



Evaluation the effect of binary mixing interactions of triflurosulfuron-methyl, chloridazone, and clopyralid on common purslane (*Portulaca oleracea* L.) by isobole models

SAMIRA AZIMI NAIBI¹, AKBAR ALIVERDI²✉ , GOUDARZ AHMADVAND³, ALI ASGHAR CHITBAND⁴

1, 2, 3. MSc student in Agrotechnology - Weed Science, Associate Professor, Full Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran; 4. Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran

(Received: January 2025; Accepted: March 2025)

Abstract

To investigate effect of mixing triflurosulfuron-methyl, chloridazone, and clopyralid on common purslane, three experiments were separately conducted at outdoor condition at Bu-Ali Sina University, Hamadan in the summer of 2023. In each experiment, 0, 6.25, 12.5, 25, 50, and 100% of the labeled dose of the two herbicides were prepared in the mixture ratios of (100:0), (80:20), (60:40), (40:60), (20:80), and (0:100) and applied at the 4-5 leaf stage of common purslane. The mixability of the herbicides was evaluated using an appropriate isobole model, after fitting a suitable isobole model (based on a lack-of-fit test), on the ED₅₀ values (herbicide rate required to control 50% of common purslane) obtained from different mixture ratios. The good fit of the linear Additive Dose model on the ED₅₀ values obtained from different mixture ratios of chloridazone + triflurosulfuron-methyl indicates an additive effect between them; therefore, they are mixable. The good fit of the nonlinear Hewlett model on the ED₅₀ values obtained from different mixture ratios of clopyralid + triflurosulfuron-methyl ($\lambda = 1.66$) indicates a synergistic effect between them; therefore, they are also mixable. While the good fit of the nonlinear Woelund model on the ED₅₀ values obtained from different mixture ratios of clopyralid + chloridazone ($\eta_1 = 1.7$ and $\eta_2 = 3.8$) indicates an antagonistic interaction between them, thus they are not mixable.

Keywords: Additive effect, antagonistic effect, Hewlett model, synergistic effect, Voelund model



مقاله پژوهشی

ارزیابی اثر برهمکنش های اختلاط دوتایی تری فلوسولفورون متیل، کلریدازون و کلوپیرالید روی علف هرز خرفه (*Portulaca oleracea* L.) با استفاده از مدل های هم اثر

سمیرا عظیمی نایی^۱، اکبر علی وردی^۲ , گودرز احمدوند^۳، علی اصغر چیت بند^۴ 

۱، ۲، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، اگر و تکنولوژی گرایش علوم علف های هرز، دانشیار، استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران؛ ۴- استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

(تاریخ دریافت: دی ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: فروردین ۱۴۰۴)

چکیده

با هدف بررسی اثر اختلاط دوتایی تری فلوسولفورون متیل، کلریدازون و کلوپیرالید روی علف هرز خرفه، سه آزمایش جداگانه در محیط بیرون در دانشگاه بوعلی سینا همدان در تابستان ۱۴۰۲ اجرا شد. در هر آزمایش، مقادیر ۰، ۶/۲۵، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد دُز برچسب شده از دو علف کش در قالب نسبت های اختلاط (۱۰۰:۰)، (۸۰:۲۰)، (۶۰:۴۰)، (۴۰:۶۰)، (۲۰:۸۰) و (۰:۱۰۰) تهیه و در مرحله چهار تا پنج برگی خرفه به کار برده شدند. برهمکنش های اختلاط علف کش ها پس از برازش یک مدل هم اثر مناسب (براساس آزمون عدم برازش) روی مقادیر ED_{50} (مقدار علف کش لازم برای کنترل ۵۰ درصدی خرفه) به دست آمده از نسبت های مختلف اختلاط تعیین شد. برازش مناسب مدل خطی دُز افزایشی روی مقادیر ED_{50} به دست آمده از نسبت های مختلف اختلاط کلریدازون + تری فلوسولفورون متیل حاکی از وجود اثر افزایشی بین آن هاست؛ لذا، آن ها اختلاط پذیر هستند. برازش مناسب مدل غیر خطی هولت روی مقادیر ED_{50} به دست آمده از نسبت های مختلف اختلاط کلوپیرالید + تری فلوسولفورون متیل (λ برابر ۱/۶۶) حاکی از وجود اثر هم افزایی بین آن هاست؛ لذا، آن ها نیز اختلاط پذیر هستند. در حالی که برازش مناسب مدل غیر خطی ویلوند روی مقادیر ED_{50} به دست آمده از نسبت های مختلف اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون (η_1 برابر ۱/۷ و η_2 برابر ۳/۸) حاکی از وجود اثر هم کاهی بین آن هاست؛ لذا، اختلاط این دو علف کش توصیه نمی شود.

واژه های کلیدی: اثر افزایشی، اثر هم افزایی، اثر هم کاهی، مدل هولت، مدل ویلوند

مقدمه

چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) گیاهی با مسیر فتوسنتزی سه کربنه از خانواده تاج‌خروسیان (Amaranthaceae) است که جهت استحصال شکر کشت و کار می‌شود. در سال ۲۰۲۳، ۴/۵ میلیون هکتار از اراضی جهان زیر کشت چغندرقد رفت تا ۲۸۱/۱ میلیون تن ریشه چغندرقد تولید شود. در همین سال، سهم ایران از این اراضی تقریباً ۱/۹ درصد و از این تولید تقریباً ۱/۸ درصد بود (FAO, 2023). رشد رویشی روزانه چغندرقد از آن رقیب بسیار ضعیفی در برابر علف‌های هرزی برای کسب منابع (نور، آب و مواد غذایی) ساخته است. به همین دلیل، طول دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز در چغندرقد بسیار طولانی است. محققان آن را بیش از ۸۰ روز برآورد کردند که از روز پنجم پس از رویش شروع می‌شود. عدم کنترل علف‌های هرز تا ۳۰ روز پس از رویش چغندرقد عملکرد ریشه آن را تا ۴۵ درصد کاهش داد (Soroka and Gadzhieva, 2006). تاکنون، ۲۲ گونه علف‌هرز پهن‌برگ و شش گونه علف‌هرز باریک‌برگ در مزارع چغندرقد ایران مشاهده و گزارش شده است (Zand et al., 2019). علف‌هرز پهن‌برگ، یک ساله، تابستانه خرفه (*Portulaca oleracea* L.) با مسیر فتوسنتزی چهار کربنه که متعلق به تیره خرفه (Portulacaceae) است، از جمله علف‌های هرز مهم مزارع چغندرقد کشور و جهان محسوب می‌شود. خرفه در رتبه نهم بدترین علف‌های هرز جهان قرار دارد و به عنوان یک گیاه دگرآسیب نیز شناخته شده است. محققان نشان دادند که برگ و ریشه خرفه حاوی ترکیبات دگرآسیبی است که اثرات بازدارندگی بر جوانه‌زنی و رشد رویشی چغندرقد دارد (Rashidi et al., 2021). تاکنون، گزارش مقاومت خرفه به علف‌کش‌های لینورون و آترازین (بازدارنده‌های فتوسنتز در فتوسیستم II) در آمریکا مستند شده است (Masabni and Zandstra, 1999).

کنترل شیمیایی رایج‌ترین روش برای مدیریت علف‌های هرز در کشاورزی است زیرا کاربرد علف‌کش‌ها آسان، ارزان و کارآمد است. با این حال، عدم کشف علف‌کش با نحوه عمل

جدید در ۲۵ سال گذشته، همراه با تکیه گسترده به علف‌کش‌های موجود، تکامل مقاومت علف‌های هرز به علف‌کش‌ها را به گونه‌ای ارتقاء داده است که تا به امروز، ۲۷۳ گونه علف‌هرز مقاوم شده به ۲۱ نحوه عمل علف‌کش مختلف (از ۳۱ نحوه عمل علف‌کش) در سرتاسر جهان گزارش شده است (Le et al. 2024; Heap, 2025). استفاده از علف‌کش‌ها با نحوه‌های عمل مختلف به عنوان استراتژی مهم برای جلوگیری از مقاومت به علف‌کش محسوب می‌شود. یک رویکرد برای اجرای این موضوع اختلاط علف‌کش‌ها در مخزن است. اختلاط علف‌کش‌ها با نحوه‌های عمل مختلف، شانس بقا و تکثیر افراد مقاوم را کاهش می‌دهد، به‌ویژه زمانی که مکانیسم‌های مقاومت مبتنی بر تغییر در محل هدف علف‌کش باشد (Barbieri et al., 2022).

سه احتمال را در اختلاط دوتایی علف‌کش‌ها می‌توان انتظار داشت: ۱) اثر هم‌افزایی که منجر به افزایش کارایی علف‌کش‌ها در کنترل علف‌های هرز می‌شود. در نتیجه، امکان بهینه‌سازی مصرف علف‌کش‌ها میسر می‌شود. این موضوع از آنجایی حائز اهمیت است که تصویر اجتماعی از علف‌کش‌ها بسیار بد است زیرا اثرات سوء آن‌ها بر موجودات غیر هدف، ایجاد آلودگی در آب‌های سطحی و زیر سطحی و وجود باقیمانده آن‌ها در مواد غذایی در تحقیقات متعددی به اثبات رسیده است (Jing et al., 2016). ۲) اثر افزایشی که منجر به صرفه‌جویی اقتصادی از طریق جایگزینی علف‌کش ارزان قیمت با علف‌کش گران قیمت می‌شود. ۳) اثر هم‌کاهی که به سبب کاهش در کارایی کنترل علف‌های هرز به وسیله علف‌کش‌ها می‌شود که باید از آن اجتناب کرد (Majidi et al., 2023). تاکنون، هشت پهن‌برگ‌کش برای کاربرد پس رویشی علف‌های هرز در مزارع چغندرقد کشور به ثبت رسیده است که عبارتند از تری‌فلوسولفورون‌متیل (بازدارنده فعالیت آنزیم استولاکتات سیتاز در مسیر بیوسنتز اسیدهای آمینه والین، لوسین و ایزولوسین)، کلریدازون، متامیترون، فن‌مدیفام، دس‌مدیفام (بازدارنده‌های فتوسنتز در فتوسیستم II)، اتوفومیست (بازدارنده

مواد و روش‌ها

قبل از اجرای آزمایش، آزمون سازگاری فیزیکی و شیمیایی اختلاط ترکیبات شیمیایی استفاده شده در این آزمایش با رعایت ترتیب اختلاط ترکیبات شیمیایی بر اساس فرمولاسیون اجرا گردید (Finch *et al.*, 2024). مخلوط‌ها پس از گذشت ۳۰ دقیقه از نظر تشکیل رسوب، لجن یا جدا شدن فازهای مایع بررسی شد و سازگاری فیزیکی و شیمیایی ترکیبات مورد تأیید قرار گرفت.

این آزمایش در فضای باز (بیرون گلخانه) محوطه دانشگاه بوعلی سینا در اوایل تابستان ۱۴۰۲ اجرا شد. برای هر اختلاط دوتایی علف‌کش‌ها (تری‌فلوسولفورون متیل + کلریدازون، تری‌فلوسولفورون متیل + کلوپیرالید و کلریدازون + کلوپیرالید)، یک آزمایش جداگانه و با فاصله یک هفته‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا خواهد شد؛ به طوری که دو علف‌کش در مقادیر ۰، ۶/۲۵، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد دُز برچسب شده در قالب نسبت‌های مخلوط (۱۰۰:۰)، (۸۰:۲۰)، (۶۰:۴۰)، (۴۰:۶۰)، (۲۰:۸۰) و (۰:۱۰۰) از دو علف‌کش مخلوط و به کار برده شدند. هر تیمار چهار تکرار داشت و برای هر آزمایش نیز شاهد بدون کاربرد علف‌کش جهت انجام مقایسه در نظر گرفته شد. دُز برچسب شده برای علف‌کش‌های تری‌فلوسولفورون متیل (سافاری، معلقه خشک ۵۰ درصد)، کلوپیرالید (لونتول، مایع حل شونده در آب ۳۰ درصد) و کلریدازون (پیرامین، پودر مرطوب شونده ۶۵ درصد) به ترتیب ۱۲، ۱۸۰، ۳۲۰۰ گرم ماده موثره در هکتار است. تیمارهای علف‌کشی به کار رفته در آزمایش به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

بذرهای خرفه (*P. oleracea* L.) سال گذشته از محوطه دانشگاه جمع‌آوری شده بود و طی یک آزمایش جوانه‌زنی، محرز گردید که بذرها دارای خواب ناچیزی هستند؛ لذا، به عملیات خواب‌شکنی بذر نیازی نبود. خرفه در گلدان‌های ۱۳×۱۳×۱۳ لیتری پلاستیکی قهوه‌ای رنگ با سطح مربع ۱۳×۱۳ سانتی‌متر پرورش یافت. خاک بستر بذر دارای بافت لومی شنی بود که از مزرعه مجاور جمع‌آوری و به مقدار مساوی داخل

فعالیت آنزیم آلونگاز در مسیر بیوستز اسیدهای چرب بسیار شاخه بلند)، پروپیزامید (بازدارنده تقسیم سلولی) و کلوپیرالید (شبه اکسین). گزارش شده است که اختلاط فن‌مدیفام + دس‌مدیفام + اتوفومیست دارای اثر هم‌افزایی بوده است (Wilson, 1994) که منجر به ارائه فرمولاسیون از پیش مخلوط آن‌ها از سوی تولیدکنندگان شده است. افزودن تری‌فلوسولفورون متیل به فن‌مدیفام + دس‌مدیفام + اتوفومیست باعث کاهش کارایی آن در کنترل بابونه کاذب (*Tripleurospermum perforatum* (Merat.) M. ولی افزایش کارایی آن در کنترل سلمه‌تره (*Chenopodium album* L.) شده است، بدون این‌که تأثیری بر عملکرد ریشه چغندرقد داشته باشد (Deveikyte *et al.*, 2015). افزودن کلریدازون به فن‌مدیفام + دس‌مدیفام + اتوفومیست دارای اثر افزایشی در کنترل تاج ریزی سیاه و تاج خروس ریشه قرمز شده است (Chitband *et al.*, 2018). در حالی که افزودن کلوپیرالید به فن‌مدیفام + دس‌مدیفام + اتوفومیست در کنترل تاج ریزی سیاه (Chitband *et al.*, 2018) دارای اثر هم‌افزایی ولی در کنترل تاج خروس ریشه قرمز اثر افزایشی داشته است. اختلاط پروپیزامید + اتوفومیست، ضمن نمایش اثر هم‌افزایی در کنترل سس (*Cuscuta campestris* Yunk.)، باعث افزایش محتوی کلروفیل و بهبود رشد چغندرقد شده است (Hosseyni *et al.*, 2022). اختلاط کلریدازون + کلوپیرالید در کنترل تاج ریزی سیاه، خرفه و تاج خروس ریشه قرمز دارای اثر هم‌کاهی بوده است (Chitband *et al.*, 2017). اختلاط فن‌مدیفام + اتوفومیست + متامیترون در کنترل علف‌های هرز در مزرعه چغندرقد بهتر از کاربرد تنهایی آن‌ها عمل کرده. اختلاط کلریدازون + متامیترون اثر هم‌افزایی در کنترل علف‌های هرز مزرعه چغندرقد داشته است (Paradowski and Praczyk, 2004). با توجه به عدم اطلاع از برهمکنش اختلاط تری‌فلوسولفورون متیل با سایر علف‌کش‌های چغندرقد، پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار اختلاط دوتایی تری‌فلوسولفورون متیل، کلریدازون و کلوپیرالید روی علف‌هرز خرفه انجام گرفت.

گلدان‌ها اضافه شد. ویژگی خاک شامل ۱۲ درصد رس، ۲۷ درصد سیلت، ۶۰ درصد ماسه، ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر هدایت الکتریکی، پی‌اچ ۷/۶، ۱.۱ درصد مواد آلی، ۵۷ پی‌پی‌ام فسفر، ۳۶۸ پی‌پی‌ام پتاسیم، و ۰/۱ درصد نیتروژن بود. پشت از کشت، گلدان‌ها به گونه‌ای آبیاری شدند تا زه‌آب آن خارج شود. سپس، تعداد ۲۰ بذر در هر گلدان روی سطح خاک توزیع و به میزان ۰/۵ سانتی‌متر خاک روی آن‌ها اضافه شد. آبیاری‌های بعدی گلدان‌ها با توجه به نیاز گیاهان و به مقدار برابر برای هر گلدان انجام شد. گیاهان در دو مرحله یک و دو برگگی تنک شدند تا نهایتاً شش بوته در هر گلدان حفظ شود. تیمارهای علف‌کشی در مرحله چهار تا پنج برگگی خرفه توسط یک سمپاش پستی شارژی مجهز به نازل بادبونی لبه یکنواخت ۱۱۰۰۲ با حجم خروجی ۲۳۰ لیتر در هکتار در فشار سه بار انجام شدند. براساس توصیه برچسب برای افزودن مویان غیریونی به محلول پاشش، تمامی محلول‌های پاشش حاوی مویان غیریونی ترند ۹۰ با غلظت ۰/۱ درصد حجمی بودند.

چهار هفته پس از تیمار، اندام هوایی گیاهان از سطح خاک برداشت و بلافاصله وزن تر آن‌ها توزین و در تجزیه و تحلیل

آماري استفاده شد. پاسخ وزن تر اندام‌های هوایی خرفه به تیمارها با روش تجزیه و تحلیل رگرسیون غیرخطی با کمک مدل چهار پارامتری لگ لجستیک (معادله ۱) تخمین زده شد (Ritz et al., 2015).

$$Y = \frac{C + (D - C)}{1 + \exp[b(\log X - \log ED_{50})]} \quad (\text{معادله ۱})$$

در این معادله، Y بیانگر وزن تر اندام‌های هوایی خرفه، پارامترهای D و C به ترتیب حدود مجانب بالا و پایین وزن تر اندام هوایی خرفه در مقادیر صفر و بی‌نهایت علف‌کشی، پارامتر ED₅₀ بیانگر مقدار علف‌کشی لازم (X) برای کاهش ۵۰ درصدی وزن تر اندام هوایی خرفه بین حدود مجانب بالا و پایین (C و D) است و پارامتر b متناسب با شیب منحنی در محدوده پارامتر ED₅₀ می‌باشد. آنالیز داده‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام گرفت. براساس آزمون عدم برازش (p-value < ۰/۰۵) مدل ۴ پارامتری لگ لجستیک برازش مناسبی روی داده‌ها فراهم نکرد، از اینرو، از مدل ۳ پارامتری لگ لجستیک (معادله ۲) برای برازش روی داده‌ها استفاده شد. با بررسی نمودار باقی‌مانده‌ها در محیط نرم افزار، توزیع مستقل، تصادفی و یکنواخت آن‌ها محرز شد.

جدول ۱- تیمارهای علف‌کشی به‌کار رفته در مطالعه

Table 1- Herbicide treatments used in the study

Herbicides in the mixture	Ratios and doses used of each herbicide in the mixture (g/ha)					
	(100:0)	(80:20)	(60:40)	(40:60)	(20:80)	(0:100)
Chloridazon + Triflurosulfuron-methyl	3200 + 0	2560 + 2.4	1920 + 4.8	1280 + 7.2	640 + 9.6	0 + 12
	1600 + 0	1280 + 1.2	960 + 2.4	640 + 3.6	320 + 4.8	0 + 6
	800 + 0	640 + 0.6	480 + 1.2	320 + 1.8	160 + 2.4	0 + 3
	400 + 0	320 + 0.3	240 + 0.6	160 + 0.9	80 + 1.2	0 + 1.5
	200 + 0	160 + 0.15	120 + 0.3	80 + 0.45	40 + 0.6	0 + 0.75
Clopyralid + Triflurosulfuron-methyl	180 + 0	144 + 2.4	108 + 4.8	72 + 7.2	36 + 9.6	0 + 12
	90 + 0	72 + 1.2	54 + 2.4	36 + 3.6	18 + 4.8	0 + 6
	45 + 0	36 + 0.6	27 + 1.2	18 + 1.8	9 + 2.4	0 + 3
	22.5 + 0	18 + 0.3	13.5 + 0.6	9 + 0.9	4.5 + 1.2	0 + 1.5
	11.25 + 0	9 + 0.15	6.75 + 0.3	4.5 + 0.45	2.25 + 0.6	0 + 0.75
Clopyralid + Chloridazon	180 + 0	144 + 640	108 + 1280	72 + 1920	36 + 2560	0 + 3200
	90 + 0	72 + 320	54 + 640	36 + 960	18 + 1280	0 + 1600
	45 + 0	36 + 160	27 + 320	18 + 480	9 + 640	0 + 800
	22.5 + 0	18 + 80	13.5 + 160	9 + 240	4.5 + 320	0 + 400
	11.25 + 0	9 + 40	6.75 + 80	4.5 + 120	2.25 + 160	0 + 200

علاوه بر تیمارهای بالا، یک دز صفر از هر یک از علف‌کش‌ها به عنوان شاهد (بدون علف‌کش) در آزمایش گنجانده شد.

In addition to the above treatments, a zero dose of each herbicide was included in the experiment as a control (without herbicide)

هستند. اگر η_1 و η_2 بزرگتر از ۱ باشند نشان دهنده وجود اثر هم‌کاهی بین دو علف‌کش و اگر η_1 و η_2 کوچکتر از ۱ باشند نشان دهنده وجود اثر هم‌افزایی بین دو علف‌کش است. سایر اجزای مدل همانند مدل دُز افزایشی است.

(معادله ۶)

$$\left(\frac{d_1}{\delta_1}\right)^{\eta_1} + \left(\frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2}\right)^{1-\eta_1} + \left(\frac{d_2}{\delta_2}\right)^{\eta_2} + \left(\frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2}\right)^{1-\eta_2} = 1$$

نتایج و بحث

منحنی‌های واکنش وزن تر خرفه به مقدار علف‌کش‌های مخلوط شده با نسبت‌های مختلف در شکل ۱ نمایش داده شده است و مقادیر مولفه ED_{50} برای هر منحنی در جدول ۲ ذکر شده است. در آزمایش اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل مشخص شد که کاربرد ۲۲۹۵/۴ گرم ۳۷۱۲/۳ گرم ماده موثره کلریدازون (با نسبت خالص ۱۰۰:۰) توانست وزن تر خرفه را به ترتیب به میزان ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش دهد. در شکل ۲ که مربوط به منحنی‌های هم‌اثر می‌باشد، مقدار مذکور به صورت نقطه سیاه بر روی خط ایزوبول مربوطه (خط افقی) مشخص است. همچنین، کاربرد ۸/۷ و ۱۰/۱ گرم ماده موثره تری‌فلوسولفورون‌متیل (با نسبت خالص ۰:۱۰۰) توانست وزن تر خرفه را به ترتیب به میزان ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش دهد. در شکل ۲ که مربوط به منحنی‌های هم‌اثر می‌باشد، مقدار ED_{50} به صورت نقطه سیاه بر روی خط ایزوبول مربوطه (خط عمودی) مشخص است. این یافته نشان می‌دهد که کارایی ۲۲۹۵/۴ گرم کلریدازون با کارایی ۸/۷ گرم تری‌فلوسولفورون‌متیل در کنترل خرفه برابر است. به عبارتی دیگر، پتانسیل نسبی برای این دو علف‌کش برابر ۲۶۳/۸ است (جدول ۲) که نشان دهنده فعال‌تر بودن تری‌فلوسولفورون‌متیل در مقایسه با کلریدازون می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، منحنی‌های واکنش وزن تر خرفه به کاربرد انفرادی هر یک از علف‌کش‌های کلریدازون و تری‌فلوسولفورون‌متیل در مقایسه با منحنی‌های مربوط به مخلوط آن‌ها در سمت چپ قرار گرفت که به نوعی نمایشی از

$$Y = \frac{D}{\{1 + \exp[b(\log X - \log ED_{50})]\}} \quad (\text{معادله ۲})$$

پتانسیل نسبی (RP) علف‌کش‌های اختلاط یافته طبق معادله ۳ محاسبه گردید. در این معادله، z_1 و z_2 به ترتیب علف‌کش‌های اول و دوم هستند.

$$RP = \frac{ED_{50} \text{ for } z_1}{ED_{50} \text{ for } z_2} \quad (\text{معادله ۳})$$

برای ارزیابی برهمکنش اختلاط دوتایی علف‌کش‌ها از سه مدل هم‌اثر (Isobole model) زیر استفاده شد به‌طوری که در صورت برازش نامناسب مدل اول روی داده‌ها، از مدل دوم و در صورت برازش نامناسب مدل دوم روی داده‌ها، از مدل سوم استفاده شد (Søbye et al., 2011). مناسب بودن مدل‌ها با آزمون عدم برازش ($p\text{-value} > 0.05$) بررسی و تأیید شد.

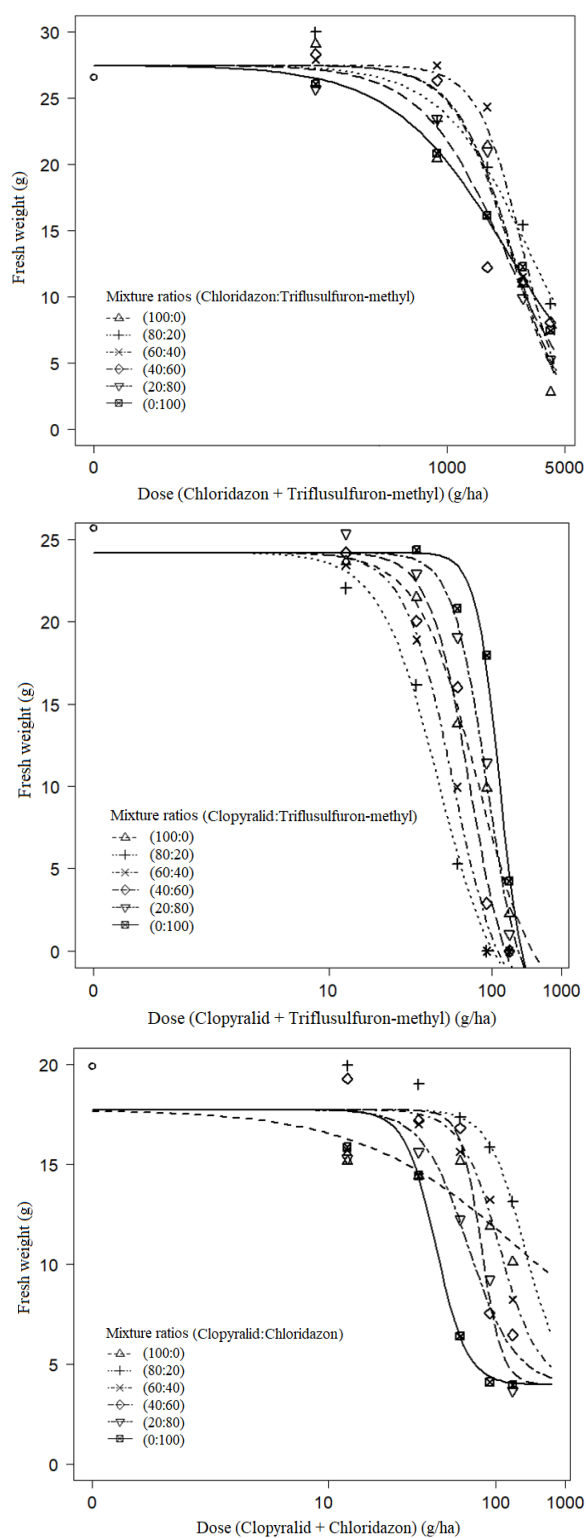
مدل خطی دُز افزایشی (Voelund Model (nonlinear)) (معادله ۴) می‌تواند وجود اثر افزایشی در اختلاط علف‌کش‌ها را نمایان سازد. در این معادله، d_1 و d_2 به ترتیب بیانگر مقدار علف‌کش‌های اول و دوم موجود در مخلوط که اثر علف‌کشی برابری ایجاد می‌کنند و δ_1 و δ_2 به ترتیب بیانگر مقدار خالص از علف‌کش‌های اول و دوم برای کنترل ۵۰ درصدی علف‌هرز می‌باشند.

$$\frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2} = 1 \quad (\text{معادله ۴})$$

مدل غیرخطی هِولت (Hewlett Model (non-linear)) (معادله ۵) با یک انحناى تحذب یا تقعرى می‌تواند وجود اثرات هم‌افزایی و هم‌کاهی در اختلاط علف‌کش‌ها را نمایان سازد. در این رابطه، λ مولفه مربوط به اثر متقابل است. اگر λ بزرگتر از ۱ باشد نشان دهنده وجود اثر هم‌افزایی بین دو علف‌کش و λ کوچکتر از ۱ نشان دهنده وجود اثر هم‌کاهی بین دو علف‌کش است. سایر اجزای مدل همانند مدل دُز افزایشی است.

$$\left(\frac{d_1}{\delta_1}\right)^{1/\lambda} + \left(\frac{d_2}{\delta_2}\right)^{1/\lambda} = 1 \quad (\text{معادله ۵})$$

مدل غیرخطی وِیلوند (Voelund Model (nonlinear)) (معادله ۶) با دو انحناى تحذب یا تقعرى می‌تواند وجود اثرات هم‌افزایی و هم‌کاهی در اختلاط علف‌کش‌ها را در صورت برازش نامناسب مدل غیرخطی هِولت نمایان سازد. در این رابطه، η_1 و η_2 مولفه‌های تعیین کننده تحذب منحنی هم‌اثر



شکل ۱- منحنی‌های واکنش وزن تر علف‌هرز خرفه به مقدار علف‌کش‌های مخلوط شده در نسبت‌های مختلف

Fig. 1. Response curves of the fresh weight of common purslane to the dose of herbicides mixed in different ratios

کاهش کارایی علف‌کش‌ها در حالت مخلوط است ولی این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود. طبق آزمون عدم برازش روی مدل خطی دُز افزایشی برازش مناسبی روی مقادیر ED_{50} به‌دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل فراهم کرد که برازش آن با خط انتظار نیز موازی بود. این نتیجه نشان می‌دهد که اثر اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل به حالت افزایشی است. به عبارتی دیگر، اثر اختلاط دو علف‌کش فوق با همدیگر همانند اثر هر یک از علف‌کش‌ها در کاربرد خالص آن‌هاست. با استفاده از مقادیر ED_{90} برای تعیین اثرات اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل براساس مدل گنش پیوسته اثر افزایشی، به‌جز یک مشاهده، تمامی مشاهدات روی خط هم‌اثر قرار گرفتند. بدین معنی که کارایی اختلاط‌ها برابر مقدار پیش‌بینی شده مطابق با مدل اثر افزایشی است. براساس این نتیجه نیز می‌توان به وجود حالت افزایشی در اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل پی برد (شکل ۳). اگرچه اثر هم‌کاهی یا هم‌افزایی در اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل مشاهده نشد، اما این دو علف‌کش را می‌توان به صورت مخلوط به‌کار برد تا از تمام مزایای مطرح شده برای اختلاط علف‌کش‌ها (بجز بهینه‌سازی مصرف علف‌کش‌ها) بهره‌مند شد. محققان اتفاق نظر دارند که حتی در صورتی که اثر اختلاط دو علف‌کش از حالت افزایشی پیروی کند، هنوز دلایل منطقی برای کاربرد مخلوط آن‌ها وجود دارد. افزایش طیف کنترل علف‌های هرز، کاهش هزینه کاربرد و به تبع، کاهش هزینه تولید محصولات کشاورزی، کاهش تردد ماشین‌آلات در مزرعه که از فشردگی خاک جلوگیری می‌کند، و صرفه‌جویی در زمان از جمله مزایای کاربرد مخلوط دو علف‌کش دارای اثر افزایشی است. با توجه به نحوه عمل متفاوت کلریدازون و تری‌فلوسولفورون‌متیل، جلوگیری از بروز مقاومت در علف‌های هرز را نیز می‌توان به مزایای کاربرد مخلوط آن‌ها اضافه کرد. تحقیقات قبلی با استفاده از مدل‌های هم‌اثر نشان داده است که کاربرد مخلوط آترازین + نورفلورازون روی علف‌هرز توق (*Xanthium strumarium*)

جدول ۲- تأثیر کاربرد علف‌کش‌ها در نسبت‌های مختلف بر مقدار علف‌کش (گرم ماده موثره در هکتار) لازم برای کاهش ۵۰ و ۹۰ درصدی وزن تر علف‌هرز خرفه (ED_{50} و ED_{90}).

Table 2. The effect of the application of herbicides in different ratios on the dose of herbicide (g a.i. ha⁻¹) required to reduce 50 and 90% of the fresh weight of common purslane (ED_{50} and ED_{90}).

Herbicides in the mixture	Ratios	ED_{50}	ED_{90}	RP	λ	η_1	η_2
Chloridazon + Triflurosulfuron-methyl	(100:0)	2295.4 (100.2)	3712.3 (387.9)	263.8 (38.1)			
	(80:20)	2255.9 (136.3)	3647.3 (526.3)				
	(60:40)	1539.1 (78.6)	2489.0 (301.6)				
	(40:60)	901.9 (44.7)	1457.1 (169.7)				
	(20:80)	423.5 (28.6)	684.2 (43.9)				
	(0:100)	8.7 (1.3)	10.1 (1.9)				
Clopyralid + Triflurosulfuron-methyl	(100:0)	66.5 (16.7)	117.2 (48.5)	10.9 (1.2)	1.6 (0.1)		
	(80:20)	24.0 (2.3)	58.9 (6.9)				
	(60:40)	23.7 (3.1)	54.7 (8.0)				
	(40:60)	21.2 (4.3)	47.5 (11.4)				
	(20:80)	19.0 (7.1)	40.6 (17.9)				
	(0:100)	6.1 (2.1)	8.9 (5.1)				
Chloridazon + Clopyralid	(100:0)	2805.9 (223.8)	3119.2 (103.1)	31.7 (2.8)		1.7 (0.1)	3.8 (0.2)
	(80:20)	4067.4 (238.6)	4522.2 (236.3)				
	(60:40)	4292.2 (119.0)	4772.1 (169.9)				
	(40:60)	4360.6 (189.5)	4557.5 (211.6)				
	(20:80)	4922.6 (353.4)	5145.7 (556.0)				
	(0:100)	88.4 (9.6)	92.2 (26.1)				

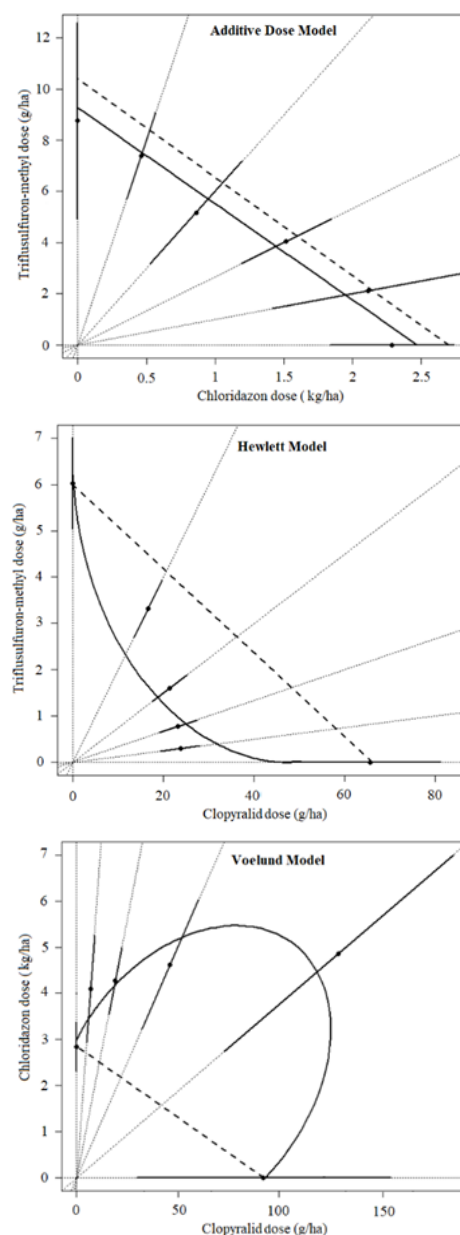
اعداد داخل پرانتز خطای استاندارد هستند. RP: پتانسیل نسبی

Standard errors are in parentheses. RP is relative potential

همچنین، کاربرد مخلوط ایمازتاپیر+گلایفوسیت روی علف‌هرز حلفه (*Imperata cylindrica*) رشد یافته در حاشیه کانال‌های آبرسانی دارای اثر افزایشی است (Teymourinia et al., 2023). در آزمایش اختلاط کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل مشخص شد که مقدار ۶۶/۵ و ۱۱۷/۲ گرم ماده موثره کلوپیرالید (با نسبت خالص ۱۰۰:۰) برای کاهش ۵۰ و ۹۰ درصدی وزن تر خرفه لازم بود (جدول ۲) که مقدار ED_{50} به صورت نقطه سیاه بر روی خط ایزوبول افقی مشخص است (شکل ۲). در حالی که تأثیر برابر، به ترتیب به مقادیر ۶/۱ و ۸/۹ گرم ماده موثره تری‌فلوسولفورون‌متیل (با نسبت خالص ۰:۱۰۰) نیاز بود. مقدار مذکور به صورت نقطه سیاه بر روی خط ایزوبول عمودی مشخص است. به عبارتی دیگر، کارایی کاربرد ۶۶/۵ گرم از

دارای اثر افزایشی است (Armel et al., 2007). کاربرد مخلوط کلوپیرالید + گلایفوسیت روی علف‌هرز تلخه (*Acroptilon repens*) دارای اثر افزایشی است (Abbaspoor et al., 2013). کاربرد مخلوط کلریدازون + فرمولاسیون علف‌کش بتانال پروگرس (که مخلوطی از علف‌کش‌های دس‌مدیقام + فن‌مدیقام + اتوفومیسیت است) روی علف‌هرز تاج‌ریزی سیاه (*Solanum nigrum*) دارای اثر افزایشی است (Chitband et al., 2018). محققان نقش ماده افزودنی در بروز اثرات در اختلاط علف‌کش‌ها را گزارش کردند؛ به‌طوری که کاربرد مخلوط بتانازون + آسی‌فلورفن با ماده افزودنی روغنی روی علف‌هرز سلمه‌تره (*Chenopodium album*) دارای اثر افزایشی ولی بدون ماده افزودنی دارای اثر هم‌افزایی است (Barbieri et al., 2022).

کلوپیرالید در کنترل خرفه برابر کارایی کاربرد ۶/۱ گرم از تری‌فلوسولفورون‌متیل است. به عبارتی دیگر، پتانسیل نسبی برای این دو علف‌کش برابر ۱۰/۹ است (جدول ۲) که نشان‌دهنده فعال‌تر بودن تری‌فلوسولفورون‌متیل در مقایسه با کلوپیرالید می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، منحنی‌های واکنش وزن تر خرفه به کاربرد انفرادی هر یک از علف‌کش‌های کلریدازون و تری‌فلوسولفورون‌متیل در مقایسه با منحنی‌های مربوط به مخلوط آن‌ها در سمت راست قرار گرفت که به نوعی نمایشی از افزایش معنی‌دار کارایی علف‌کش‌ها در حالت مخلوط است. طبق آزمون عدم برازش ($p\text{-value} = 0/08$)، مدل غیرخطی هولت برازش مناسبی روی مقادیر ED_{50} به‌دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل فراهم کرد. برازش مدل غیرخطی هولت روی مقادیر ED_{50} به‌دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل در مقایسه با خط مورد انتظار دارای انحنای مقعری بود. علاوه بر این، مقدار λ برابر ۱/۶۶ برآورد شد که نشان‌دهنده وجود اثر هم‌افزایی بین دو علف‌کش مذکور است. با استفاده از مقادیر ED_{90} برای تعیین اثرات اختلاط کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل براساس مدل گنش پیوسته اثر افزایشی، تمامی مشاهدات زیر خط هم‌اثر قرار گرفتند. بدین معنی که اختلاط‌ها موثرتر از مقدار پیش‌بینی شده مطابق با مدل اثر افزایشی بودند. براساس این نتیجه نیز می‌توان به وجود حالت هم‌افزایی در اختلاط کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل پی برد (شکل ۳). در تحقیقات قبلی، اثر هم‌افزایی بین علف‌کش‌های شبه اکسین و بازدارنده آنزیم استولاکتات سینتاز با اختلاط علف‌کش‌های توفوردی بی + پریدیت (Hicks *et al.*, 1998)، دایکمبا + ایمازتاپیر (Kelley *et al.*, 2005)، کلوپیرالید + اتامتسولفورون‌متیل (Blackshaw, 1989) و ام‌سی‌پی + متسولفورون (Hollaway *et al.*, 1996) گزارش شده است. اثر هم‌افزایی توفوردی + پاراکوات و توفوردی + گلوپوسینات آمونیوم و اثر افزایشی توفوردی + گلیفوسیت نیز اخیراً گزارش شده است (Chitband *et al.*, 2025). اگرچه سازوکارهای

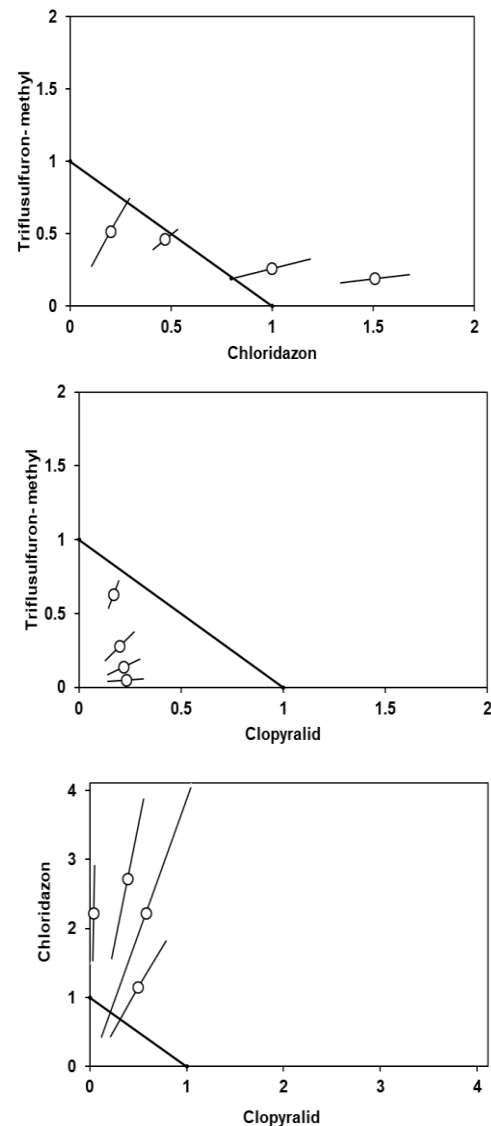


شکل ۲- منحنی‌های هم‌اثر برازش داده شده با مدل‌های مناسب در محیط نرم‌افزار R برای تعیین برهمکنش علف‌کش‌های کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل (مدل دُز افزایشی)، کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل (مدل هولت) و کلوپیرالید + کلریدازون (مدل ویلوند) روی علف‌هرز خرفه. خط نقطه‌چین هم‌اثر مدل دُز افزایشی است. خط یکپارچه برازش مدل هم‌اثر مناسب است. نقاط نشان‌دهنده ED_{50} همراه با خطای استاندارد در فواصل اطمینان ۹۵ درصد هستند.

Fig. 2. Isobole curves fitted with appropriate models using R software to determine herbicides interaction of chloridazone + triflusaluron-methyl (Additive dose model), clopyralid + triflusaluron-methyl (Hewlett model), and clopyralid + chloridazone (Voelund model) on common purslane. The straight dot-dashed line is the additive dose model isobole; the curved solid line is the best fitting isobole model. The points represent the ED_{50} and their corresponding standard error at 95% confidence intervals.

در آزمایش اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون مشخص شد که مقادیر ۸۸/۴ و ۹۲/۲ گرم ماده موثره کلوپیرالید (با نسبت خالص ۱۰۰:۰) به ترتیب برای کاهش ۵۰ و ۹۰ درصدی وزن تر خرفه لازم بود (جدول ۲) که مقدار ED_{50} به صورت نقطه سیاه بر روی خط ایزوبول افقی مشخص است (شکل ۲). در حالی که تأثیر برابر، به ترتیب به مقادیر ۲۸۰۵/۹ و ۳۱۱۹/۲ گرم ماده موثره کلریدازون (با نسبت خالص ۰:۱۰۰) نیاز بود. مقدار ED_{50} به صورت نقطه سیاه بر روی خط ایزوبول عمودی مشخص است. به عبارتی دیگر، کارایی کاربرد ۸۸/۴ گرم کلوپیرالید در کنترل خرفه برابر کارایی کاربرد ۲۸۰۵/۹ گرم کلریدازون است. به عبارتی دیگر، پتانسیل نسبی برای این دو علف‌کش برابر ۳۱/۷ است (جدول ۲) که نشان دهنده فعال‌تر بودن کلوپیرالید در مقایسه با کلریدازون می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، منحنی‌های واکنش وزن تر خرفه به کاربرد انفرادی هر یک از علف‌کش‌های کلریدازون و تری‌فلوسولفورون‌متیل در مقایسه با منحنی‌های مربوط به مخلوط آن‌ها در سمت چپ قرار گرفت که به نوعی نمایشی از کاهش کارایی معنی‌دار علف‌کش‌ها در حالت مخلوط است. طبق آزمون عدم برازش ($p\text{-value} = ۰/۲۹$)، مدل غیرخطی و بیلوند برازش مناسبی روی مقادیر ED_{50} به دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون فراهم کرد. برازش مدل غیرخطی هولت روی مقادیر ED_{50} به دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون در مقایسه با خط مورد انتظار دارای انحنای محدبی بود. علاوه بر این، مقادیر η_1 و η_2 به ترتیب برابر ۱/۷ و ۳/۸ برآورد شد که نشان دهنده وجود اثر هم‌کاهی بین دو علف‌کش مذکور است. با استفاده از مقادیر ED_{90} برای تعیین اثرات اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون براساس مدل گنش پیوسته اثر افزایشی، تمامی مشاهدات بالای خط هم‌اثر قرار گرفتند. بدین معنی که اختلاط‌ها مؤثرتر از مقدار پیش‌بینی شده مطابق با مدل اثر افزایشی نبودند. براساس این نتیجه نیز می‌توان به وجود حالت هم‌کاهی در اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون پی برد (شکل ۳).

متعدد برای اثر هم‌افزایی بین علف‌کش‌های متعلق به دیگر گروه‌های علف‌کشی گزارش شده است (Barbieri *et al.*, 2022)، اما سازوکار اثر هم‌افزایی بین علف‌کش‌های شبه اکسین و بازدارنده آنزیم استولاکتات سینتاز هنوز مشخص نشده است.



شکل ۳- منحنی‌های هم‌اثر برازش داده شده در محیط نرم‌افزار Excel برای تعیین برهمکنش اختلاط دوتایی علف‌کش‌های کلریدازون، تری-فلوسولفورون‌متیل و کلوپیرالید روی علف‌هرز خرفه. خط پیوسته هم‌اثر مدل دُز افزایشی است. نقاط برحسب ED_{90} همراه با خطای استاندارد مربوطه آن‌ها در فواصل اطمینان ۹۵ درصد رسم شدند.

Fig. 3. Isobole curves fitted by Excel software to determine binary mixing interaction of chloridazone, triflusaluron-methyl, and clopyralid on common purslane. The solid line is the additive dose model isobole. The points are based on ED_{90} and their corresponding standard error at 95% confidence intervals.

برای مثال، اثر هم‌کاهی بین سی‌هالوفوپ‌بوتیل و پروپانیل روی سوروف (*Echinochloa crus-galli*) به این دلیل است که پروپانیل مانع فعالیت آنزیم استراز در علف‌هرز می‌شود. این آنزیم در تبدیل پیش‌علف‌کش سی‌هالوفوپ-بوتیل به علف‌کش اسید سی‌هالوفوپ نقش دارد (Ottis et al., 2005).

نتیجه‌گیری

برازش مناسب مدل خطی دُز افزایشی روی مقادیر ED₅₀ به‌دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل حاکی از وجود اثر افزایشی بین آن‌هاست؛ لذا، آن‌ها اختلاط‌پذیر هستند. برازش مناسب مدل غیرخطی هولت روی مقادیر ED₅₀ به‌دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل حاکی از وجود اثر هم‌افزایی بین آن‌هاست؛ لذا، آن‌ها نیز اختلاط‌پذیر هستند. در حالی که برازش مناسب مدل غیرخطی ویلوند روی مقادیر ED₅₀ به‌دست آمده از نسبت‌های مختلف اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون حاکی از وجود اثر هم‌کاهی بین آن‌هاست؛ لذا، اختلاط این دو علف‌کش توصیه نمی‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش پیشنهاد می‌شود که در سطح مزرعه، واکنش چغندر قند به اختلاط علف‌کش‌های کلریدازون + تری‌فلوسولفورون‌متیل و کلوپیرالید + تری‌فلوسولفورون‌متیل مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان قدردان معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا برای تخصیص گرنت لازم برای این پژوهش هستند که در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد اگر و تکنولوژی گرایش علوم علف‌های هرز به انجام رسید.

به‌طور مشابه، تحقیقات قبلی به وجود اثر هم‌کاهی با اختلاط کلوپیرالید + کلریدازون روی تاج‌ریزی سیاه و تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus*) اشاره داشتند (Chitband et al., 2017). اگرچه سازوکار اثر هم‌کاهی مشاهده شده بین کلوپیرالید + کلریدازون بررسی نشده است، اما دلایل متعددی برای اثر هم‌کاهی بین علف‌کش‌ها وجود دارد که کاهش جذب و انتقال شایع‌ترین آن‌هاست. اثر هم‌کاهی بین گلایفوسیت و دیکامبا روی جاروی قزوینی (*Bassia scoparia*) به‌دلیل کاهش انتقال هر دو علف‌کش مخلوط شده در مقایسه با کاربرد انفرادی آن‌ها گزارش شده است (Ou et al., 2018). یکی از روش‌های متداول که یک علف‌کش می‌تواند بر انتقال علف‌کش دیگری تأثیر بگذارد، خشک شدن سریع سطح برگ است. اثر هم‌کاهی مشاهده شده در اختلاط نیکوسولفورون + آترازین روی دم‌روبه‌ای سبز (*Setaria viridis*) (Schuster et al., 2007)، گلایفوسیت + گلفوسینات روی دم‌روبه‌ای کبیر (*Setaria faberi*) (Besançon et al., 2018) و گلایفوسیت + سافلوناکیل روی گندم سیاه (*Fagopyrum esculentum*) به‌دلیل کاهش جذب و انتقال علف‌کش سیم‌پلاستی موجود در مخلوط به دلیل تخریب سلول‌های اپیدرمی در محل تماس قطره پاشش به وسیله علف‌کش آپوپلاستی یا تماسی موجود در مخلوط گزارش شده است (Ashigh and Hall, 2010). اثر هم‌کاهی اغلب به خواص فیزیکی و شیمیایی محلول پاشش مربوط می‌شود. مخلوط کردن ستوکسیدیم با بنتازون باعث کاهش کارایی ستوکسیدیم در کنترل علف‌های هرز باریک برگ می‌شود که به دلیل اتصال یون سدیم آزاد شده از بنتازون با ستوکسیدیم می‌باشد که باعث تشکیل نمک سدیم-ستوکسیدیم و کاهش جذب آن می‌شود (Wanamarta et al., 1989). سازوکار جالب دیگر اثر هم‌کاهی بین علف‌کش‌ها زمانی رخ می‌دهد که یک علف‌کش بر سرعت متابولیسم علف‌کش دیگر تأثیرگذار باشد.

References

- ABBASPOOR, M., A.A. CHITBAND, M.R. MOLKARA and H. TAVAKOLI. 2013. Using isobolographic analysis for the evaluation of additive, synergism and antagonism effects in binary mixture of glyphosate and clopyralid on *Acroptylon repense* control. Iranian Plant Protection Research. 27: 294-300. DOI: <http://doi.org/10.22067/jpp.v27i3.26731>
- ARMEL, G.R., P.L. RARDON, M.C. MCCOMRICK and N.M. FERRY, 2007. Differential response of several carotenoid biosynthesis inhibitors in mixtures with atrazine. Weed Technology. 21: 947-53. DOI: <http://doi.org/10.1614/wt-06-133.1>
- ASHIGH, J. and J.C. HALL, 2010. Bases for interactions between saflufenacil and glyphosate in plants. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 58: 7335-7343. DOI: <http://doi.org/10.1021/jf100595a>
- BARBIERI, G.F., B.G. YOUNG, F.E. DAYAN, J.C. STREIBIG, H.TAKANO, Jr.A. MEROTTO and L.A. AVILA, 2022. Herbicide mixtures: interactions and modeling. Advances in Weed Science. 40: e020220051. DOI: <http://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five011>
- BERENBAUM, M.C., 1981. Criteria for analyzing interactions between biologically active agents. Advances in Cancer Research. 35: 269-335. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0065-230X\(08\)60912-4](http://doi.org/10.1016/S0065-230X(08)60912-4)
- BESANÇON, T.E., D. PENNER and W.J. EVERMAN, 2018. Reduced translocation is associated with antagonism of glyphosate by glufosinate in giant foxtail (*Setaria faberi*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). Weed Science. 66: 159-167. DOI: 10.1017/wsc.2017.72
- BLACKSHAW R.E. 1989. Synergistic mixes of DPX-A7881 and clopyralid in canola (*Brassica napus*). Weed Technology. 3: 690-695. DOI: <http://doi.org/10.1017/s0890037x00033054>
- BUSI, R., T.A. GAINES and S. POWLES, 2017. Phorate can reverse P450 metabolism-based herbicide resistance in *Lolium rigidum*. Pest Management Science. 73: 410-417. DOI: <http://doi.org/10.1002/ps.4441>
- CHITBAND, A.A., R. GHORBANI, M.H. RASHED MOHASSEL and M. NABIZADE. 2018. Joint action of some usable important broadleaf herbicides in sugar beet. Iranian Plant Protection Research. 31: 374-387. DOI: <http://doi.org/10.22067/jpp.v31i3.50875>
- CHITBAND, A.A., R. GHORBANI, M. NABIZADE and E. ZAIDALI, 2017. Efficacy of mixing common herbicides in control of broadleaf weeds in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Journal of Sugar Beet. 33: 91-102. DOI: <http://doi.org/10.22092/jsb.2017.101878.1099>
- CHITBAND, A.A., V. SARABI and A. ALIVERDI, 2025. Joint action of common herbicides on the control of *Alhagi pseudalhagi* (Bieb.) Desv.: A comparison study. Weed Research. 65: e12679. DOI: <http://doi.org/10.1111/wre.12679>
- DEVEIKYTE, I., L. SARUNAITE and V. SEIBUTIS, 2015. Evaluation of pre- and postemergence herbicide combinations for broadleaved weeds in sugar beet. In: PRICE, A., J. KELTON and L. SARUNAITE. Herbicides, agronomic crops and weed biology. IntechOpen. DOI: <http://doi.org/10.5772/61437>
- FAO. 2023. Food and Agriculture Organization www.fao.org/faostat/en/#data/QC
- FINCH, B., H. WRIGHT-SMITH, J. DAVIS, AND B. SCOTT, 2024. Jar Test Instructions: Assessing Pesticide-Fertilizer Compatibility (Jar Test). University of Arkansas. FSA2166R. www.uaex.uada.edu/publications/PDF/FSA-2166.pdf
- HEAP I, 2025. The international herbicide-resistant weed database. www.weedscience.org
- HICKS, T.V., G.R. WEHTJE and T.L. GREY, 1998. The interaction of pyridate and 2,4-DB in peanut (*Arachis hypogaea*), Florida beggarweed (*Desmodium tortuosum*), and sicklepod (*Senna obtusifolia*). Weed Science. 46: 284-288. DOI: <http://doi.org/10.1017/s0043174500089426>
- HOLLAWAY, K.L., N.D. HALLAM and A.G. FLYNN, 1996. Synergistic joint action of MCPA ester and metsulfuron-methyl. Weed Research. 36: 369-374. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1996.tb01666.x>

- HOSSEYNI, S.M., H. NAJAFI, B. SANI and H. MOZAFARI, 2022. Investigation the effect of the application of single and mixing of propyzamide and ethofumesate herbicides in the control of dodder (*Cuscuta campestris*), grass and broad leaves weeds of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Journal of Crop Ecophysiology. 16: 563-580.
DOI: <http://doi.org/10.30495/JCEP.2023.1932247.1806> (in Persian with English summary)
- JING, X., G. YAO, D. LIU, M. LIU, P. WANG and Z. ZHOU, 2016. Environmental fate of chiral herbicide fenoxaprop-ethyl in water-sediment microcosms. Scientific Reports. 6: 26797.
DOI: <http://doi.org/10.1038/srep26797>
- KELLEY, K.B., L.M. WAX, A.G. HAGER and D.E. RIECHERS, 2005. Soybean response to plant growth regulator herbicides is affected by other postemergence herbicides. Weed Science. 53: 101-112. DOI: <http://doi.org/10.1614/ws-04-078r>
- LE, V.V., A.V. NGUYEN, D.T. LUU, F.B. FRITSCHI, C.T. NGUYEN, T.L. HO, 2024. Inhibitory effects of N-trans-cinnamoyltyramine on growth of invasive weeds and weedy rice. Plant-Environment Interactions. 5: e70017. DOI: 10.1002/pei3.70017
- MAJIDI, M., G. HEIDARI and Y. EMAM, 2023. Qualitative characteristics of sugar beet as affected by different broadleaf herbicides combinations. Iran Agricultural Research. 36: 1-6. DOI: <http://doi.org/10.22099/iar.2017.4126> (in Persian with English summary)
- MASABNI, J.G. and B.H. ZANDSTRA, 1999. Discovery of a common purslane (*Portulaca oleracea*) biotype resistant to linuron. Weed Technology. 13: 599-605.
DOI: <http://doi.org/10.1017/S0890037X00046261>
- OTTIS, B.V., J.D. MATTICE and R.E. TALBERT, 2005. Determination of antagonism between cyhalofop-butyl and other rice (*Oryza sativa*) herbicides in barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 53: 4064-068.
DOI: <http://doi.org/10.1021/jf050006d>
- OU, J., C.R. THOMPSON, P.W. STAHLMAN, N. BLOEDOW and M. JUGULAM, 2018. Reduced translocation of glyphosate and dicamba in combination contributes to poor control of *Kochia scoparia*: evidence of herbicide antagonism. Scientific Reports. 8: 1-11. DOI: <http://doi.org/10.1038/s41598-018-23742-3>
- PARADOWSKI, A. and T. PRACZYK, 2004. Evaluation of selected mixtures of active ingredients for weed control in sugar beet. Progress in Plant Protection. 44: 1004-1007.
DOI: <http://doi.org/10.24425/jppr.2023.146878>
- RASHIDI, S., A.R. YOUSEFI, N. GOICOECHEA, M. POURYOUSEF, P. MORADI, S. VITALINI and M. IRITI, 2021. Allelopathic interactions between seeds of *Portulaca oleracea* L. and crop species. Applied Sciences. 11: 3539.
DOI: <http://doi.org/10.3390/app11083539>
- RITZ, C., F. BATY, J.C. STREIBIG and D. GERHARD, 2015. Dose-response analysis using R. PLoS One. 10: e0146021.
DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0146021>
- SCHUSTER, C.L., K. AL-KHATIB and J.A. DILLE, 2007. Mechanism of antagonism of mesotrione on sulfonylurea herbicides. Weed Science. 55: 429-434.
DOI: 10.1614/ws-06-217.1
- SØBYE, K.W., J.C. STREIBIG, N. CEDERGREEN, 2011. Prediction of joint herbicide action by biomass and chlorophyll a fluorescence. Weed Research. 5:23-32.
DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00824.x>
- SOROKA, S.V. and G.J. GADZHIEVA, 2006. State of weed infestation and features of sugar beet protection in Belarus. Matica Srpska Journal for Natural Sciences. 110: 165-172.
DOI: <http://doi.org/10.2298/ZMSPN0610165S>
- TEYMOURINIA, M., A.A. CHITBAND, G. REZAEI and S. KHAYRANDISH, 2023. The joint action of glyphosate, clethodim, and imazethapyr to control cogongrass (*Imperata cylindrica* L. Beauv) in the margin of the irrigation canals (A case study using two different approaches). Crop Protection. 174: 106413.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106413>
- WANAMARTA, G., D. PENNER and J.J. KELLs, 1989. The basis of bentazon antagonism on sethoxydim

absorption and activity. Weed Science. 37: 400-404.

DOI: <http://doi.org/10.1017/s004317450007212x>

WILSON R.G., 1994. New herbicides for postemergence application in sugarbeet (*Beta vulgaris*). Weed Technology. 8: 807-811.

DOI: <http://doi.org/10.1017/S0890037X00028724>

ZAND, E., N. NEZAMABADI, M.A. BAGHESTANI, P.

SHIMI and S.K. MOUSAVI, 2019. A guide to chemical control of weeds in Iran. Jihad-e-Daneshgahi Press. Mashhad. pp. 154. (In Persian)