labbe, P. and Scalla, R. 1989. Protoporphyrinogen oxidase as a molecular target for diphenyl ether herbicides. *Biochem. J.* 260(1): 231-235.
- Mehta, P. Jajoo, A. Mathur, S. and Bharti, S. 2010. Chlorophyll *a* fluorescence study revealing effects of high salt stress on photosystem II in wheat leaves. *Plant Physiol. Biochem.* 48: 16-20.
- Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Sci.* 7: 405-410.
- Monaco, T.A. and Creech, J.E. 2004. Sulfosulfuron effects on growth and photosynthesis of 15 range grasses. *J. of range manag.* 57(5): 490-496.
- Nassar, A.K. Ibade, K.W. and Karakoç, O.C. 2024. Weed management in potato crops using herbicide metribuzin in integration with agronomic operations. *Sabrao J. Breed. Genet.* 56(3): 1236-1243.
- Norsworthy, J.K. Talbert, R.E. and Hoagland, R.E. 1998. Chlorophyll fluorescence for rapid detection of propanil-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Weed Sci.* 46(2): 163-169.
- Pigatto, C.S. Tarouco, C.P. Nicoloso, F.T. Berghetti, Á.L.P. Leães, G.P. Werle, I.S. and Ulguim, A.D.R. 2020. Barnyardgrass control using tank-mixed herbicides with saflufenacil and its influence in photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Ciência Rural.* 50:e20190919.
- Quan, L. Chen, K. Chen, T. Li, H. Li, W. Cheng, T. and Jiang, W. 2023. Monitoring weed mechanical and chemical damage stress based on chlorophyll fluorescence imaging. *Frontiers in Plant Sci.* 14: 1188981.
- Randell-Singleton, T. Hand, L.C. Vance, J.C. Wright-Smith, H.E. and Culpepper, A.S. 2024. Confirming resistance to PPO-inhibiting herbicides applied pre-emergence and post-emergence in a Georgia Palmer amaranth population. *Weed Technol.* 38(23): 1–10.
- Ritz, C. Baty, F. Streibig, J.C. and Gerhard, D. 2015. Dose-response analysis using R. *Plos One.* 10(12): e0146021.
- Roeb, J. Peteinatos, G.G. and Gerhards, R. 2015. Using sensors to assess herbicide stress in sugar beets. Pages 563–570 in Stafford JV, ed. *Precision Agriculture'15*. Netherlands: Wageningen Academic Publishers
- Rohacek, K. Soukupova, J. and Bartak, M. 2008. Chlorophyll fluorescence: A wonderful tool to study plant physiology and plant stress. *Plant cell compartments selected topics. Res. Signpost.* 41-104.
- Roháček, K. Soukupová, J. and 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, p. 104.
- Samadi Kalkhoran, E. Alebrahim, M.T. Mohammad Doust Chamn Abad, H.R. Streibig, J.C. Ghavidel, A. and Tseng, T.M.P. 2022. The survival response of earthworm (*Eisenia fetida* L.) to individual and binary mixtures of herbicides. *Toxics.* 10(6): 320.

- Samadi-Kalkhoran, E. Alebrahim, M.T. Mohammad Doust Chaman Abad, H.R. Streibig, J.C. Ghavidel, A. and 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.
- Saudy, H.S. El-Metwally, I.M. and Shahin, M.G. 2021. Co-application effect of herbicides and micronutrients on weeds and nutrient uptake in flooded irrigated rice: Does it have a synergistic or an antagonistic effect? Crop Protec. 149: 105755.
- Siddiqui, A.O. Işık, D. and Jabran, K. 2024. Impact of weed competition on morphological and biochemical traits of potato: A Review. Potato Res. 67: 451–462
- Streibig, J.C. and Jensen, J.E. 2000. Actions of herbicides in mixtures. In herbicides and their mechanisms of action. CRC Press Lnc. p. 153–180.
- Streibig, J.C. and Teicher, H.B. 2006. Herbicide action and the demise of plants. The Annual Meeting of the Weed Science Society of America. Pp. 72-73.
- Varah, A. Ahodo, K. Childs, D.Z. Comont, D. Crook, L. Freckleton, R.P. and Norris, K. 2024. Acting pre-emptively reduces the long-term costs of managing herbicide resistance. Sci. Rep. 14(1): 6201.
- Zlatev, Z.S. and Yordanov, I.T. 2004. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. Bulgarian J. of Plant Physiol. 30(3-4): 3-18.