



Drone-based weed control in transplanted rice under different irrigation systems

Maryam Ashouri^{1✉}, Bijan Yaghoubi², Madadali Rostami³

1. Corresponding Author, Department of Plant Protection, Rice Research Institute of Iran, Agriculture Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. E-mail: m_ashouri.phd@guilan.ac.ir
2. Department of Plant Protection, Rice Research Institute of Iran, Agriculture Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. E-mail: b.yaghoubi@areeo.ac.ir
3. Department of Organization and Improvement of Machinery Utilization Systems, Center for Industry Development and Mechanization, Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran. E-mail: 2630342859@iau.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Considering the increasing use of spraying drones in agriculture, this study aimed to evaluate the effects of irrigation method and spray carrier volume on the efficacy of drones in weed control in transplanted rice cultivation, using a premixed herbicide containing cyhalofop-butyl + penoxsulam (150 g a.i. ha ⁻¹ , OD 6%). The experiment was conducted as a split-plot arrangement of treatments, with the main factor being two irrigation methods (continuous flooding and intermittent irrigation) and the sub-factor consisting of five carrier volumes (10, 20, 40, 80, and 160 L ha ⁻¹). Control treatments included a conventional backpack sprayer (350 L ha ⁻¹), an untreated control, and manual weeding. Logistic regression models indicated that the spray carrier volume required for a 90% reduction in weed biomass under continuous flooding was 14.13 and 15.6 L ha ⁻¹ for <i>Echinochloa crus-galli</i> and <i>Bolboschoenus planiculmis</i> , respectively, while under intermittent irrigation, the values were 24.06 and 58.02 L ha ⁻¹ , respectively. The highest economic yield was obtained under continuous flooding (4331 kg ha ⁻¹) at a carrier volume of 20 L ha ⁻¹ and under intermittent irrigation (3874 kg ha ⁻¹) at 80 L ha ⁻¹ , with no statistically significant difference compared to higher carrier volumes, backpack spraying, or manual weeding. Given the more than 90% weed damage observed in the untreated control and the satisfactory efficacy of drone spraying, aerial application is recommended due to labor shortages and higher operational speed.
Article history: Received: 13 August 2025 Revised: 6 October 2025 Accepted: 7 October 2025 Published online: Autumn and Winter 2024	
Keywords: <i>Cyhalofop-butyl + penoxsulam</i> herbicide, Foliar application, Spray carrier volume, Unmanned aerial vehicles.	
Cite this article: Ashouri, M., Yaghoubi, B. & Rostami, M. (2024). Drone-based weed control in transplanted rice under different irrigation systems. <i>Iranian Journal of Plant Protection Science</i> , 55 (2), 411-437. DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.400526.1007090	
	
© The Author(s). DOI: https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.400526.1007090	Publisher: The University of Tehran Press.

Extended Abstract

Introduction

The adoption of spraying drones as an advanced, intelligent technology offers a strategic response to labor shortages and economic challenges in rice production. In addition to improving operational efficiency, these systems enhance input use efficiency and reduce environmental impacts, thereby supporting sustainable agricultural practices. Nevertheless, despite their growing adoption among Iranian farmers, empirical evidence on the effectiveness of drones in weed management relative to conventional backpack sprayers remains limited. While backpack sprayers in transplanted rice systems typically apply herbicides at carrier volumes of 150–350 L ha⁻¹, aerial drone applications are often conducted at much lower volumes—approximately 10 L ha⁻¹—without sufficient scientific validation. To address this gap, the present study aimed to (1) assess the impact of carrier volume on the efficiency of drone-based herbicide applications for weed control in rice, and (2) determine the optimal spray volume under flooded and non-flooded irrigation regimes in northern Iran.

Method

The experiment was conducted during the 2024 growing season at the Rice Research Institute of Iran (Rasht) using a split-plot arrangement in a randomized complete block design with four replications. The post-emergence herbicide cyhalofop-butyl + penoxsulam (OD 6%) was applied as the treatment. Main plots were assigned to two irrigation regimes—continuous flooding and intermittent irrigation—while subplots comprised five drone spray carrier volumes (10, 20, 40, 80, and 160 L ha⁻¹). Additional treatments included a conventional backpack sprayer at 350 L ha⁻¹, hand weeding, and an untreated control. The main plots (90 × 18 m) and subplots (45 × 9 m) were designed according to the UAV spraying width, with buffer zones equal in size to the subplots established between them. Smaller untreated control plots (3 × 3 m) were randomly placed within these buffer zones and protected with plastic covers to prevent herbicide drift, which were removed two hours after spraying. Spraying was performed using a hexacopter drone (Model S10) and a battery-powered Matabi backpack sprayer. Treatment effects were evaluated based on visual assessments of weed control and destructive sampling for weed biomass, weed density, rice grain yield, and yield components. Data were analyzed using the GLM procedure in SAS 9.4, with ANOVA appropriate for the split-plot design to assess the effects of irrigation method, spray carrier volume, and their interaction. Due to significant interactions for most variables, nonlinear regression models were fitted in SigmaPlot 15 to identify best-fitting functions describing weed response and rice performance under different treatments. Weed density and biomass, as well as rice biomass, biological yield, and grain yield, were all fitted using four-parameter logistic models.

Results

The results showed that the density of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) and bulrush (*Bolboschoenus planiculmis*), as well as rice yield, were significantly affected by irrigation method, carrier volume, and their interaction. Increasing carrier volume reduced weed density and biomass while increasing rice yield; however, the effect of carrier volume was more pronounced under continuous flooding than under intermittent irrigation. Under intermittent irrigation, the average carrier volume required to achieve 50% and 90% biomass reduction was nearly twice as high for barnyardgrass, while for bulrush, it was about twice as high for 50% reduction and approximately four times higher for 90% reduction than under continuous flooding. Therefore, bulrush exhibited greater tolerance to the herbicide compared to barnyardgrass, requiring, on average, approximately 36% more carrier volume to achieve 50% biomass reduction under intermittent irrigation and about 55% more under continuous flooding. Rice biomass, biological yield, and economic yield under continuous flooding reached the median biological response level at a lower carrier volume than under intermittent irrigation. Logistic model analysis indicated that the maximum statistically significant economic yield occurred at carrier volumes of 80 L ha⁻¹ under intermittent irrigation and 20 L ha⁻¹ under continuous flooding, representing an approximate 11.3% yield reduction in intermittent irrigation compared with continuous flooding. No statistically significant differences were observed in the evaluated parameters between carrier volumes of 20, 40, 80, and 160 L ha⁻¹ under continuous flooding, and between 80 and 160 L ha⁻¹ under intermittent irrigation, when compared with the conventional backpack sprayer. However, relative to hand weeding, these treatments showed a 26% and 9% lower efficacy for barnyardgrass biomass suppression under intermittent and continuous flooding, respectively, and a 30% lower efficacy for bulrush biomass suppression under intermittent irrigation. Across treatments, the maximum economic yield at the optimal carrier volumes under continuous flooding and intermittent irrigation was 4331 and 3914 kg ha⁻¹, respectively, indicating an approximate 10% reduction in yield under intermittent irrigation.

Conclusions

In post-emergence herbicide applications, this study demonstrated that applying cyhalofop-butyl + penoxsulam under flooded conditions resulted in significantly more effective weed control than under drained conditions. This enhanced efficacy is attributed to the physicochemical properties of the oil-based OD formulation, which improve herbicide stability, ensure uniform spread, and facilitate penetration in water-saturated environments, thereby increasing absorption through aerial plant tissues. In addition, physiological stresses induced by flooding—such as hypoxia, toxic gas accumulation, and restricted root growth—further weaken weed vigor and enhance their susceptibility to herbicidal action. Collectively, these factors contributed to superior weed suppression, reduced required spray carrier volumes, and improved biological and economic performance of rice under the specific agro-climatic conditions of northern Iran.

Given that increased spray carrier volumes do not compromise herbicide efficacy or crop yield, the adoption of higher application carrier volumes is advisable, particularly for high-biomass improved rice cultivars. Moreover, when formulation compatibility and technical justification are ensured, the concurrent or sequential application of herbicides with fungicides or insecticides using drones is recommended under appropriate conditions.

The drone sprayer demonstrated performance comparable to conventional backpack sprayers, with no significant differences in weed control efficacy or rice yield between methods. Additionally, due to higher application speed, lower water consumption for spray preparation, and reduced manual labor reliance, drones are a reliable alternative to traditional spraying.

Although this study confirms the efficacy of drone spraying for weed control in transplanted rice, further investigation of its technical and environmental aspects remains essential. Future research should prioritize integrating pre- and post-emergence herbicides to reduce spray carrier volumes, evaluating herbicide formulations under field conditions, determining optimal application volumes across Iran's diverse climatic regions, assessing the physical properties of sprays and the role of adjuvants, and comparing the environmental impacts of aerial spraying with those of conventional methods to promote sustainable agriculture.

کنترل علف‌های هرز برنج نشایی توسط پهپاد در سیستم‌های مختلف آبیاری

مریم عاشوری^۱ | بیژن یعقوبی^۲ | مددعلی رستمی^۳

۱. نویسنده مسئول، بخش گیاهپزشکی، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: m_ashouri.phd@guilan.ac.ir
۲. بخش گیاهپزشکی، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: b.yaghoubi@areeo.ac.ir
۳. گروه ساماندهی و بهبود نظام‌های بهره‌برداری از ماشین، مرکز توسعه صنایع و مکانیزاسیون، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: 2630342859@iau.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	با توجه به افزایش استفاده از پهپادهای سمپاش در کشاورزی، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر روش آبیاری و حجم محلول بر کارایی پهپاد در کنترل علف‌های هرز در کشت نشایی برنج، با استفاده از علف‌کش پیش‌آمیخته سالی‌هالوفوب‌بوتیل + پنوکسولام ($150 \text{ g a.i. ha}^{-1}$ ، OD 6%) انجام شد. آزمایش در قالب طرح کرت‌های خردشده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار انجام شد که در آن، فاکتور اصلی شامل دو روش آبیاری (غرقاب دائم و آبیاری تناوبی) و فاکتور فرعی شامل پنج حجم محلول (۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ لیتر در هکتار) بود. تیمارهای شاهد شامل سمپاش پستی (۳۵۰ لیتر در هکتار)، عدم کنترل علف‌های هرز و وجین دستی بود. برازش مدل‌های رگرسیونی لجستیک نشان داد که حجم محلول برای ۹۰ درصد کاهش زیست‌توده علف‌های هرز در روش آبیاری غرقاب دائم برای سوروف و پی‌زور به‌ترتیب ۱۴/۱۳ و ۱۵/۶ و در روش تناوبی ۲۴/۰۶ و ۵۸/۰۲ لیتر در هکتار بود. بیشترین عملکرد اقتصادی در روش آبیاری غرقاب (۴۳۳۱ کیلوگرم در هکتار) در حجم ۲۰ لیتر در هکتار و در آبیاری تناوبی (۳۸۷۴ کیلوگرم در هکتار) در حجم محلول ۸۰ لیتر در هکتار به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با حجم‌های بالاتر، سمپاش پستی و شاهد وجین دستی نداشتند. با توجه به خسارت بالای ۹۰ درصد علف‌های هرز در شاهد عدم کنترل و کارایی مناسب پهپاد؛ استفاده از سمپاشی هوایی به‌دلیل کمبود کارگر و سرعت بالاتر قابل توصیه است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵	
تاریخ انتشار: پاییز و زمستان ۱۴۰۴	
کلیدواژه‌ها:	
علف‌کش سالی‌هالوفوب‌بوتیل + پنوکسولام، کاربرد برگی، حجم محلول سمپاشی، وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین.	

استناد: عاشوری، مریم؛ یعقوبی، بیژن و رستمی، مددعلی (۱۴۰۴). کنترل علف‌های هرز برنج نشایی توسط پهپاد در سیستم‌های مختلف آبیاری. نشریه دانش گیاهپزشکی ایران، ۵۵ (۲)، ۴۳۷-۴۱۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.400526.1007090>



© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijpps.2025.400526.1007090>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

علف‌های هرز مهمترین مانع در زراعت تک‌کشتی برنج در شمال ایران هستند به‌طوری‌که خسارت ناشی از آن‌ها در کشت ناشی تا ۹۰ درصد و در کشت مستقیم تا ۹۹ درصد گزارش شده است (Yaghoubi et al., 2021; Esmaeli et al., 2023). در کشت سنتی برنج، مدیریت این گیاهان ناخواسته به‌طور عمده مبتنی بر شخم، گل‌خرابی، غرقاب و وجین دستی است. در طی سالیان اخیر، معرفی علف‌کش‌های خاک‌پاش و سپس برگ‌پاش‌ها، موجب تحولی بنیادین در مدیریت علف‌های هرز شده است (Chauhan et al., 2014). در نظام کنونی مدیریت تلفیقی علف‌های هرز شالیزارهای شمال ایران که شامل روش‌های زراعی، مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی (وجین دستی) است، سهم کنترل شیمیایی (عمدتاً علف‌کش‌های خاک‌پاش) ۸۰ تا ۹۰ درصد و وجین دستی ۱۰ تا ۲۰ درصد برآورد می‌شود. اگرچه سهم وجین دستی در این سیستم اندک است، اما همین میزان نیز به دلیل کمبود و گرانی نیروی کار و عدم تمایل نسل جدید به فعالیت‌های فیزیکی سخت و غیرجذاب همانند وجین دستی، بار اقتصادی قابل توجهی بر کشاورزان تحمیل می‌کند. این وضعیت باعث شد پس از معرفی علف‌کش‌های برگ‌پاش در سال ۱۳۹۵، کشاورزان به سرعت این ترکیبات را به عنوان جایگزینی برای وجین دستی بپذیرند (Yaghoubi, 2021). علی‌رغم برخی مزیت‌های کاربرد علف‌کش‌های پس‌رویشی نسبت به وجین دستی، مانند صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه‌ها، استفاده از سمپاش‌های پستی جهت کاربرد علف‌کش‌های پس‌رویشی با چالش‌های متعددی مواجه است. از جمله این موانع می‌توان به مشکلات ساختاری مزارع شالیزاری شمال کشور (شرایط باتلاقی)، کمبود نیروی کار، محدودیت زمانی و محیطی (رشد سریع علف‌های هرز و دشواری سمپاشی در شرایط گرم و مرطوب تابستان)، معایب فنی (زمان‌بر بودن فرآیند، مصرف بالای سموم، توزیع ناهمگون و آلودگی محیط زیست) و مخاطرات بهداشتی برای کاربران (اختلالات هورمونی، عوارض پوستی و سرطان) اشاره کرد (Hafeez et al., 2022; Mandal et al., 2022; Shan et al., 2022).

علاوه بر دشواری‌های کنترل علف‌های هرز با روش‌های مرسوم، مدیریت سایر عوامل خسارت‌زا مانند بیماری‌ها و آفات نیز به‌ویژه در مراحل حساس رشد برنج با محدودیت‌های جدی روبه‌روست. این مشکل در ارقام بومی دارای ارتفاع بلندتر نظیر صدی شدیدتر است؛ زیرا افزایش ارتفاع بوته، ورود به مزرعه را در مراحل پایانی رشد دشوار کرده و کارایی روش‌های سنتی سمپاشی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. در نتیجه، کنترل به‌موقع و مؤثر بیماری مهم بلاست (*Pyricularia oryzae*) و آفت اصلی کرم ساقه‌خوار برنج (*Chilo suppressalis* Walker) با مشکل مواجه شده و کاهش عملکرد ناشی از آن‌ها همواره مشاهده می‌شود.

در چنین شرایطی، فناوری پهپادهای سمپاش به عنوان راهکاری نوین و امیدبخش برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی مطرح شده است (Mandal et al., 2022; Tsolakis et al., 2022). این سیستم پیشرفته دارای مزایای متعددی است که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش چشمگیر محلول مصرفی و نهاده‌های شیمیایی، قابلیت عملکرد در شرایط سخت توپوگرافی و نوری، کاهش نیاز به نیروی کار انسانی، جلوگیری از فشردگی خاک و آسیب به گیاهان، بهبود کیفیت و یکنواختی پاشش، و همچنین ارتقای ایمنی محیط‌زیست و سلامت کشاورزان اشاره کرد (Klauser and Pauschinger, 2021; Shan et al., 2022; Huang et al., 2023). اگرچه مشکلات اجرایی نظیر نیاز به اپراتورهای آموزش‌دیده، محدودیت ظرفیت مخزن، وابستگی به منابع انرژی و احتمال رانش قطرات در شرایط وزش باد وجود دارد (Gugan and Haque, 2023; Yan et al., 2016)، اما توسعه فناوری‌های جدید در زمینه هدایت خودکار، سیستم‌های موقعیت‌یابی دقیق و بهینه‌سازی نازل‌های پاشش، این فناوری را به گزینه‌ای کارآمد و قابل اعتماد برای کشاورزی مدرن مطرح نموده است (Kim et al., 2021).

مکانیزاسیون کشاورزی به‌عنوان یک عامل محرک کلیدی در افزایش بهره‌وری و بهبود شرایط معیشتی کشاورزان برنج‌کار در بسیاری از کشورهای آسیایی شناخته شده است (Diao et al., 2020). در ایران نیز، فناوری‌های مکانیزه در مراحل مختلف

تولید برنج نظیر شخم، نشاکاری و برداشت به صورت چشمگیری توسعه یافته‌اند، اما سطح مکانیزاسیون در حوزه مدیریت تلفیقی آفات، بیماری‌ها و به‌ویژه علف‌های هرز، همچنان در مراحل ابتدایی قرار دارد. این کمبود فناوری در مدیریت علف‌های هرز، نه تنها بهره‌وری نیروی کار را کاهش داده، بلکه موجب افزایش هزینه‌های تولید، کاهش عملکرد محصول و پیامدهای منفی زیست‌محیطی نیز شده است. در این راستا، طراحی و استقرار فناوری‌های نوین، به‌ویژه سامانه‌های هوشمند سمپاشی همانند پهپادهای کشاورزی مجهز به حسگرهای دقیق و الگوریتم‌های پردازش تصویر، می‌تواند به عنوان یک راهکار کارآمد، ضمن کاهش خسارت علف‌های هرز به افزایش بهره‌وری تولید منجر گردد. در کنار انتخاب فناوری مناسب سمپاشی، مدیریت شرایط مزرعه، به‌ویژه روش‌های آبیاری، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارایی علف‌کش‌ها و موفقیت کنترل علف‌های هرز ایفا کند.

مطالعات نشان می‌دهد حفظ سیستم غرقاب دائم به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل علف‌های هرز در سیستم‌های تک‌کشتی برنج محسوب می‌شود. با این وجود، پاسخ علف‌های هرز به شرایط غرقاب در بین گونه‌های مختلف متفاوت است (Chauhan and Johnson, 2008; Chauhan, 2012). بررسی‌های اکوفیزیولوژیک حاکی از آن است که گونه‌هایی مانند *Monochoria vaginalis* و روغن‌واش *Potamogeton nodosus* به دلیل سازگاری بالای خود به شرایط ماندابی، نه تنها نسبت به غرقاب مقاوم‌اند، بلکه این شرایط می‌تواند محرک رشد و افزایش توان رقابتی آن‌ها شود (Yaghoubi et al., 2022; Hazrati et al., 2023). در مقابل، کاربرد تلفیقی غرقاب و علف‌کش پیش‌رویشی پرتیلاکتر، تأثیر سینرژیستیک قابل توجهی در کنترل گونه‌های درنه *Echinochloa colona*، اوپارسلام *Cyperus difformis* و لودوبجیا *Ludwigia hyssopifolia* نشان داده است (Dorji et al., 2013). در سیستم کشت مستقیم برنج، افزایش رطوبت خاک منجر به بهبود جذب و انتقال علف‌کش پس‌رویشی سیستمیک بیس‌پایریباک‌سدیم و افزایش اثربخشی آن در کنترل سوروف *Echinochloa crus-galli* شد. هرچند این شرایط به موازات افزایش کارایی، خطر بروز سمیت ناشی از این علف‌کش را نیز تشدید کرد (Chauhan and Johnson, 2011; Koger et al., 2007).

بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که غرقاب‌های کم‌عمق و متناوب می‌توانند به‌طور مؤثری از استقرار و رشد اولیه علف‌هرز *Leptochloa chinensis* جلوگیری کنند. همچنین مشخص شد که این شرایط، اثر بازدارندگی بیشتری بر وزن خشک گیاهچه‌ها نسبت به مرحله جوانه‌زنی دارد (Chauhan and Johnson, 2008). غرقاب، موجب کاهش جوانه‌زنی و رشد سه گونه علف‌هرز *Fimbristylis miliacea*، *Cyperus iria* و *C. difformis* شد؛ با این حال، گونه *C. difformis*، تنها در شرایط غرقاب‌های عمیق‌تر کنترل مؤثری نشان داد و نسبت به غرقاب‌های متناوب کم‌عمق، مقاومت نسبی بیشتری بروز داد (Chauhan and Johnson, 2009). غرقاب از طریق تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک، از جمله کاهش اکسیژن، افزایش تجمع دی‌اکسید کربن و دیگر گازهای سمی و کاهش نوسانات دمایی، موجب مهار جوانه‌زنی و رشد بسیاری از علف‌های هرز می‌شود و هم‌زمان حساسیت آن‌ها به جذب علف‌کش را افزایش می‌دهد. در نتیجه، حفظ غرقاب پایدار با کاهش رقابت علف‌های هرز، موجب بهبود تراکم، استقرار و یکنواختی رشد برنج شده و منجر به افزایش بهره‌وری علف‌کش‌ها می‌شود (Smith and Fox, 1973; Moody, 1992; Hill et al., 2001; Kim et al., 2001; Chauhan and Johnson, 2009; Zimdahl, 2018; Chauhan, 2021).

علی‌رغم کاربری روبه‌گسترش پهپادها در کشاورزی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی جامع اثربخشی این فناوری در مدیریت علف‌های هرز به‌ویژه در مقایسه با روش‌های رایج سمپاشی پستی همچنان ناکافی است؛ از این رو انجام مطالعات بیشتر ضروری به نظر می‌رسد. در کشت نشایی برنج، حجم بهینه محلول علف‌کش هنگام استفاده از سمپاش‌های پستی ۲۰۰ تا ۵۰۰ لیتر در هکتار گزارش شده است (Ampong-Nyarko and De Datta, 1991; Paul et al., 2024) و کشاورزان شمال ایران عموماً از حجم‌های ۱۵۰ تا ۳۵۰ لیتر در هکتار بهره می‌گیرند. بررسی‌های میدانی حاکی از آن است که محلول مصرفی جهت

سمپاشی مزارع برنج با پهپاد جهت کنترل علف‌های هرز حدود ۱۰ لیتر در هکتار است (اطلاعات منتشر نشده) که مستند علمی برای آن وجود ندارد. بر این اساس، اهداف این پژوهش عبارت‌اند از (۱) ارزیابی تأثیر حجم محلول سمپاشی بر کارایی پهپاد سمپاش در کاربرد علف‌کش‌ها جهت کنترل علف‌های هرز مزارع برنج (۲) بررسی اثر روش آبیاری (غرقاب دائم و غرقاب تناوبی) شالیزار بر کارایی پهپاد در کنترل علف‌های هرز در نظام کشت نشایی برنج در شمال کشور.

پیشینه پژوهش

مروری بر مطالعات و یافته‌های موجود در خصوص نقش حجم پاشش بر کارایی پهپاد در کنترل آفات

کارایی علف‌کش‌های اعمال‌شده توسط پهپاد به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر حجم پاشش، اندازه قطرات و میزان نشست و نیز عوامل محیطی از جمله شرایط جوی و فنوتیپ محصول قرار می‌گیرد. در این بین، بهینه‌سازی حجم پاشش و کالیبراسیون اندازه قطرات، به‌عنوان مهمترین عوامل مؤثر بر اثربخشی کنترل علف‌های هرز شناخته می‌شوند (Shan et al., 2021; Paul et al., 2024). تنظیم دقیق حجم پاشش نه‌تنها بر میزان نشست و پوشش قطرات، بلکه بر کارایی کنترل علف‌های هرز و ایمنی محیط‌زیست نیز تأثیر مستقیم دارد.

حجم‌های پاشش فراتر از حد بهینه می‌تواند منجر به پدیده آب‌شویی و رواناب شده و در نتیجه موجب اتلاف علف‌کش و آلودگی منابع آبی شود. در مقابل، حجم‌های پاشش کمتر از حد مطلوب، با کاهش یکنواختی پوشش و محدود شدن انتقال مؤثر ماده فعال، کارایی کنترل علف‌های هرز را کاهش داده و خطر گیاه‌سوزی را افزایش می‌دهد (Shan et al., 2022; Bharad et al., 2024). بهینه‌سازی حجم محلول در سمپاشی با پهپاد، کانون پژوهش‌های جاری کشاورزی دقیق است.

مطابق نتایج یک پژوهش، کارایی علف‌کش سمپاشی شده با پهپاد در مزارع برنج نشایی، تابعی از حجم محلول مصرفی و نوع علف‌هرز هدف بود (Chen et al., 2023). برای کنترل گونه‌های پهن‌برگ حساس، حجم ۳۰ لیتر در هکتار و برای باریک‌برگ‌ها، حجم ۶۰ لیتر در هکتار دارای عملکرد بهتری بود. با وجود تفاوت در حجم پاشش، نتایج نشان داد که بین کاربرد پهپاد و سمپاش پستی در حجم ۴۵۰ لیتر در هکتار اختلاف آماری معنی‌داری وجود ندارد. همچنین، استفاده از علف‌کش بیس‌پایریاک‌سدیم با پهپاد در حجم ۲۵ لیتر در هکتار کارایی مطلوبی در کنترل علف‌های هرز برنج داشت و از نظر اثرگذاری مشابه با کاربرد همین علف‌کش توسط سمپاش پستی در حجم ۵۰۰ لیتر در هکتار نشان داد (Jeevan et al., 2023). در بررسی کارایی بیس‌پایریاک‌سدیم با پهپاد در سیستم کشت مستقیم برنج و حجم ۳۰ لیتر در هکتار، توزیع یکنواخت‌تر قطرات و کاهش معنی‌دار تراکم و زیست‌توده علف‌های هرز گزارش شد؛ به‌طوری‌که اثربخشی آن از نظر آماری با کاربرد مرسوم سمپاشی پستی در حجم ۵۰۰ لیتر در هکتار تفاوت معنی‌داری نداشت (Paul et al., 2024).

در گیاه زراعی ذرت که نسبت به برنج دارای حجم و زیست‌توده بیشتری است حجم بهینه محلول برای کاربرد علف‌کش‌های آترازین، تمبوتریون و 2,4-D در سمپاشی توسط پهپاد بررسی شد و حجم پاشش ۸۰ لیتر در هکتار دارای بیشترین کارایی در کنترل علف‌های هرز بود (Supriya et al., 2021). در پژوهشی مشابه، تأثیر حجم محلول بر کارایی پهپادهای سمپاش در کنترل آفات مزارع گندم تأثیرگذار گزارش شد؛ به‌گونه‌ای که افزایش حجم محلول آفت‌کش از ۹ به ۲۸ لیتر در هکتار، نشست قطرات و اثربخشی کنترل را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید (Wang et al., 2019).

سوابق پژوهشی پیرامون پهپادهای سمپاشی در ایران

علی‌رغم برخی محدودیت‌ها، روند به‌کارگیری و استقبال از پهپادهای سمپاش در کشور افزایش یافته و این فناوری در مناطق کلیدی کشاورزی کشور، از جمله استان‌های گیلان، فارس، خوزستان و همدان طی سال‌های اخیر، مورد استفاده قرار گرفته است (Keshtkar et al., 2023). شواهد میدانی حاکی از افزایش تدریجی وسعت مزارع تحت پوشش این فناوری در مناطق دارای دسترسی به پهپاد است. اگرچه گزارش‌های متناقضی از کارایی پهپادها منتشر شده است، اما روند رو به رشد

استقبال کشاورزان از این فناوری بیانگر رضایت از کارایی آنها در مقایسه با سمپاش‌های قدیم و ضرورت بررسی‌های علمی جهت کاربرد بهینه این تکنولوژی است. در همین راستا، در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی با هدف مقایسه عملکرد پهنادهای سمپاش با سمپاش‌های متداول زمینی انجام شده است. این مطالعات عمدتاً بر ارزیابی تطبیقی شاخص‌هایی مانند میزان مصرف محلول سم، یکنواختی و بادبردگی قطرات، ظرفیت عملیاتی، کارایی در کنترل آفات و علف‌های هرز، و تحلیل اقتصادی متمرکز بوده‌اند تا مزایا و محدودیت‌های پهنادهای در مقایسه با تجهیزات سنتی آشکار شود.

این فناوری در زمینه کنترل زنجیرک خرما (Safari and Sheikhi Gorjan, 2020)، پروانه مینوز (Safari et al., 2023) و کرم هلیوتیس در محصول گوجه‌فرنگی (Safari et al., 2023)، کرم غوزه پنبه (Nowrouzieh et al., 2022)، شته کلزا (Bagheri et al., 2024)، علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد گندم (Safaeinezhad et al., 2025; Zarifneshat et al., 2022) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیقات عمدتاً حاکی از مزایای بالقوه پهنادهای در بهینه‌سازی عملیات سمپاشی، صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی، افزایش بهره‌وری و کاهش اثرات زیست‌محیطی آفت‌کش‌ها بوده است. به طور کلی، پهنادهای سمپاش در اغلب مطالعات به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و قابل توصیه از نظر فنی و اقتصادی معرفی شده‌اند، اگرچه در برخی موارد خاص، مانند کنترل پروانه مینوز در گوجه‌فرنگی، اثربخشی آن‌ها نسبت به روش‌های مرسوم کمتر گزارش شده است (Safari et al., 2023).

روش‌شناسی پژوهش

مکان پژوهش

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۳ در مزارع پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور - رشت (37.205501N, 49.640496E) اجرا شد. خاک مزرعه مشابه خاک غالب اراضی شالیزاری استان گیلان و از نوع آلفی‌سول^۱ بود. ترکیب خاک شامل ۴۳ درصد رس، ۵۲ درصد سیلت، ۵ درصد شن، ۱/۷ درصد کربن آلی، اسیدیته ۷/۱، فسفر قابل دسترس ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم قابل دسترس ۲۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و هدایت الکتریکی ۱/۴۹ دسی‌زیمنس بر متر بود.

طراحی پژوهش و مدیریت محصول برنج

این پژوهش به صورت کرت‌های خرد شده (اسپلیت پلات) بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. کرت‌های اصلی شامل دو سطح آبیاری تناوبی و غرقاب دائم و کرت‌های فرعی، شامل حجم محلول سمپاشی در پنج سطح شامل ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ لیتر در هکتار بود که به‌صورت تصادفی، داخل کرت‌های اصلی قرار گرفتند. همچنین به‌منظور مقایسه کارایی پهناد با روش‌های رایج کنترل علف‌های هرز شالیزار، تیمار سمپاشی پستی با حجم محلول ۳۵۰ لیتر در هکتار، و تیمارهای شاهد عدم کنترل علف‌هرز و شاهد وجین دستی نیز برای مقایسه و برآورد میزان کاهش عملکرد برنج در بین تیمارهای مختلف آزمایش لحاظ شدند. ابعاد کرت‌های آزمایشی اصلی ۱۸×۹۰ متر و کرت‌های فرعی ۹×۴۵ متر بود که متناسب با عرض کار ۴/۵ متری پهناد در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از تداخل تیمارها، منطقه بافری^۲ با ابعاد مشابه کرت‌های فرعی^۳، بین آن‌ها اختصاص داده شد و کرت‌های شاهد عدم کنترل نیز با اندازه کوچک‌تر (۳×۳ متر) به‌طور تصادفی در این مناطق قرار گرفتند. به منظور جلوگیری از رانش علف‌کش، کرت‌های شاهد علف‌هرز، پیش از عملیات سمپاشی توسط پوشش پلاستیکی محافظت شده و این پوشش دو ساعت پس از اتمام سمپاشی برداشته شد. در این مطالعه، سوروف (*Echinochloa crus-galli*) و پی‌زور (*Bolboschoenus planiculmis* T.V. Egorova) به‌عنوان علف‌های هرز غالب شناسایی شدند،

1 Alfisol

2 Buffer zone

3 Drift

به‌طوری‌که گونه پیروز بیش از ۹۰ درصد جمعیت جگن‌ها را تشکیل می‌داد. با توجه به تراکم بالای این دو گونه، تحلیل و بحث نتایج پژوهش با تمرکز بر آن‌ها ارائه شده است. نتایج محاسبه نسبت واریانس به میانگین در نمونه‌های شاهد علف‌هرز چهار هفته نشان داد که مقدار این شاخص در هر دو گونه و تحت هر دو روش آبیاری، کمتر از یک بود؛ بنابراین، الگوی پراکندگی سوروف و پیروز در جامعه مورد مطالعه از نوع یکنواخت ارزیابی شد (Southwood and Henderson, 2000). در مزارع تک‌کشتی اکوسیستم شالیزار، معمولاً تعداد محدودی از گونه‌های علف‌هرز غالبیت پیدا می‌کنند (Yaghoubi and Pourreza., 2023). آزمایش با استفاده از علف‌کش سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام ($150 \text{ g a.i. ha}^{-1}$ ، 6% OD)، محصول شرکت شاندونگ هاروست چین، انجام شد. تیمارها در مرحله ۳ تا ۴ برگی علف‌های هرز (حدود ۱۶ روز پس از نشاکاری) اعمال شدند. طی عملیات سمپاشی سرعت باد کمتر از دو متر بر ثانیه بود. تیمارهای غرقاب در زمان سمپاشی به‌طور تقریبی پنج سانتی‌متر غرقاب بودند و کرت‌های غیرغرقاب (آبیاری تناوبی)، ۲۴ ساعت پیش از سمپاشی زهکشی شده و غرقاب مجدد ۲۴ ساعت پس از آن انجام شد. در روش آبیاری غرقاب دائم، کرت‌ها تا دو هفته پیش از برداشت در حالت غرقاب حفظ شدند، در حالی که در سیستم آبیاری تناوبی، آبیاری به‌صورت دوره‌ای هر ۷ تا ۱۰ روز یک بار انجام گرفت.

آماده‌سازی زمین شامل شخم اول در نیمه دوم فروردین، شخم دوم در اواسط اردیبهشت و شخم سوم (گل‌خرابی یا پیش‌کاول) دو روز قبل از نشاکاری بود که با تیلر انجام شد. احداث خزانه و بذریابی شلتوک پیش‌جوانه‌دارشده رقم هاشمی (*Oryza sativa* L. cv. Hashemi)، در اواخر فروردین ماه انجام شد و خزانه توسط پوشش پلاستیکی جهت جلوگیری از خسارت سرما پوشانیده شد. نشاکاری برنج در مرحله ۳ تا ۴ برگی، در تاریخ ۲۸ اردیبهشت با استفاده از ماشین نشاکار و با فواصل کاشت ۳۰ سانتی‌متر بین ردیف‌ها و ۱۷ سانتی‌متر روی ردیف‌ها انجام شد. کوددهی بر اساس نتایج آزمایش خاک انجام شد و شامل مصرف ۱۹۵ کیلوگرم اوره، ۳۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۱۶۵ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار بود. تمامی کود فسفر و نیمی از پتاسیم همراه با یک‌سوم اوره پیش از کاشت مصرف شد. نیمه دوم کود پتاسیم به همراه یک‌سوم دیگر اوره در مرحله پنجه‌زنی به‌صورت سرک اعمال گردید و باقی‌مانده اوره نیز در مرحله آبستنی (پیش از ظهور خوشه) به‌صورت سرک مصرف شد. مبارزه با کرم ساقه‌خوار برنج، توسط گرانول‌پاشی حشره‌کش فیپرونیل دو دهم درصد به مقدار ۲۰ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله پنجه‌زنی و آغاز ظهور خوشه در کرت‌های غرقاب انجام شد. علف‌های هرز در تیمار شاهد بدون علف‌هرز در روزهای ۱۴، ۲۸، و ۴۲ پس از نشاکاری با دست وجین شدند.

تجهیزات سمپاشی

تجهیزات سمپاشی شامل یک پهپاد محلول‌پاش هگزاکوپتر مدل S10 (ساخت شرکت کشاورزیار رباتیک شریف، دانشگاه صنعتی شریف، تهران) با نیروی محرکه الکتریکی بود. این مدل دارای سیستم کنترل هوشمند، پرواز پایدار و امکان تنظیم پارامترهای پاشش است که دقت و یکنواختی عملیات را افزایش می‌دهد. پلتفرم S10 به یک مخزن ۱۰ لیتری برای محلول‌پاشی، چهار نازل تی‌جت XR11001VS با فاصله ۷۰ سانتی‌متر از یکدیگر مجهز بود. وزن کلی پهپاد ۱۳۰۶۵ کیلوگرم (بدون باتری)، حداکثر وزن برخاست آن ۲۴ کیلوگرم و حداکثر سرعت در زمان عملیات هفت متر بر ثانیه بود. در این پژوهش، پارامترهای سمپاشی هوایی شامل عرض پاشش ۴۰۵ متر و ارتفاع پرواز ۱۰۷ متر از سطح تاج پوشش برنج بود. تنظیم ارتفاع و سرعت پرواز به‌صورت خودکار توسط سیستم کنترل هوشمند انجام می‌شد و سیستم سمپاشی نیز پیش از عملیات سمپاشی، کالیبره می‌شد. سمپاش پستی شارژی مورد استفاده در این مطالعه (ساخت شرکت Matabi، زیرمجموعه Goziper Group، اسپانیا) دارای یک مخزن ۲۰ لیتری برای نگهداری محلول، پمپ، فیلتر، شیر کنترل جریان، شلنگ انتقال و نازل TeeJet بود که برای پاشش با حجم ۳۵۰ لیتر در هکتار کالیبره شده بود.

جمع آوری داده‌ها

کارایی تیمارهای مورد بررسی در کنترل علف‌های هرز و گیاه‌سوزی برنج، به دو روش ارزیابی چشمی و نمونه‌برداری تخریبی انجام شد. ارزیابی‌های چشمی در ۲، ۴ و ۶ و نمونه‌برداری‌های تخریبی در ۴، ۶ و ۱۲ هفته پس از سمپاشی انجام شد. با توجه به تشابه الگوی نتایج در مرحله رویشی طی هفته‌های چهارم و ششم پس از اعمال تیمارها، صرفاً داده‌های مربوط به هفته ششم در نتایج ارائه شده‌اند. در ارزیابی‌های چشمی به تیمار شاهد علف‌هرز و تیمار شاهد وجین دستی به ترتیب از نظر کنترل علف‌هرز نمره صفر و ۱۰۰ اختصاص داده شد و دیگر تیمارها نسبت به این دو ارزیابی و نمره‌دهی شدند. به‌طور کلی علف‌کش س‌ای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام، فاقد هرگونه علائم گیاه‌سوزی بر روی برنج بود، بنابراین ارائه‌ی داده‌های مربوطه ضرورت پیدا نکرد. در نمونه‌برداری تخریبی صفات پنجه و زیست‌توده گیاه زراعی و علف‌های هرز در سطح یک مترمربع اندازه‌گیری شد. برای این منظور با استفاده از یک کوآدرات، گیاه زراعی و علف‌های هرز از سطح یک مترمربع کف‌بر و پس از انتقال به آزمایشگاه و تفکیک آنها، صفات مورد نظر اندازه‌گیری شد. جهت تعیین وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون ۷۵ درجه سانتیگراد تا حصول وزن ثابت قرار داده شده و سپس توسط ترازوی دقیق توزین شدند.

آنالیز آماری

داده‌ها با استفاده از رویه^۱ GLM در نرم‌افزار SAS نسخه ۹٫۴ (شرکت SAS Institute Inc، کری، کارولینای شمالی) به‌صورت طرح اسپلیت پلات تجزیه شدند. به‌منظور بررسی تأثیر روش آبیاری، حجم محلول و اثر متقابل آنها بر روی صفات مورد بررسی، داده‌ها تحت تجزیه واریانس (ANOVA) قرار گرفتند. نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها توسط بررسی نمودارهای باقی‌مانده^۲ از خروجی SAS ارزیابی شد و میانگین‌ها در صورت لزوم، با استفاده از آزمون LSD ($\alpha = 0.05$) مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به معنی‌دار بودن اثرات متقابل در اغلب صفات مورد ارزیابی، روند تغییرات آنها با برازش مدل‌های رگرسیونی در نرم‌افزار Sigmaplot نسخه ۱۵ (شرکت Inpixon، کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا) انجام شد. روند تغییرات صفات تحت تأثیر روش آبیاری و حجم محلول با استفاده از مدل‌هایی که بهترین توصیف را از پاسخ‌های علف‌های هرز و محصول برنج ارائه می‌دادند، مدل‌سازی شدند. برای این منظور پس از برازش مدل‌های مختلف، ساده‌ترین آنها بر اساس تعداد پارامتر کمتر، R^2 بالاتر و معنی‌داری رگرسیون و پارامترهای مدل انتخاب شدند.

داده‌های مربوط به تراکم و زیست‌توده علف‌های هرز، همچنین تغییرات زیست‌توده، عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی برنج به‌عنوان تابعی از حجم محلول سمپاشی، توسط مدل لجستیک با چهار پارامتر (رابطه^۱) برازش داده شدند.

$$F = C + (D - C) / (1 + (X/E)^b) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در مدل برازش شده، F بیانگر تراکم یا زیست‌توده علف‌های هرز است؛ به‌طوری‌که تراکم سوروف و پیروز به ترتیب بر حسب تعداد پنجه و گیاهچه در مترمربع بیان شده و زیست‌توده هر دو گونه بر حسب درصد نسبت به تیمار شاهد عدم کنترل محاسبه گردیده است. متغیر X نشان‌دهنده حجم محلول سمپاشی (لیتر در هکتار) و پارامترهای C، D و b به ترتیب بیانگر حد نهایی تراکم و زیست‌توده، حد پایین تراکم و زیست‌توده در پاسخ به افزایش حجم محلول و شیب منحنی در نقطه E هستند. پارامتر E، حجم محلولی است که موجب کاهش ۵۰ درصدی تراکم و زیست‌توده نسبت به شاهد می‌شود و به ترتیب با اختصارات

^۱Procedure

^۲ Residual plots

^۳ Logistic

D_{50} و WR_{50} نشان داده شده است. بر اساس این معادله، مقادیر D_{90} و WR_{90} (حجم محلولی که باعث کاهش ۹۰ درصدی تراکم و زیست‌توده نسبت به شاهد می‌شود) برای هر گونه از علف‌های هرز محاسبه گردید. در برازش مدل‌های روند تغییرات زیست‌توده، عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی برنج در پاسخ به حجم محلول سمپاشی، F پاسخ متغیر در حجم علف‌کش X ، C حد پایین پاسخ، E حجمی از علف‌کش که در آن ۵۰ درصد پاسخ بین دو حد حاصل می‌شود و b شیب منحنی در نقطه E است. در این مدل‌ها، به جای پارامتر $D-C$ از پارامتر A برای نشان دادن فاصله بین حدود بالا و پایین پاسخ استفاده شده است.

نتایج و بحث

صفات مورد بررسی شامل تراکم و زیست‌توده علف‌های هرز، زیست‌توده و عملکرد بیولوژیک و اقتصادی برنج، تحت تاثیر روش آبیاری، حجم محلول و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفتند (جدول ۱).

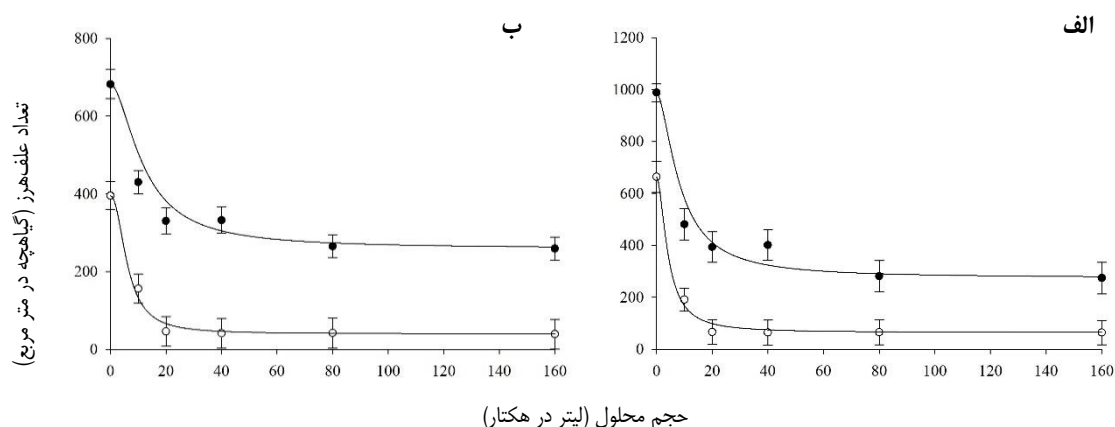
جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر شرایط آبیاری و حجم‌های مختلف محلول علف‌کش بر تراکم و زیست‌توده علف‌های هرز، زیست‌توده، عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی برنج.

منابع	D F	سوروف			پیزور			برنج	
		تراکم	زیست‌توده	تراکم	زیست‌توده	تراکم	زیست‌توده	عملکرد بیولوژیک	عملکرد اقتصادی
		۶	۶	۱۲	۶	۶	۱۲	۱۲	۱۲
تکرار	۳	۵۶۴۱/۰۶	۵۲/۷۵	۴۷۷/۲۴	۲۳۳۳/۳۹	۱۲/۴۶	۶۵/۶۲	۱۸۷۳/۱۰	۰/۰۳
رویش آبیاری ^a	۱	۹۱۷۲۸۵/۰۶***	۱۹۴۱۰/۷۶***	۴۶۸۴۰/۳۲	۷۷۷۲۶۲/۶۴***	۲۷۶۷۹/۸۱***	۲۹۲۸۶/۷۶***	۴۸۲۱۷/۵۷***	۱۵/۱۶***
حجم محلول ^b	۷	۴۷۱۰۵۱/۲۸***	۲۶۵۸۳/۳۷***	۵۶۷۸۸/۱۰***	۱۷۳۸۶۷/۸۰***	۲۰۶۳۴/۷۳***	۲۳۷۱۵/۳۹***	۱۵۸۴۰۶/۴۲***	۴۹/۳۶***
رویش آبیاری×حجم محلول	۷	۲۴۲۵۰/۲۰***	۷۶۳/۲۷***	۱۷۰۶/۵۸***	۱۶۶۴۳/۰۰***	۱۴۶۴۴/۴۵***	۱۷۳۲/۱۳***	۲۷۹۹/۳۴	۱/۰۷***
خطا	۴۵	۳۰۱۱/۳۸	۹۷/۶۰	۱۹۲/۵۵	۱۵۶۷/۴۵	۴۰/۷۸	۳۴/۳۱	۱۸۸۶/۰۵	۰/۳۵
C.V.	-	۲۰/۴۲	۱۵/۵۹	۱۵/۳۵	۱۸/۸۷	۱۰/۶۱	۹/۰۱	۱۱/۰۱	۸/۴۲

^a روش آبیاری شالیزار (تناوبی و غرقابی دائم): ^b حجم محلول علف‌کش (صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ و ۳۵۰ لیتر در هکتار): * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱.

تراکم و زیست‌توده علف‌های هرز

تراکم سوروف در تیمار شاهد عدم کنترل در شش هفته پس از سمپاشی، تحت آبیاری تناوبی و غرقابی به ترتیب ۹۸۸ و ۶۶۴ پنجه در مترمربع و تراکم جگن در شرایط مشابه ۶۸۲ و ۳۹۵ گیاهچه در مترمربع بود (شکل ۱).



شکل ۱. مدل پیش‌بینی‌کننده تراکم علف‌های هرز سوروف (الف) و پیزور (ب) در ۶ هفته پس از اعمال تیمار (● آبیاری تناوبی، ○ غرقابی دائم)، در حجم‌های مختلف کاربرد علف‌کش سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام توسط پهپاد سمپاش و برازش مدل لجستیک $(F=C+(D-C)/(1+(X/E)^b))$. نقاط روی منحنی میانگین چهار تکرار و خطوط عمودی (خطوط بار) بیانگر خطای استاندارد میانگین‌ها هستند.

جدول ۲. برآورد پارامترهای مدل رگرسیون روند کاهش تراکم علف‌های هرز در پاسخ به سطوح متفاوت حجم محلول سمپاشی و نوع آبیاری.

علف‌هرز	روش آبیاری	پارامتر				
		R ²	D ₉₀	D ₅₀ (SE)	b (SE)	D (SE)
سوروف	تناوبی	۰/۸۹	۳۱/۵۶	۸/۴۴ (۰/۸۶)	۱/۶۷ (۰/۴۹)	۹۸۸/۱۷ (۹۲/۹۴)
	غرقاب دائم	۰/۹۸	۱۴/۱۷	۴/۱۴ (۰/۵۹)	۱/۷۸ (۰/۶۸)	۶۶۴/۰۹ (۵۰/۹۶)
پیزور	تناوبی	۰/۹۴	۴۲/۰۵	۱۲/۰۲ (۰/۶۲)	۱/۷۶ (۰/۴۳)	۶۸۲/۴۱ (۵۷/۰۸)
	غرقاب دائم	۰/۹۸	۱۷/۲۴	۶/۱۴ (۰/۴۸)	۲/۱۴ (۰/۶۰)	۳۹۵/۴۱ (۱۸/۹۵)

C شاخص حداقل تراکم در بیشترین حجم محلول، D حداکثر تراکم در شاهد عدم کنترل، b ضریب نرخ کاهش، X حجم محلول و D₅₀ حجم محلولی که در آن ۵۰ درصد کاهش تراکم نسبت به شاهد عدم کنترل حاصل می‌شود. حجم‌های مؤثر D₉₀ نشان‌دهنده میزان حجم محلول با ۹۰ درصد کاهش تراکم نسبت به شاهد عدم کنترل و از معادله مدل محاسبه شده است. R² ضریب تبیین و SE خطای استاندارد است.

براساس نتایج حاصل از برازش مدل‌های رگرسیونی، افزایش حجم محلول سمپاشی با کاهش معنی‌دار در تراکم و زیست‌توده هر دو علف‌هرز سوروف و پیزور همراه بود (شکل‌های ۱ و ۲؛ جدول‌های ۲ و ۳). به‌علاوه روند کاهش این صفات در هر دو سیستم آبیاری مشابه بود، اما شدت پاسخ در روش آبیاری غرقاب بیشتر از آبیاری تناوبی بود. متوسط حجم محلول مورد نیاز برای ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش زیست‌توده (WR₅₀ و WR₉₀) سوروف، در سیستم آبیاری تناوبی دو برابر سیستم غرقاب دائم بود (شکل ۲ و جدول ۳). همچنین، در شرایط غرقاب، پارامتر نرخ کاهش (b) در مدل لجستیک دارای مقدار بیشتری بود که نشان‌دهنده شیب تندتر منحنی و کاهش سریع‌تر زیست‌توده در پاسخ به افزایش حجم محلول است (جدول ۳). میانگین کمترین زیست‌توده سوروف در شرایط غرقاب دائم و آبیاری تناوبی، به‌ترتیب ۲۳/۷۳ و ۷۰/۲۷ گرم در مترمربع بود که بیانگر کاهش حدود ۹۰ و ۷۰ درصدی در وزن خشک این گونه نسبت به تیمار شاهد عدم کنترل است (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). مقایسه مدل‌های برازش‌شده نشان داد که دستیابی به حداکثر کنترل سوروف، به حجم محلول ۲۰ لیتر در هکتار در شرایط غرقاب دائم و ۸۰ لیتر در هکتار در شرایط آبیاری تناوبی نیاز دارد.

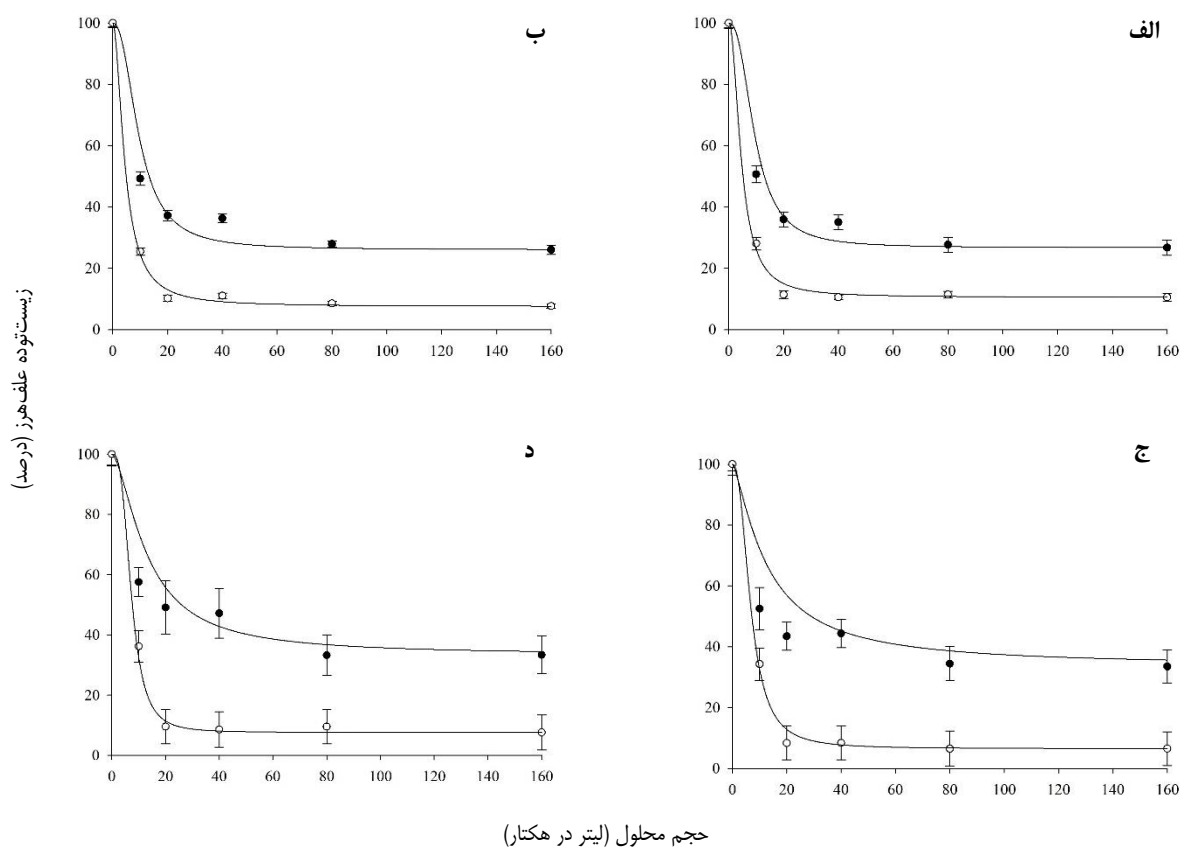
پاسخ پیزور به تیمارهای آزمایشی مشابه سوروف بود؛ به‌طوری‌که در تمامی سطوح حجم محلول، کارایی علف‌کش در شرایط غرقاب دائم بیشتر از آبیاری تناوبی بود و مقایسه مدل‌های برازش‌شده با خطای استاندارد بیانگر اختلاف معنی‌دار بین صفات در تمام حجم‌های محلول مورد بررسی است (شکل ۲). مقادیر WR₅₀ و WR₉₀ پیزور در آبیاری تناوبی، به‌ترتیب تقریباً دو و چهار برابر بیشتر از حالت غرقاب بودند. در شرایط غرقاب دائم و غرقاب تناوبی، میانگین کمترین زیست‌توده پیزور به‌ترتیب برابر با ۱۳/۶۸ و ۶۵/۰۸ گرم بر مترمربع بود که معادل کاهش تقریبی ۹۰ و ۶۰ درصدی وزن خشک این گونه نسبت به تیمار شاهد علف‌هرز است (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). با این حال، بر اساس پارامترهای مدل رگرسیونی، پیزور نسبت به سوروف دارای تحمل بیشتری به علف‌کش مورد بررسی بود؛ به‌گونه‌ای که میانگین حجم محلول مورد نیاز برای ۵۰ درصد کاهش زیست‌توده پیزور، در آبیاری تناوبی ۳۶ درصد و در روش غرقاب دائم ۵۵ درصد بیشتر از سوروف بود (جدول ۳).

این اختلاف را می‌توان به تفاوت‌های اکولوژیکی دو گونه نسبت داد. سوروف، گونه‌ای بذرزاد و گرمادوست با رشد سریع و دوره جوانه‌زنی متمرکز است که در مراحل اولیه رشد، به علف‌کش حساس‌تر است. در مقابل، پیزور، با دارا بودن غده‌های زیرزمینی با وزن قابل‌توجه (۲ گرم یا بیشتر) و توانایی تولید جوانه‌های متعدد به‌صورت ناهمزمان، از سازوکار بقا و تجدید رشد بالاتری برخوردار است. ناهمزمانی در جوانه‌زنی و رویش زود یا دیر هنگام، موجب کاهش اثربخشی کنترل شیمیایی و افزایش شانس بقای پیزور در مزرعه می‌شود. همچنین پیزور از عمق حدود ۱۰ سانتیمتری آب و خاک جوانه می‌زند، درحالی‌که سوروف،

از سطح خاک جوانه زده و غرقاب دارای بازدارندگی بیشتری در جوانه زنی و رویش آن است. بنابراین در هنگام کاربرد علف کش، پیزور دارای سطح تماس کمتری با علف کش خواهد بود.

منحنی پاسخ زیست توده پیزور به افزایش حجم محلول نیز تفاوت عملکرد این علف هرز در دو سیستم آبیاری را تأیید می کند (شکل ۲). در شرایط غرقاب، مقادیر WR_{50} و WR_{90} به طور معنی داری کمتر از شرایط آبیاری تناوبی بودند و کاهش زیست توده عمدتاً در حجم های اولیه رخ داد، به طوری که افزایش بیشتر حجم محلول تأثیر قابل توجهی بر علف هرز نداشت. در مقابل، در آبیاری تناوبی، مقادیر بالاتر WR_{90} و شیب ملایم تر منحنی نشان داد که افزایش تدریجی حجم محلول با افزایش کارایی علف کش و کاهش زیست توده علف هرز همراه بود. در سیستم های آبیاری تناوبی، روند کاهشی زیست توده پیزور در پی افزایش حجم محلول، احتمالاً به افزایش فرصت انتقال ماده مؤثره به ناحیه ریشه از طریق آبشویی سطحی مربوط می شود. این سازوکار، به ویژه در مورد پنوکسولام که علاوه بر جذب از طریق اندام های هوایی، دارای پایداری نسبی و باقی مانده فعال در خاک است، می تواند موجب اثربخشی بیشتر آن بر اندام های زیرزمینی شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده اند که شرایط مرطوب خاک، می تواند جذب ریشه ای برخی علف کش ها را تسهیل کرده و کارایی آن ها را در کنترل علف های هرز افزایش دهد (Marchesi and Chauhan, 2019). در مقابل، در شرایط غرقاب دائم، تماس پایدار محلول با اندام های هوایی و ریشه ای علف های هرز، حتی در حجم های پایین، اثربخشی مطلوبی ایجاد می کند؛ از این رو، افزایش بیشتر حجم محلول، تأثیر افزایشی قابل توجهی بر کنترل نخواهد داشت.

در تمام تیمارهای مورد بررسی، مقدار حداقل زیست توده علف های هرز، هرگز به صفر نرسید، که این موضوع به ترکیبی از عوامل زراعی و اکولوژیکی باز می گردد. بانک بذر غنی مزارع شالیزاری به دلیل تک کشتی برنج و نیز جوانه زنی تناوبی آنها و عدم قرارگیری در معرض علف کش ها از دلایل اصلی این موضوع هستند. به علاوه عدم استفاده از علف کش های پیش رویشی، شانس بقا و رویش بذر علف های هرز در شرایط مناسب را افزایش داد. همچنین، گونه های گرمادوست و چهارکربنه ای مانند سوروف، با نرخ رشد بالا و رقابت پذیری شدید نسبت به برنج در دمای بالا، به سرعت فضای زراعی را اشغال می کنند (Bir et al., 2024).



شکل ۲. روند تغییرات زیست‌توده علف‌های هرز سوروف (الف و ب) و پیروز (ج و د) در ۶ و ۱۲ هفته پس از تیمار بر اساس درصد نسبت به شاهد بدون کنترل (● آبیاری تناوبی، ○ غرقاب دائم)، در حجم‌های مختلف کاربرد علف‌کش سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام توسط پهپاد سمپاش و برازش مدل لجستیک $(F=C=(D-C)/(1+(X/E)^b))$. نقاط روی منحنی میانگین چهار تکرار و خطوط عمودی (خطوط بار) بیانگر خطای استاندارد میانگین‌ها هستند.

جدول ۳. پارامترهای مدل رگرسیون بررسی روند تغییرات زیست‌توده علف‌های هرز در سطوح متفاوت حجم محلول سمپاشی و نوع آبیاری

علف‌هرز	زمان ارزیابی (هفته پس از سمپاشی)	روش آبیاری	R^2	WR_{90}	WR_{50} (SE)	b (SE)	D (SE)	C (SE)
سوروف	۶	تناوبی	۰/۹۵	۲۳/۴۱	۹/۵۱ (۰/۹۲)	۲/۴۵ (۰/۸۸)	۱۰۰/۰۰ (۱۰/۳۷)	۲۶/۷۲ (۲/۶۶)
		غرقاب دائم	۰/۹۸	۱۳/۷۱	۴/۵۷ (۰/۸۶)	۱/۹۹ (۰/۳۱)	۱۰۰/۰۰ (۴/۹۱)	۱۰/۵۳ (۲/۴۳)
	۱۲	تناوبی	۰/۹۱	۲۴/۷۲	۹/۶۲ (۰/۹۷)	۲/۲۹ (۰/۳۰)	۱۰۰/۰۰ (۹/۰۵)	۲۶/۰۴ (۳/۱۷)
		غرقاب دائم	۰/۹۷	۱۴/۵۵	۴/۴۵ (۱/۶۲)	۱/۸۴ (۰/۸۸)	۱۰۰/۰۰ (۳/۲۴)	۷/۵۲ (۱/۲۱)
پیروز	۶	تناوبی	۰/۷۱	۶۴/۷۷	۱۲/۷۵ (۳/۴۴)	۱/۳۵ (۰/۳۳)	۱۰۰/۰۰ (۲۰/۳۸)	۳۳/۵۱ (۶/۲۰)
		غرقاب دائم	۰/۹۷	۱۶/۶۰	۶/۷۵ (۰/۰۲)	۲/۴۱ (۰/۳۴)	۱۰۰/۰۰ (۳/۸۷)	۶/۵۰ (۲/۶۷)
	۱۲	تناوبی	۰/۷۸	۵۱/۲۸	۱۳/۱۵ (۱/۱۴)	۱/۶۱ (۰/۸۹)	۱۰۰/۰۰ (۱۲/۷۲)	۳۳/۳۴ (۳/۴۷)
		غرقاب دائم	۰/۹۸	۱۴/۶۰	۷/۲۳ (۱/۱۱)	۳/۰۹ (۰/۷۶)	۱۰۰/۰۰ (۵/۶۳)	۷/۶۲ (۳/۳۶)

C شاخص حداقل زیست‌توده در بیشترین حجم محلول، D حداکثر زیست‌توده در شاهد عدم کنترل، b ضریب نرخ کاهش، X حجم محلول. حجم‌های مؤثر WR_{90} و WR_{50} به ترتیب نشان‌دهنده حجم محلولی هستند که در آن به ترتیب ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش زیست‌توده نسبت به شاهد عدم کنترل حاصل می‌شود. WR_{90} از معادله مدل محاسبه شده، R^2 ضریب تبیین و SE خطای استاندارد است.

برخلاف توصیه‌های رایج مینی بر زهکشی شالیزار پیش از کاربرد علف‌کش‌های پس‌رویشی به‌منظور تسهیل جذب علف‌کش از طریق اندام‌های هوایی (Ampong-Nyarko and De Datta, 1991) نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد علف‌کش سای‌هالوفوبوتیل + پنوکسولام در شرایط غرقاب، دارای کنترل مؤثرتری بر علف‌های هرز در مقایسه با شرایط زهکشی‌شده بود. این یافته با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی فرمولاسیون OD قابل توجیه است. این فرمولاسیون، نوعی سامانه سوسپانسیونی مبتنی بر فاز پیوسته روغنی است که ماده مؤثره را به‌صورت ذرات جامد در یک محیط غیرآبی تثبیت کرده و پیش از کاربرد توسط آب رقیق می‌شود. این سامانه برای مواد مؤثره حساس به آب بسیار مناسب است، زیرا از تجزیه هیدرولیتیکی آن‌ها جلوگیری می‌کند و هم‌زمان دارای خواص ادجوانتی ذاتی است (Gasic et al., 2011; Qin et al., 2010; Castelani, et al., 2016). حضور روغن در این سامانه به عنوان حامل، ضمن افزایش پایداری فیزیکی و شیمیایی، موجب بهبود ماندگاری محلول روی سطح برگ، پخش‌شدگی یکنواخت، و نفوذ بهتر به لایه مومی اپیدرم می‌شود؛ در نتیجه، در شرایط مرطوب و اشباع از آب، کارایی محلول علف‌کش افزایش می‌یابد (Gasic et al., 2011; Kala et al., 2023). از این رو، فرمولاسیون OD می‌تواند نسبت به فرمولاسیون‌های غیرروغنی نظیر سوسپانسیون (SC^۲) یا محلول در آب (SL) عملکرد مؤثرتری داشته باشد، به‌ویژه در محیط‌های مرطوب و اشباع از آب نظیر شالیزارها که خطر شستشوی سطح برگ بیشتر است. در آبیاری غرقاب دائم، نیمه‌عمر علف‌کش‌ها افزایش یافته و کنترل علف‌های هرز برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود (Junkes et al., 2022; Camargo et al., 2013). افزون بر این، غرقاب به‌تنهایی حدود ۵۰ درصد در کنترل علف‌های هرز مؤثر است (Kent and Johnson, 2001) و از طریق ایجاد استرس‌های فیزیولوژیکی مانند کم‌اکسیژنی، افزایش گازهای سمی، و محدودیت در رشد ریشه، تاب‌آوری علف‌های هرز را تضعیف کرده و حساسیت آن‌ها را به جذب علف‌کش افزایش می‌دهد (Moody, 1992; Chauhan, 2021). همچنین، غرقاب مداوم با حفظ یکنواختی و ثبات دمای خاک، مانع جوانه‌زنی و تحریک بذرها یا ریزوم‌های علف‌های هرز می‌شود؛ در حالی که در سیستم آبیاری تناوبی، به‌دلیل نوسانات رطوبتی و دمایی، بذرها و اندام‌های زیرزمینی فرصت جوانه‌زنی و رشد مکرر پیدا می‌کنند (Brim-DeForest et al., 2021). از سوی دیگر، انتقال بذر علف‌های هرز از طریق جریان آب در سیستم تناوبی نیز تشدید می‌شود، در حالی که در شرایط غرقاب این انتقال محدودتر بوده و بذرهای جدید نیز کمتر قادر به جوانه‌زنی هستند. در نتیجه، هم‌افزایی میان شرایط غرقاب و فرمولاسیون روغنی OD، به‌ویژه در اقلیم خاص شالیزارهای شمال ایران، موجب افزایش اثربخشی و کاهش نیاز به حجم محلول شده و از منظر کاهش دوز مصرفی، جلوگیری از هدررفت، و ارتقای پایداری زیست‌محیطی حائز اهمیت است.

در سال‌های اخیر، استفاده از پمپاد برای کاربرد علف‌کش در مزارع برنج مناطق شمالی کشور رو به افزایش بوده و شمار کشاورزان بهره‌بردار از این فناوری روندی صعودی را نشان می‌دهد. عملیات سمپاشی در این اراضی معمولاً با حجم محلول حدود ۱۰ لیتر در هکتار انجام می‌شود. با این حال، اپراتورهای پمپاد به‌دلیل ظرفیت محدود مخزن و ضرورت افزایش تعداد پروازها در حجم‌های بالاتر، که منجر به افزایش زمان و هزینه عملیات می‌شود، تمایلی به استفاده از حجم محلول بیشتر ندارند؛ به‌ویژه آنکه تعرفه پرداختی کشاورزان معمولاً متناسب با افزایش هزینه‌های ناشی از بالا بردن حجم محلول بازنگری نمی‌شود. بنابراین، ملاحظات اقتصادی و عملیاتی یادشده، از مهم‌ترین عوامل تداوم استفاده از حجم‌های پایین محلول در این مناطق به‌شمار می‌آید.

بر اساس نتایج مطالعات انجام‌شده در کشورهای آسیایی، حجم توصیه‌شده برای کاربرد علف‌کش‌های پس‌رویشی توسط پمپاد در مزارع برنج نشایی، در چین بین ۳۰ تا ۶۰ لیتر در هکتار و در هند حدود ۲۵ لیتر در هکتار است (Chen et al., 2023).

1 Oil Dispersion

2 Suspension Concentrate

3 Soluble Liquid

(Jevaon et al., 2023). شرایط آب‌وهوایی و میزان گردوغبار موجود در هوا می‌تواند از دلایل احتمالی تفاوت حجم محلول در این مناطق و نیز مطالعه حاضر باشد. گردوغبار معلق در هوا می‌تواند با جذب مولکول‌های علف‌کش و جلوگیری از نفوذ آن‌ها به بافت گیاه، کارایی سمپاشی را کاهش دهد و در نتیجه نیاز به تنظیم حجم محلول برای حفظ اثربخشی افزایش یابد (Sharifi Kalyani et al., 2024). گزارش منتشر شده در چین در ارتباط با کنترل علف‌های هرز برنج توسط پهپاد نشان می‌دهد که مقادیر بهینه حجم محلول برای کنترل گروه‌های مختلف علف‌های هرز برنج نشایی متفاوت است؛ به‌طوری‌که کنترل مؤثر علف‌های باریک‌برگ مانند گونه‌های سوروف و *Leptochloa chinensis* مستلزم حجم بالاتر محلول (۶۰ لیتر در هکتار) بود، در حالی که گونه‌های پهن‌برگ (M. vaginalis, Ammannia baccifera) و جگن یکساله اویارسلام (*C. difformis*) در حجم‌های کمتر (۳۰ لیتر در هکتار) نیز به‌طور مؤثری مهار شدند (Chen et al., 2023). در مقابل، نتایج مطالعه حاضر نشان داد که پیروز نسبت به سوروف تحمل بیشتری به علف‌کش داشته و برای دستیابی به کاهش مشابه در زیست‌توده، به حجم محلول بالاتری نیاز دارد. این تفاوت احتمالاً ناشی از رویش پیروز از اعماق بیشتر خاک و برخورداری از گیاهچه‌های بزرگ‌تر است؛ به‌گونه‌ای که بخشی از اندام‌های آن برخلاف جگن‌های یکساله که فاقد ساختارهای زیرزمینی هستند در تماس مستقیم با علف‌کش قرار نمی‌گیرد. افزون بر این، نوع علف‌کش مورد استفاده در این تحقیق نیز می‌تواند در تفاوت واکنش این دو گونه نقش داشته باشد. دو ماده فعال سای‌هالوفوپ‌بوتیل و پنوکسولام به‌کاررفته در این پژوهش، عمدتاً به‌عنوان باریک‌برگ‌کش‌های اختصاصی شناخته می‌شوند و در مقایسه، کارایی نسبتاً ضعیف‌تری بر روی جگن‌ها دارند (Maazi et al., 2013). با این حال، ترکیب پیش‌آمیخته سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام در فرمولاسیون OD، علاوه بر کنترل مطلوب باریک‌برگ‌ها، کارایی قابل‌توجهی در مهار پیروز نیز نشان داد (Yaghoubi et al., 2021).

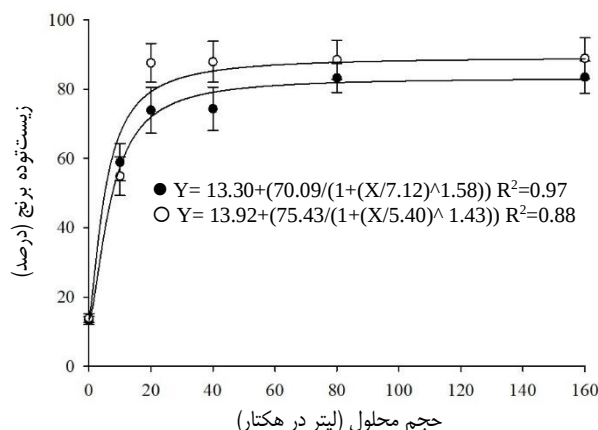
عملکرد و اجزای عملکرد برنج

زیست‌توده برنج

نتایج حاصل از برازش مدل لجستیک چهارپارامتره نشان داد که در هر دو روش آبیاری غرقاب دائم و تناوبی، افزایش حجم محلول سمپاشی با افزایش زیست‌توده برنج همراه بود و این صفت ابتدا دارای روند صعودی و سپس دارای حالت اشباع‌شونده بود (شکل ۳). در هر دو روش آبیاری، کمترین زیست‌توده از تیمار با حجم ۱۰ لیتر در هکتار به دست آمد که به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای با حجم بالاتر بود.

بر اساس مدل برازش شده، زیست‌توده تیمار شاهد عدم کنترل، در ۱۲ هفته پس از کاربرد در روش‌های آبیاری تناوبی و غرقاب دائم به‌ترتیب ۱۳/۳۰ و ۱۳/۹۲ درصد نسبت به شاهد وجین دستی برآورد شد. این اختلاف مقادیر، از یک‌سو بیانگر آلودگی شدید کرت‌های آزمایشی به علف‌های هرز و در نتیجه کاهش چشمگیر زیست‌توده برنج در شرایط عدم کنترل است. از سوی دیگر، نزدیکی مقادیر C در دو روش آبیاری حاکی از ثبات نسبی رشد و تجمع زیست‌توده برنج در شرایط آبیاری تناوبی در مقایسه با غرقاب دائم است. این نتایج همسو با یافته‌های دیگر محققین است که بیان کردند در صورت مدیریت بهینه رطوبت خاک، تولید زیست‌توده در آبیاری تناوبی تفاوت معنی‌داری نسبت به آبیاری غرقاب دائم ندارد (Lu et al., 2000).

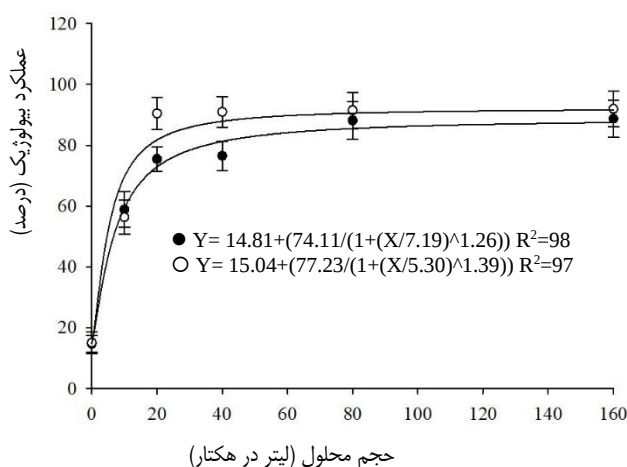
حجم محلول مورد نیاز برای دستیابی به نیمی از پاسخ نهایی (E)، در روش آبیاری غرقاب، کمتر از تناوبی بود. این برتری در حجم‌های ۲۰ و ۴۰ لیتر مشاهده شد و در حجم‌های ۸۰ و ۱۶۰ لیتر در هکتار این دو روش آبیاری دارای زیست‌توده مشابهی بودند. این تفاوت به‌روشنی بیانگر آن است که گیاه در شرایط غرقاب با حجم کمتری از محلول علف‌کش به سطح میانه‌ی پاسخ زیستی خود می‌رسد، که می‌تواند ناشی از افزایش اثربخشی علف‌کش‌ها در محیط رشد غرقابی و کاهش رقابت زیستی علف‌های هرز باشد (Naylor, 1996; Rao et al., 2007; Chauhan, 2012). کاهش رقابت علف‌های هرز، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، سبب دسترسی بیشتر برنج به منابعی مانند آب، مواد مغذی و نور شده و شرایط مطلوبی را برای رشد و افزایش زیست‌توده آن فراهم می‌کند (Vu et al., 2023).



شکل ۳. پاسخ زیست‌توده برنج نسبت به شاهد و چین دستی در مقادیر مختلف حجم محلول علف‌کش سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام مورد استفاده در سمپاشی توسط پهباد، ۱۲ هفته پس از تیمار، تحت دو روش آبیاری تناوبی (●) و غرقاب دائم (○). منحنی با استفاده از مدل لجستیک چهارپارامتره $F = ((C+A)/(1 + (X/E)^b))$ بر میانگین چهار تکرار برازش شده است. خطوط عمودی نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین‌ها هستند

عملکرد بیولوژیک

بر اساس نتایج حاصل از برازش مدل لجستیک چهارپارامتره، افزایش حجم محلول افزایش عملکرد بیولوژیک برنج را در هر دو شرایط آبیاری (تناوبی و غرقاب دائم) موجب شد (شکل ۴). با این حال، روش آبیاری دارای نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان پاسخ‌دهی محصول به افزایش حجم محلول بود. پارامتر E نشان داد که برای دستیابی به ۵۰ درصد پاسخ عملکرد بیولوژیک، در آبیاری تناوبی به حجم محلول بیشتری نسبت به غرقاب دائم نیاز است. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط غرقاب دائم، عملکرد مطلوب با حجم محلول کمتری به دست می‌آید که احتمالاً به دلیل سرکوب طبیعی جوانه‌زنی و رشد علف‌های هرز توسط غرقاب مستمر است. هرچند آبیاری تناوبی به‌عنوان راهکاری مناسب در شرایط کم‌آبی مطرح است، اما برای کنترل موثر علف‌های هرز و حفظ عملکرد، نیازمند حجم بیشتری از محلول علف‌کش است. بنابراین، این موضوع باید در برنامه‌ریزی دقیق و اقتصادی مصرف علف‌کش‌ها، به‌ویژه در کاربرد روش‌های نوین سمپاشی مانند پهباد، به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

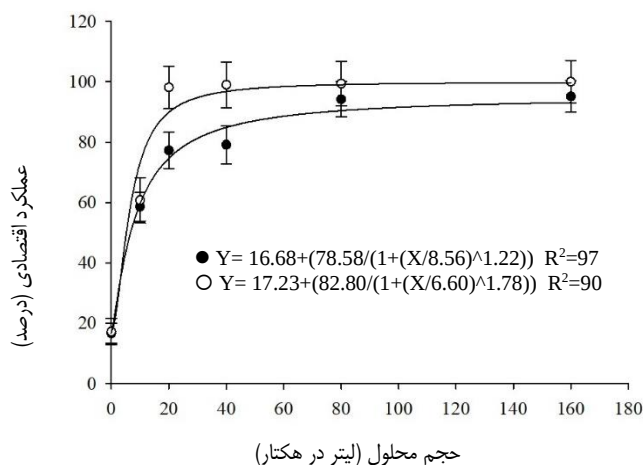


شکل ۴. بررسی روند تغییرات عملکرد بیولوژیک برنج (● آبیاری تناوبی، ○ غرقاب دائم) با افزایش حجم‌های محلول علف‌کش سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام توسط پهپاد سمپاش و برآزش مدل لجستیک چهار پارامتره ($F = C + A / (1 + (X/E)^b)$). نقاط روی منحنی میانگین چهار تکرار و خطوط عمودی (خطوط بار) بیانگر خطای استاندارد میانگین‌ها هستند.

عملکرد اقتصادی

روند تغییرات عملکرد دانه در سطوح مختلف حجم محلول علف‌کش سای‌هالوفوپ‌بوتیل + پنوکسولام با مدل لجستیک چهارپارامتره به‌خوبی توصیف شد (شکل ۵). عملکرد دانه در هر دو روش آبیاری با افزایش حجم محلول افزایش یافت و در تمامی سطوح، آبیاری غرقاب دائم عملکرد بالاتری نسبت به آبیاری تناوبی داشت. با این حال، این افزایش در نهایت به نقطه اشباع رسید (۲۰ لیتر در هکتار برای غرقاب دائم و ۸۰ لیتر برای آبیاری تناوبی) و افزایش بیشتر حجم محلول تأثیر معنی‌داری بر عملکرد نداشت. حجم پایین ۱۰ لیتر در هکتار عملکرد دانه را حدود ۴۰ درصد کاهش داد، در حالی که در آبیاری تناوبی، حجم‌های ۸۰ و ۱۶۰ لیتر در هکتار تفاوت آماری نداشتند. کاربرد حجم‌های بالای محلول با توجه به محدودیت ظرفیت مخزن و باتری پهپادها از نظر اقتصادی توصیه نمی‌شود.

با استفاده از حجمی از محلول که تقریباً یک‌چهارم حجم مورد نیاز در روش آبیاری تناوبی است، حداکثر عملکرد اقتصادی در شرایط آبیاری غرقاب دائم فراهم شد. این یافته، با توجه به وسعت زیاد اراضی شالیزاری و محدودیت دسترسی به منابع آب مناسب برای عملیات سمپاشی، از اهمیت بالایی برخوردار است. دامنه تغییرات عملکرد اقتصادی برنج در پاسخ به حجم محلول، در شرایط غرقاب دائم ۸۲/۸۰ درصد و در شرایط آبیاری تناوبی ۷۸/۵۸ درصد برآورد شد. این اختلاف نشان‌دهنده تأثیر روش آبیاری بر پاسخ گیاه به حجم محلول علف‌کش و سطح عملکرد اقتصادی آن است (شکل ۵). در مجموع، بیشینه عملکرد اقتصادی در حجم‌های بهینه تحت شرایط غرقاب دائم و آبیاری تناوبی به‌ترتیب ۴۳۳۱ و ۳۹۱۴ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد که بیانگر کاهش حدود ۱۰ درصدی عملکرد در روش آبیاری تناوبی است (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). عملکرد بالاتر برنج در شرایط غرقاب را می‌توان به کنترل مؤثرتر علف‌های هرز، اثربخشی بیشتر فرمولاسیون روغنی OD در محیط اشباع از آب، و کاهش رقابت در مراحل اولیه رشد نسبت داد. در این شرایط، علف‌کش با حجم کمتری توانست زیست‌توده علف‌های هرز را به‌طور مؤثری کاهش داده و دسترسی گیاه به منابع رشد را تسهیل کند. همچنین، حضور مستمر آب و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی فرمولاسیون OD موجب افزایش پایداری و اثربخشی علف‌کش گردید. در نهایت، برهم‌کنش این عوامل به‌صورت هم‌افزا موجب ارتقای بهره‌وری و بهبود عملکرد اقتصادی برنج شد. مطالعه‌ای دیگر در کنترل علف‌های هرز برنج نشایی با استفاده از پهپاد نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در حجم بهینه ۲۵ لیتر در هکتار (۶۴۷۴ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاربرد حجم ۱۵ لیتر در هکتار بود. علت عملکرد بالاتر، تراکم و زیست‌توده کمتر علف‌های هرز در حجم بالاتر محلول سمپاشی گزارش شد (Jeevan et al., 2023).



شکل ۵. عملکرد اقتصادی برنج در پاسخ به مقادیر مختلف حجم محلول علف کش سایه‌الوفوپ‌بوتیل + پنو کسولام اعمال شده توسط پهباد سمپاش، تحت دو روش آبیاری تناوبی (●) و غرقاب دائم (○). برازش داده‌ها توسط مدل لجستیک چهار پارامتره ($f = C + A / (1 + (X/E)^b)$) انجام شده است. نقاط روی منحنی میانگین چهار تکرار و خطوط عمودی، نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین‌ها هستند.

مقایسه کارایی سمپاش پستی و پهباد

در میان تیمارهای مورد بررسی، سمپاش پستی با حجم ۳۵۰ لیتر در هکتار در هر دو روش آبیاری (غرقاب دائم و آبیاری تناوبی) به‌طور معنی‌داری کمترین زیست‌توده علف‌های هرز (هفته ششم نمونه‌برداری) و بیشترین عملکرد دانه را نشان داد (جدول ۴). با این حال، در حجم‌های ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ لیتر در هکتار تحت شرایط غرقاب دائم و حجم‌های ۸۰ و ۱۶۰ لیتر در هکتار تحت آبیاری تناوبی، تفاوت آماری معنی‌داری نسبت به سمپاش پستی در شاخص‌های مورد ارزیابی مشاهده نشد. تیمار شاهد وجین دستی در مقایسه با دیگر تیمارهای مورد بررسی، کارایی بیشتری در کنترل علف‌های هرز نشان داد، به‌طوری‌که زیست‌توده‌ی آنها در شرایط غرقاب دائم و تناوبی به‌ترتیب ۹ و ۲۶ درصد کمتر از پهباد و سمپاش پستی بود. همچنین، در خصوص علف‌هرز‌پیزور، تیمار وجین دستی تحت شرایط آبیاری تناوبی با کارایی حدود ۳۰ درصد بالاتر نسبت به سایر تیمارهای مؤثرتر، دارای عملکرد بهتری بود و در شرایط آبیاری غرقاب دائم نیز عملکرد مشابهی نشان داد. از نظر عملکرد اقتصادی برنج، تیمار وجین دستی با ۳۹۴۲ کیلوگرم در هکتار در آبیاری تناوبی و ۴۴۷۸ کیلوگرم در هکتار در آبیاری غرقاب دائم تفاوت معنی‌داری با تیمارهای مؤثر سمپاشی شده با پهباد (۳۸۷۴ و ۴۳۳۱ کیلوگرم در هکتار) و سمپاش پستی (۳۹۳۵ و ۴۴۲۸ کیلوگرم در هکتار) در شرایط مشابه نداشت و این تیمارها از این نظر در یک گروه آماری قرار گرفتند.

در یک بررسی مشابه، کارایی کنترل علف‌های هرز سوروف و پیزور در شش هفته پس از تیمار به‌ترتیب ۹۵ و ۹۹ درصد گزارش شد. همچنین عملکرد دانه در تیمار علف‌کشی سایه‌الوفوپ‌بوتیل + پنو کسولام با استفاده از سمپاش پستی مشابه تیمار وجین دستی (۲۱/۲ تن در هکتار) بود. تراکم بالای علف‌های هرز و خسارت اولیه قبل از حذف از رقابت، همراه با جوانه‌زنی و رویش متناوب و آلودگی مجدد مزرعه، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کاهش عملکرد در این مطالعه عنوان شده‌اند (Yaghoubi, 2021). در یک بررسی دیگر، کاربرد پنو کسولام + سایه‌الوفوپ‌بوتیل با دز ۱۳۵ گرم ماده مؤثره در هکتار و حجم محلول ۳۰۰ لیتر در هکتار در ۱۲ مزرعه برنج نشایی، منجر به کنترل ۹۲ تا ۹۷ درصدی علف‌های هرز و دستیابی به میانگین عملکرد دانه ۴/۱۳ تن در هکتار شد (Yadav et al., 2018). در همین مطالعه، علف‌کش بیس‌پایریپاک‌سدیم با دز ۲۵ گرم ماده مؤثره در هکتار به‌عنوان تیمار شاهد مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد آن به‌طور معنی‌داری کمتر بوده و ۳/۸ تن در هکتار گزارش شد.

یافته‌های حاضر با مطالعات پیشین مبنی بر کارایی مشابه پهپاد و سمپاش پستی در سیستم‌های کشت برنج هم‌راستا است (Jeevan *et al.*, 2023; Paul *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2024; Paul *et al.*, 2025). به‌نظر می‌رسد که جریان هوای رو به پایین ناشی از ملخ‌های پهپاد، با تسهیل رسوب یکنواخت‌تر قطرات بر سطح زیرین برگ‌های علف‌های هرز، نقش مهمی در افزایش کارایی سمپاشی ایفا می‌کند (Paul *et al.*, 2025). همچنین، علف‌کش‌هایی همانند علف‌کش مورد بررسی در این تحقیق (پنوکسولام)، که هم از طریق برگ و هم از طریق ریشه قابلیت جذب دارند، در صورت کاربرد با پهپاد که ورود علف‌کش را در خاک تسریع می‌کند احتمالاً اثربخشی بیشتری خواهند داشت.

جدول ۴. مقایسه میانگین تاثیر روش آبیاری مزرعه و حجم‌های محلول بر زیست‌توده علف‌های هرز سوروف و پیروز در هفته ششم پس از اعمال تیمار و عملکرد اقتصادی برنج در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک.

حجم محلول ($l\ ha^{-1}$) (^۱)	زیست‌توده سوروف ($g\ m^{-2}$)	زیست‌توده پیروز ($g\ m^{-2}$)	عملکرد اقتصادی ($kg\ ha^{-1}$)
آبیاری تناوبی			
۱۰	۱۱۰/۷۲ (۴۵) B	۱۰۱/۰۴ (۴۲) B	۲۴۱۲ C
۲۰	۷۸/۵۲ (۶۱) C	۸۳/۶۱ (۵۲) C	۳۱۷۸ B
۴۰	۷۶/۵۱ (۶۲) C	۸۵/۳۶ (۵۱) C	۳۲۵۵ B
۸۰	۶۰/۴۰ (۷۰) D	۶۶/۲۰ (۶۲) D	۳۸۷۴ A
۱۶۰	۵۸/۳۷ (۷۱) D	۶۴/۴۵ (۶۳) D	۳۹۱۴ A
سمپاش پستی	۵۵/۱۸ (۷۳) D	۶۱/۲۰ (۶۵) D	۳۹۳۵ A
شاهد عدم کنترل	۲۰۱/۳۲ (۰) A	۱۷۴/۱۹ (۰) A	۶۸۶۸۴ D
شاهد وجین دستی	۵/۲۶ (۹۷) E	۱۱/۷۰ (۹۳) E	۳۹۴۲ A
LSD _{0.05}	۱۵/۴۴	۱۱/۳۴	۰/۲۷
آبیاری غرقاب دائم			
۱۰	۶۰/۵۰ (۶۸) B	۶۵/۲۱ (۶۳) B	۲۶۸۲ B
۲۰	۲۴/۵۸ (۸۷) C	۱۵/۸۶ (۹۱) C	۴۳۳۱ A
۴۰	۲۲/۶۹ (۸۸) C	۱۵/۹۲ (۹۱) C	۴۳۶۹ A
۸۰	۲۴/۵۸ (۸۷) C	۱۲/۳۴ (۹۳) CD	۴۳۸۵ A
۱۶۰	۲۲/۶۹ (۸۸) C	۱۲/۳۷ (۹۳) CD	۴۴۱۱ A
سمپاش پستی	۱۸/۵۴ (۹۰) C	۹/۸۸ (۹۴) CD	۴۴۲۸ A
شاهد عدم کنترل	۱۸۹/۱۰ (۰) A	۱۷۶/۲۵ (۰) A	۷۶۰ C
شاهد وجین دستی	۴/۹۶ (۹۷) D	۷/۱۶ (۹۶) D	۴۴۷۸ A
LSD _{0.05}	۱۳/۲۶	۷/۷۲	۰/۶۰

برای زیست‌توده علف‌های هرز، مقادیر خارج از پرانتز بیانگر میزان زیست‌توده (گرم بر متر مربع) و مقادیر داخل پرانتز نشان‌دهنده درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد بدون علف‌کش هستند. عملکرد اقتصادی برنج نیز بر حسب کیلوگرم در هکتار بدون محاسبه درصد تغییر گزارش شده است. میانگین‌هایی که در یک ستون با حروف یکسان دنبال شده‌اند، در سطح احتمال $P = 0.05$ بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که کارایی دوز توصیه‌شده علف‌کش هنگام کاربرد با پهباد، تحت تأثیر حجم محلول و شیوه آبیاری قرار دارد. در شرایط آبیاری غرقاب دائم، افزایش حجم محلول از ۱۰ به ۲۰ لیتر در هکتار موجب بهبود معنی‌دار کنترل علف‌های هرز و افزایش عملکرد برنج شد؛ با این حال، افزایش بیشتر حجم محلول تا ۱۶۰ لیتر در هکتار، فاقد اثر افزایشی یا کاهشی معنی‌دار بر شاخص‌های بررسی‌شده بود. در مقابل، در سامانه آبیاری تناوبی، پاسخ علف‌های هرز و محصول به حجم محلول سمپاشی متفاوت بود؛ به‌گونه‌ای که افزایش حجم محلول تا ۸۰ لیتر در هکتار سبب کاهش زیست‌توده علف‌های هرز و افزایش عملکرد دانه شد، و حجم‌های بالاتر نیز فاقد اثر منفی بر کارایی علف‌کش بود. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر برجسته می‌شود که شدت خسارت گونه‌های مشکل‌زا نظیر سوروف و پی‌زور در شرایط آبیاری تناوبی افزایش می‌یابد و افزایش حجم محلول، با بهبود نفوذپذیری و پوشش‌دهی، به کنترل مطلوب‌تر این گونه‌ها کمک می‌کند.

رابطه مثبت بین حجم محلول جهت سمپاشی و عملکرد برنج در ارقام اصلاح‌شده پرمحصول با زیست‌توده بالاتر، حائز اهمیت بیشتری است؛ زیرا نگرانی از کاهش کارایی بر اثر کاربرد حجم‌های بالاتر محلول وجود ندارد. بنابراین، استفاده از حجم‌های بیشتر جهت پوشش‌دهی مناسب کانوبی و علف‌های هرز رویش‌یافته یا مستقر در زیر کانوبی امکان‌پذیر و قابل توصیه است. همچنین، با توجه به عدم مشاهده کاهش کارایی در سطوح بالاتر حجم محلول و در صورت سازگاری فرمولاسیون‌ها، اختلاط علف‌کش‌های برگ‌پاش با خاک‌پاش‌ها و نیز اختلاط علف‌کش‌ها با قارچ‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها یا کودها برای کاربرد هوایی در شرایط ضروری، قابل ارزیابی و استفاده خواهد بود.

نتایج همچنین نشان داد که کارایی پهباد سمپاش از نظر کنترل علف‌های هرز و عملکرد محصول، در صورت رعایت حجم بهینه محلول، قابل مقایسه با سمپاش پشته رایج است و تفاوت معنی‌داری میان دو روش مشاهده نشد. بنابراین، با توجه به مزایایی همچون سرعت عملیات بالا، کاهش مصرف آب جهت تهیه محلول سمپاشی، کاهش نیروی انسانی و یکنواختی توزیع محلول، پهبادهای جایگزینی کارآمد و ایمن برای روش‌های سنتی سمپاشی محسوب می‌شوند که هم‌اکنون با کمبود نیرو مواجه است. از این‌رو، توصیه می‌شود کشاورزان و کارشناسان، با در نظر گرفتن ویژگی‌های مزرعه، گونه هدف و خصوصیات فرمولاسیون، از ظرفیت‌های بالقوه پهباد در مدیریت تلفیقی آفات و علف‌های هرز بهره‌برداری کنند. در سطح کلان، سیاست‌گذاران نیز می‌توانند با توسعه آموزش‌های تخصصی، تدوین دستورالعمل‌های بومی‌سازی‌شده و تسهیل دسترسی به فناوری پهباد، زمینه کاربرد گسترده و ایمن این فناوری را در نظام زراعی کشور فراهم سازند.

با وجود تأیید اثربخشی پهباد در کنترل علف‌های هرز برنج نشایی، بررسی چند محور کلیدی در پژوهش‌های آینده ضروری است. تلفیق علف‌کش‌های پیش‌رویشی و پس‌رویشی با مکانیزم عمل متفاوت می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی راهبردهای پایدار مدیریت تلفیقی داشته باشد. با توجه به بهره‌گیری از فرمولاسیون روغنی (OD) در این مطالعه و سازگاری بالای آن با شرایط غرقاب و غیرغرقاب، ارزیابی سایر فرمولاسیون‌ها نظیر 'EC'، 'SC' و 'WP' به‌منظور تعیین رفتار، پایداری و اثربخشی آن‌ها در شرایط مختلف مزرعه‌ای ضروری است. همچنین تنوع شدید اقلیمی کشور، به‌ویژه مناطق گرم و خشک با دمای بالا، بادهای فصلی و گردوغبار می‌تواند با تغییر الگوی تبخیر و پراکنش قطرات، حجم بهینه محلول را تحت تأثیر قرار دهد؛ از این‌رو، انجام پایش‌های منطقه‌ای برای تعیین حجم مناسب در شرایط اقلیمی مختلف ضرورت دارد. مطالعات دقیق‌تر درباره ویژگی‌های فیزیکی پاشش شامل اندازه و تراکم قطرات، نقش مویان‌ها در بهبود پوشش و کاهش بادبردگی، و تأثیر آن‌ها بر کارایی کنترل علف‌های هرز، می‌تواند در بهینه‌سازی کاربرد هوایی نقشی محوری داشته باشد. در نهایت، با توجه به کاهش

1. Emulsifiable Concentrate

2. Wettable Powder

حجم محلول مصرفی در سمپاشی هوایی، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی این روش نسبت به روش‌های سنتی، به‌ویژه از منظر کاهش پتانسیل آلودگی منابع آب و خاک، می‌تواند در تدوین سیاست‌های توسعه پایدار در بخش کشاورزی تعیین‌کننده باشد.

قدردانی

از مؤسسه تحقیقات برنج کشور و بنیاد ملی علم ایران (INSF) به‌دلیل حمایت از اجرای این پژوهش (شماره شناسه ۴۰۲۰۳۴۰) سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- اسماعیلی، م.ع.، احمدی خطیر، م.، عباسی، ر.، و کاوه، م. (۱۴۰۱). ارزیابی صفات مورفولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف برنج (*Oryza sativa* L.) در کشت مستقیم در رقابت با علف‌های هرز. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۲(۲)، ۱۴۵-۱۵۹. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44978.2650>
- باقری، ن.، نیک‌روز، ص.، صفری، م.، و شیخی گرجان، ع. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد پهپاد سمپاش در کنترل شته کلزا. *ماشین‌های کشاورزی*، ۱۴(۲)، ۱۳۵-۱۴۶. <https://doi.org/10.22067/jam.2022.79329.1129>
- صفائی‌نژاد، م.، قاسمی‌نژاد رایینی، م.، و تاکی، م. (۱۴۰۴). ارزیابی مزرعه‌ای و اقتصادی استفاده از پهپاد سمپاش در مقایسه با سمپاش بوم‌دار به‌منظور کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد در مزارع گندم. *ماشین‌های کشاورزی*، ۱۵(۴)، ۵۸۷-۶۰۳. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>
- صفری، م.، باقری، ن.، شیخی گرجان، ع.، و ظریف نشاط، س. (۱۴۰۱). ارزیابی و مقایسه پهپاد سمپاش جهت کنترل آفت توتا در محصول گوجه‌فرنگی. *تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی*، ۲۳(۱)، ۸۴-۱۶. <https://doi.org/10.22092/amsr.2023.361037.1435>
- صفری، م.، باقری، ن.، و شیخی گرجان، ع. (۱۴۰۲). ارزیابی فنی و اقتصادی استفاده از پهپاد سمپاش در مقایسه با سمپاش‌های رایج برای کنترل کرم هلیوتیس گوجه‌فرنگی. *تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی*، ۲۴(۸۵)، ۹۱-۱۱۰. <https://doi.org/10.22092/amsr.2024.364474.1474>
- صفری، م.، و شیخی گرجان، ع. (۱۳۹۹). مقایسه پهپاد با سمپاش تراکتوری لانس‌دار در کنترل زنجبرک خرما. *دانش گیاهپزشکی/ایران*، ۱۳(۱)، ۵۱-۲۶. <https://doi.org/10.22059/ijpps.2020.281898.1006894>
- ظریف نشاط، س.، سعیدی راد، م.ح.، صفری، م.، معتمدالشریعتی، ح. ر. و ناصری، م. (۱۴۰۱). ارزیابی فنی پهپاد سمپاش برای مبارزه با علف‌های هرز گندم و مقایسه‌ی آن با روش‌های مرسوم. *تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی*، ۲۳(۸۲)، ۵۳-۷۰. <https://doi.org/10.22092/amsr.2022.360045.1427>
- کشتکار، ا.، ساسان‌فر، ح.، علی‌وردی، ا.، و زند، ا. (۱۴۰۲). کاربرد پخش‌سطحی علف‌کش‌ها با استفاده از پهپاد سمپاش: بله یا خیر؟ در *مجموعه مقالات دهمین همایش ملی علوم علف‌های هرز ایران* (صص ۵۹۶-۶۰۱). همدان: انجمن علوم علف‌های هرز ایران.
- نوروزیه، ش.، رضایی اصل، ع.، جوکار، م.، و شفیع‌پور، ا.م. (۱۴۰۱). ارزیابی کیفیت پاشش پهپاد سمپاش در مقایسه با سمپاش‌های رایج در مزرعه پنبه. *پژوهش‌های پنبه/ایران*، ۱۰(۱)، ۱۰۹-۱۳۲. <https://doi.org/10.22092/ijcr.2023.360187.1187>
- یعقوبی، ب. (۱۴۰۰). *مطالعه کارایی علف‌کش پنوکسولام + سای‌هالوفوپ‌بوتیل (OD 6%) در کنترل علف‌های هرز برنج* [گزارش نهایی طرح پژوهشی]. مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

REFERENCES

- Ampong-Nyarko, K., & De Datta, S. K. (1991). *A handbook for weed control in rice*. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.
- Bagheri, N., Safari, M., & Garjan, A. S. (2024). Performance evaluation of the UAV sprayer in controlling *Brevicoryne brassicae* L. pest in Canola. *Performance Evaluation*, 14(2), 135-146. <https://doi.org/10.22067/jam.2022.79329.1129>. (In Persian).
- Bharad, N. B., Vagadia, V. R., Lakhani, A. L., Khanpara, B. M., & Dulawat, M. S. (2024). A comprehensive review of unmanned aerial vehicle (UAV) sprayers used in modern agriculture. *Journal of Scientific*

- Research and Reports, 30(10), 573-585. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i102483>.
- Bir, M. S. H., Ali, M. A., Aktar, M. M., Park, K. W., Shahbaz, M., Chong, K. P., ... & Ondrasek, G. (2024). Growth competition between rice (*Oryza sativa*) and barnyardgrass (*Echinochloa oryzicola*) under varying mono-/mixed cropping patterns and air temperatures. *Agronomy*, 14(3), 574. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030574>.
- Brim-DeForest, W. B., Al-Khatib, K., & Fischer, A. J. (2021). Emergence and early growth of multiple herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). *Weed Technology*, 36(1), 101-109. <https://doi.org/10.1017/wet.2021.86>.
- Camargo, E. R., Senseman, S. A., Haney, R. L., Guice, J. B., & McCauley, G. N. (2013). Soil residue analysis and degradation of saflufenacil as affected by moisture content and soil characteristics. *Pest management science*, 69(12), 1291-1297. <https://doi.org/10.1002/ps.3494>.
- Castelani, P., Antunes, M. C., & Leal, F. (2016). Oil dispersion formulations: Stability assessment and field trials. In *35th Symposium on Pesticide Formulation and Delivery Systems: Pesticides and Adjuvant Formulations in 2014* (pp. 1-14). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP1587201401292>.
- Chauhan, B. S. (2012). Weed ecology and weed management strategies for dry-seeded rice in Asia. *Weed Technology*, 26(1), 1-13. <https://doi.org/10.1614/WT-D-11-00105.1>.
- Chauhan, B. S. (2021). Differential germination response of Navua sedge (*Cyperus aromaticus*) populations to environmental factors. *Weed Science*, 69(6), 673-680. <https://doi.org/10.1017/wsc.2021.48>.
- Chauhan, B. S., & Johnson, D. E. (2008). Germination ecology of Chinese sprangletop (*Leptochloa chinensis*) in the Philippines. *Weed Science*, 56, 820-825. <https://doi.org/10.1614/WS-08-070.1>.
- Chauhan, B. S., & Johnson, D. E. (2009). Ecological studies on *Cyperus difformis*, *Cyperus iria* and *Fimbristylis miliacea*: Three troublesome annual sedge weeds of rice. *Annals of Applied Biology*, 155(1), 103-112.
- Chauhan, B. S., & Johnson, D. E. (2011). Growth response of direct-seeded rice to oxadiazon and bispyribac-sodium in aerobic and saturated soils. *Weed Science*, 59(1), 119-122. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00075.1>.
- Chauhan, B. S., Kumar, V., & Mahajan, G. (2014). Research needs for improving weed management in rice. *Indian Journal of Weed Science*, 46(1), 1-13.
- Chen, G. Q., An, K., Chen, Y., & Zhuang, X. X. (2023). Double-spraying with different routes significantly improved control efficacies of herbicides applied by unmanned aerial spraying system: A case study with rice herbicides. *Crop Protection*, 167, 106203. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106203>.
- Diao, X., Silver, J., Takeshima, H., & Zhang, X. (2020). An evolving paradigm for Africa and synthesis of the lessons from Asia. In X. Diao, H. Takeshima, & X. Zhang (Eds.), *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* (pp. 3-67). International Food Policy Research Institute (IFPRI). <https://doi.org/10.2499/9780896293809>.
- Dorji, S., Chauhan, B. S., Baltazar, A. M., & Johnson, D. (2013). Effect of flooding depth and pretilachlor rate on emergence and growth of three rice weeds: Junglerice (*Echinochloa colona*), smallflower umbrella sedge (*Cyperus difformis*), and Ludwig (*Ludwigia hyssopifolia*). *Canadian Journal of Plant Protection*, 1, 43-48.
- Esmaeli, M.A., Ahamadi khatir, M., Abbasi, R., & Kaveh, M. (2022). Evaluation of Morphological Traits, Yield and Yield Components of Different Rice Cultivars (*Oryza sativa* L.) in Direct Cultivation in Competition with Weeds. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 32(2), 145-159. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.44978.2650>. (In Persian).
- Gašić, S., Brkić, D., & Tomašević, A. (2011). Oil dispersion with abamectin as active ingredient. *Pesticidi i fitomedicina*, 26(4), 409-413. <https://doi.org/10.2298/PIF1104409G>.
- Gugan, G., & Haque, A. (2023). Path planning for autonomous drones: Challenges and future directions. *Drones*, 7(3), 169. <https://doi.org/10.3390/drones7030169>.
- Hafeez, A., Husain, M. A., Singh, S. P., Chauhan, A., Khan, M. T., Kumar, N., ... & Soni, S. K. (2022). Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: A review. *Information Processing in Agriculture*, 9(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.02.002>.
- Hazrati, Z., Yaghoubi, B., Hosseini, P., & Chauhan, B. S. (2023). Herbicides for monochoria (*Monochoria vaginalis*) control in transplanted rice. *Weed Technology*, 37(6), 598-605. <https://doi.org/10.1017/wet.2023.50>.
- Hill, J. E., Mortimer, A. M., Namuco, O. S., & Janiya, J. D. (2001). Water and weed management in direct-seeded rice: Are we ahead in the right decision? In *Proceedings of the International Rice Research Conference* (Los Baños, Philippines, March 31-April 3) (pp. 491-510). International Rice Research

- Institute.
- Huang, Z., Wang, C., Li, Y., Zhang, H., Zeng, A., & He, X. (2023). Field evaluation of spray drift and nontargeted soybean injury from unmanned aerial spraying system herbicide application under acceptable operation conditions. *Pest Management Science*, 79(3), 1140–1153. <https://doi.org/10.1002/ps.7285>.
- Jeevan, N., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K., Arthanari, P. M., Sritharan, N., ... & Manikandan, S. (2023). Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Applied & Natural Science*, 15(3), 972–977. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i3.4753>.
- Junkes, G. V., Avila, L. A., Kemmerich, M., Gehrke, V. R., Fipke, M. V., & Camargo, E. R. (2022). Imidazolinone herbicide dissipation in rice fields as affected by intermittent and continuous irrigation. *Advances in Weed Science*, 40, e020220094. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:00006>.
- Kala, S., Agarwal, A., Kant, K., Mishra, B. K., Sogan, N., Kumar, N., & Kumar, J. (2023). An environmentally benign oil dispersion/phytoextract system for improved retention upon foliage and control of aphids in spice crops. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137449>.
- Kent, R. J., & Johnson, D. E. (2001). Influence of flood depth and duration on growth of lowland rice weeds, Côte d'Ivoire. *Crop Protection*, 20(8), 691–694. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(01\)00034-5](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(01)00034-5).
- Keshtkar, E., Sasanfar, H., Aliverdi, A., & Zand, E. (2023). Broadcast application of herbicides using drone sprayers: Yes or no? In *Proceedings of the 10th National Iranian Weed Science Congress* (pp. 596–601). Hamedan, Iran: Iranian Weed Science Society. (In Persian).
- Kim, J. K., Kang, Y. S., Lee, M. H., Kim, S. S., & Park, S. T. (2001). Wet-seeded rice cultivation technology in Korea. In S. Peng & B. Hardy (Eds.), *Rice research for food security and poverty alleviation* (pp. 545–560). International Rice Research Institute.
- Kim, S. K., Ahmad, H., Moon, J. W., & Jung, S. Y. (2021). Nozzle with a feedback channel for agricultural drones. *Applied Sciences*, 11(5), 2138. <https://doi.org/10.3390/app11052138>.
- Klauser, F., & Pauschinger, D. (2021). Entrepreneurs of the air: Sprayer drones as mediators of volumetric agriculture. *Journal of Rural Studies*, 84, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.02.016>.
- Koger, C. H., Dodds, D. M., & Reynolds, D. B. (2007). Effect of adjuvants and urea ammonium nitrate on bispyribac efficacy, absorption, and translocation in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). I. Efficacy, rainfastness, and soil moisture. *Weed Science*, 55(5), 399–405. <https://doi.org/10.1614/WS-06-146.1>.
- Lu, J., Oookawa, T., & Hirasawa, T. (2000). The effects of irrigation regimes on the water use, dry matter production, and physiological responses of paddy rice. *Plant and Soil*, 223, 209–218. <https://doi.org/10.1023/A:1004898504550>.
- Maazi Kajal, V., Yaghoubi, B., Farahpour, A., Mehrpouyan, M., & Vahedi, A. (2013). Comparison of the efficacy of penoxsulam with some common paddy rice herbicides. *Cereal Research*, 2(3), 223–235.
- Mandal, M., Jain, R., Pandey, A., & Pandey, R. (2022). An economical helping hand for farmers—agricultural drone. In *Smart agriculture automation using advanced technologies: Data analytics and machine learning, cloud architecture, automation and IoT* (pp. 165–176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6124-2_10.
- Marchesi, C., & Chauhan, B. S. (2019). The efficacy of chemical options to control *Echinochloa crus-galli* in dry-seeded rice under alternative irrigation management and field layout. *Crop Protection*, 118, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.12.016>.
- Mathiassen, S. K., & Kudsk, P. (1999). Effects of simulated dust deposits on herbicide performance. *Pesticide Science*, 55(3), 277–284.
- Moody, K. (1992). Weed management in wet-seeded rice in tropical Asia. In *Proceedings of the International Symposium on Biological Control and Integrated Management of Paddy and Aquatic Weeds in Asia* (pp. 123–130). Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.
- Naylor, R. (1996). *Herbicides in Asian rice: Transitions in weed management*. Stanford University Press.
- Nowrouzieh, S., Rezaei Asl, A., Jokar, M., & Shafipour, A. (2022). Evaluation of UAV sprayer quality in compared to common sprayers in cotton field. *Iranian Journal of Cotton Researches*, 10(1), 109–132. <https://doi.org/10.22092/ijcr.2023.360187.1187>. (In Persian).
- Nyarko, K. A., & de Datta, S. K. (1991). Significance of weeds in rice farming. In K. A. Nyarko & S. K. de Datta (Eds.), *A handbook of weed control in rice* (pp. 1–5). Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute.
- Paul, R. A. I., Arthanari, P. M., Pazhanivelan, S., Kavitha, R., & Djanaguiraman, M. (2023). Drone-based herbicide application for energy saving, higher weed control and economics in direct-seeded rice (*Oryza*

- sativa). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(7), 704-709. <https://doi.org/10.56093/ijas.v93i7.137859>.
- Paul, R. A. I., Arthanari, P. M., Peramaiyan, P., Kumar, V., Bagavathiannan, M., & Sabarivasan, R. (2025). UAV-based herbicide application for efficient weed control and resource savings in direct-seeded rice. *Crop Protection*, 107129. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107129>.
- Paul, R. A. I., Palanisamy, M. A., Peramaiyan, P., Kumar, V., Bagavathiannan, M., Gurjar, B., ... & Ramasamy, K. (2024). Spray volume optimization with UAV-based herbicide application for effective droplet deposition and weed control in direct-seeded rice. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1491842. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1491842>.
- Qin, K., Keeney, F., & Oliver, M. (2010). Assessment of oil dispersion pesticide formulations using rheology and near infrared centrifugation techniques. *Journal of ASTM International*, 7(10), 1-11. <https://doi.org/10.1520/JAI102884>.
- Rao, A. N., Johnson, D. E., Sivaprasad, B., Ladha, J. K., & Mortimer, A. M. (2007). Weed management in direct-seeded rice. *Advances in agronomy*, 93, 153-255. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)93004-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)93004-1).
- Rytwo, G., & Tropp, D. (2001). Improved efficiency of a divalent herbicide in the presence of clay, by addition of monovalent organocations. *Applied Clay Science*, 18(5-6), 327-333. [https://doi.org/10.22067/10.1016/S0169-1317\(01\)00035-7](https://doi.org/10.22067/10.1016/S0169-1317(01)00035-7).
- Safaeinezhad, M., Ghasemi-Nejad Raeini, M., & Taki, M. (in press). Field and economic evaluation of spraying drones versus boom sprayers for weed and yellow rust control in wheat fields. *Journal of Agricultural Machinery*. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>. (In Persian).
- Safari, M., & Sheikhi Garjan, A. (2020). Comparison between unmanned aerial vehicle and tractor lance sprayer against *Dubas bug Ommatissus lybicus* (Hemiptera: Tropiduchidae). *Iranian Journal of Plant Protection Science*, 51(1), 13-26. <https://doi.org/10.22059/ijpps.2020.281898.1006894>. (In Persian).
- Safari, M., Bagheri, N., & Sheikhi Garjan, A. (2023). Technical and economical evaluation of UAV sprayer in comparison with conventional methods to control tomato *Helicoverpa amigera*. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 24(85), 91-110. <https://doi.org/10.22092/AMSR.2024.364474.1474>. (In Persian).
- Safari, M., Bagheri, N., Sheikhi Garjan, A., & Zarifneshat, S. (2023). Evaluation and comparison of sprayer drone to control tuta pest in tomato crop. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 23(84), 1-16. <https://doi.org/10.22092/amsr.2023.361037.1435>. (In Persian).
- Shan, C., Wang, G., Wang, H., Xie, Y., Wang, H., Wang, S., ... & Lan, Y. (2021). Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1), 74-81. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.6129>.
- Shan, C., Wu, J., Song, C., Chen, S., Wang, J., Wang, H., ... & Lan, Y. (2022). Control efficacy and deposition characteristics of an unmanned aerial spray system low-volume application on corn fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Advanced Application Technology for Plant Protection: Sensing, Modelling, Spraying System and Equipment*, 16648714, 174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.900939>.
- Sharifi Kalyani, F., Babaei, S., Zafarsohrabpour, Y., Nosratti, I., Gage, K., & Sadeghpour, A. (2024). Investigating the impacts of airborne dust on herbicide performance on *Amaranthus retroflexus*. *Scientific Reports*, 14(1), 3785. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54134-5>.
- Smith Jr, R. J., & Fox, W. T. (1973). Soil water and growth of rice and weeds. *Weed Science*, 21(1), 61-63. <https://doi.org/10.1017/S0043174500031702>.
- Southwood, T. R. E., & Henderson, P. A. (2000). *Ecological methods* (3rd ed.). Blackwell Science.
- Supriya, C., Murali Arthanari, P., Kumaraperumal, R., & Sivamurugan, A. P. (2021). Optimization of spray fluid for herbicide application for drones in irrigated maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Engineering Research*, 16(2), 123-130. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2021/v33i2130665>.
- Tsolakis, N., Bechtsis, D., Vasileiadis, G., Menexes, I., & Bochtis, D. D. (2022). Sustainability in the digital farming era: A cyber-physical analysis approach for drone applications in agriculture 4.0. In *Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme IV: Actions* (pp. 29-53). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84156-0_2.
- Vu, D. H., Stuerz, S., & Asch, F. (2023). Rice–weed competition in response to nitrogen form under high and low transpirational demand. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(1), 27-40. <https://doi.org/10.1111/jac.12562>.
- Wang, G., Lan, Y., Qi, H., Chen, P., Hewitt, A., & Han, Y. (2019). Field evaluation of an unmanned aerial

- vehicle (UAV) sprayer: Effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat. *Pest Management Science*, 75(6), 1546–1555. <https://doi.org/10.1002/ps.5321>.
- Yadav, D. B., Singh, N., Duhan, A., Yadav, A., & Punia, S. S. (2018). Penoxsulam + cyhalofop-butyl (premix) evaluation for control of complex weed flora in transplanted rice and its residual effects in rice–wheat cropping system. *Indian Journal of Weed Science*, 50(4), 333–339. <https://doi.org/10.5958/0974-8164.2018.00072.2>.
- Yaghoubi, B. (2021). *Study of the efficacy of Penoxsulam + Cyhalofop-butyl (OD 6%) on paddy rice weed control* [Project final report]. Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization. (In Persian).
- Yaghoubi, B. and Pourreza, Z. 2023. Effectiveness of pre and post-emergence herbicides for knotgrass (*Paspalum distichum*) control in paddy rice. *Iranian J. of Weed Sci*, 6(2), 23-40. <https://doi.org/10.22034/ijws.2023.361291.1428>. (In Persian).
- Yaghoubi, B., Aminpanah, H., & Chauhan, B. S. (2022). Performance of different herbicides on pondweed (*Potamogeton nodosus*) in rice. *Weed Technology*, 36(2), 270-275. <https://doi.org/10.1017/wet.2022.5>.
- Yaghoubi, B., Aminpanah, H., & Sharifi, P. (2021). Efficacy of some new herbicides for barnyardgrass controlling (*Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv) in different rice genotypes. *Journal of Plant Production Research*, 28(1), 169-184. <https://doi.org/10.22069/jopp.2021.17598.2626>.
- Yan, M., Xiangliang, R., Yanhua, M., Jianli, S., Deying, M., Zheng, L., Wei, F., Weili, J., Hongyan, H., Dan, W., Zhiguo, W., & Yubin, L. (2016). Review on result of spraying defoliant by unmanned aerial vehicles in cotton field of Xinjiang. *China Cotton*, 43(12), 16–20. <https://doi.org/10.11963/issn.1000-632X.201612004>.
- Zarifneshat, S., Saeidirad, M. H., Safari, M., Motame AlShariati, H. R., & Naseri, M. (2022). Technical Evaluation of Agriculture Drone Sprayer for Control of Wheat Weeds and Compare with Conventional Methods. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 23(82), 53-70. <https://doi.org/10.22092/amsr.2022.360045.1427>. (In Persian).
- Zimdahl, R. L. (2018). *Fundamentals of Weed Science*, 5th ed. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811143-7.00014-7>.