

<https://dx.doi.org/10.22034/arpp.2023.16365>

نقش مویان و نیتروژن در بهبود کارایی علف‌کش تری بنورون متیل در کنترل علف هرز خردل وحشی،

Sinapis arvensis

سمیه کریمی مردق^۱، علی مختصی بیدگلی^{۱*}، سعیدرضا یعقوبی^۲
 گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران.
 *mokhtassi@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲

چکیده

به‌منظور بررسی اثر اضافه کردن مویان‌ها و منابع نیتروژنی مختلف روی کارایی علف‌کش تری بنورون متیل، آزمایشی گلدانی در سال ۱۴۰۰ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در قالب آزمایش فاکتوریل برپایه طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل ترکیبی از چهار غلظت علف‌کش تری بنورون متیل (۰، ۴/۵، ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره در هکتار) به‌صورت پس‌رویشی، منابع نیتروژن شامل بدون نیتروژن، نیترات آمونیوم، سولفات آمونیوم، استات آمونیوم و اسیدآمینو اسپاراژین و مویان‌های آمفوتر، آنیونی، دو مویان غیریونی و بدون مویان بودند. نتایج نشان داد مقدار شاخص سبزی‌نگی، سطح برگ و وزن خشک کل بوته علف هرز خردل وحشی در تیمار شاهد بدون علف‌کش حداکثر بود و با افزایش غلظت علف‌کش کاهش پیدا کرد. کاربرد جداگانه منابع نیتروژن و مویان‌ها با غلظت‌های مختلف علف‌کش، کارایی آن‌ها را در مقایسه با عدم کاربرد مواد افزودنی افزایش داد به‌طوری که نیترات آمونیوم و استات آمونیوم مقدار ED₉₀ را از ۱۵ گرم به ۶ گرم ماده موثره علف‌کش در هکتار و مویان آنیونی سدیم لوریل اتر سولفات و مویان غیریونی کاستراویل اتوکسیلات به ۱۴ و ۱۱/۰۲ گرم ماده موثره در هکتار کاهش دادند. کاربرد هم‌زمان مویان و نیتروژن با علف‌کش کارایی آن را بیشتر از کاربرد جداگانه این مواد افزایش داد. در مجموع، کاربرد نیترات آمونیوم، استات آمونیوم و سولفات آمونیوم با مویان لوریل الکل اتوکسیلات، کاربرد نیترات آمونیوم با کاستر اوپل اتوکسیلات و استات آمونیوم با سدیم لوریل اتر سولفات بالاترین اثربخشی را در افزایش کارایی علف‌کش تری بنورون متیل در کنترل خردل وحشی داشت.

کلمات کلیدی: کاهش دهنده کشش سطحی، نمک آمونیومی، کارایی علف‌کش، سولفونیل اوره، غلظت مؤثر

Role of surfactant and nitrogen for improving the efficacy of tribenuron methyl herbicide in wild mustard, *Sinapis arvensis* control

Somayeh Karimi-Mordagh¹, Ali Mokhtassi-Bidgoli^{1*}, Saeed Reza Yaghoobi²

¹Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. ²Department of Agricultural Science, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. *mokhtassi@modares.ac.ir

Received: 31 August 2022

Revised: 10 December 2022

Accepted: 23 December 2022

Abstract

To evaluate the effect of tank mixing surfactants and nitrogen sources on the efficacy of tribenuron methyl herbicide, a greenhouse experiment was conducted as a factorial arrangement in a completely randomized design with four replications in the faculty of agriculture at Tarbiat Modares University in 2021. Experimental treatments included four rates of tribenuron methyl (0, 4.5, 9, and 15 g active ingredient (ai) ha⁻¹), as a post-emergence herbicide: nitrogen sources (control without nitrogen, ammonium nitrate, ammonium sulfate, ammonium acetate, and asparagine amino acid): and types of surfactants (control without surfactant, amphoteric, anionic, and two non-ionic surfactants). The results showed that the values of greenness index, leaf area, and total dry weight were highest under control (no herbicide application), and decreased as herbicide rate increased. Application of nitrogen sources and surfactants with herbicide separately increased its efficiency compared to the non-use of additives, so that ED₉₀ decreased from 15 to 6 by ammonium nitrate and ammonium acetate and from 15 to 14 and 11.02 g ai ha⁻¹ by sodium lauryl ether sulfate and castor oil ethoxylate, respectively. The mixture of surfactant and nitrogen with tribenuron methyl was more effective than herbicide application with each of these additives alone. Generally, the application of ammonium nitrate, ammonium acetate, or ammonium sulfate with lauryl alcohol ethoxylate, ammonium nitrate with castor oil ethoxylate, and ammonium acetate with sodium lauryl ether sulfate are recommended.

Keyword: Surfactant, Ammonium salt, Herbicide efficacy, Sulphonylurea, Effective dose

How to cite:

Karimi-Mordagh S, Mokhtassi-Bidgoli A, Yaghoobi SR, 2023. Role of surfactant and nitrogen for improving the efficacy of tribenuron methyl herbicide in wild mustard, *Sinapis arvensis* control. *Journal of Applied Research in Plant Protection* 12 (2): 227-237.

مقدمه

2007). به عنوان مثال مویان روغن متیله‌ی بذری و روغن نفتی کارایی غلظت کاهش یافته‌ی علف‌کش نیکوسولفورن را در کنترل علف‌های هرز سورف، بنفشه صحرائی، سلمه تره و هفت بند افزایش دادند (Idziak & Woznica 2013) و مویان غیریونی برپایه‌ی ارگانوسیلیکون (Organosilicon) در اختلاط با علف‌کش بیسپیرییک سدیم (Bispyribac- sodium)، ارتفاع و وزن خشک علف هرز سورف را کاهش داد (Koger et al. 2007).

دسته دیگری از مواد که برای کمک به افزایش فعالیت علف‌کش‌ها همراه با مویان‌های مختلف به محلول سمپاشی اضافه می‌شوند نمک‌های کودی هستند. مکانیسم دقیق این مواد در اختلاط با علف‌کش‌ها نامشخص است اما گزارش‌هایی در مورد افزایش جذب علف‌کش در گیاهان منتشر شده‌است (Bunting et al. 2004; Nandula et al. 2007). نتایج یک تحقیق نشان داد اضافه کردن کودهای دارای نیتروژن به محلول نیکوسولفورن کارایی آن را در کنترل اغلب علف‌های هرز افزایش داد و یا تمایل به افزایش آن داشت (Idziak & Woznica 2013). در آزمایش دیگری اختلاط اوره آمونیوم نیترات، کارایی علف‌کش پنوکسولام (Penoxsulam) در کنترل سورف را از ۴۹ به ۵۸ درصد رساند. همچنین اختلاط اوره آمونیوم نیترات با روغن گیاه زراعی توانست کارایی این علف‌کش را از ۷۵ به ۹۵ درصد و در ترکیب با روغن بذری متیله (Methylated Seed Oil) از ۶۷ به ۹۸ درصد افزایش دهد (Pearson et al. 2008).

علف‌هرز خردل وحشی (*Sinapis arvensis* L.) به عنوان یکی از علف‌های هرز شایع و خطرناک در مزارع گندم کشور می‌باشد. این علف هرز دارای قدرت رقابت بالایی با گندم بوده و باعث افت عملکرد آن می‌شود (Abdollahi & Mohammaddoust Chamanabad 2017). علف‌کش تری بنورون متیل به عنوان پهن‌برگ‌کش اختصاصی در کنترل خردل وحشی در مزارع گندم کاربرد فراوانی دارد (Derakhshan et al. 2015). افزایش کارایی علف‌کش‌ها، کاهش مصرف سموم و تولید محصول سالم از اهداف محققین کشاورزی می‌باشد. برای این منظور تحقیقات گسترده‌ای در مورد کاربرد افزودنی‌های سموم با هدف افزایش کارایی و کاهش غلظت مصرفی علف‌کش‌ها انجام گرفته است. آزمایش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر اختلاط با مویان‌ها و منابع نیتروژن مختلف بر کارایی علف‌کش تری بنورون متیل در کنترل خردل وحشی در گندم به صورت گلخانه‌ای انجام گردید.

علف‌های هرز به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در کمیت و کیفیت تولیدات گیاهی بویژه گندم مطرح هستند و عدم کنترل آن‌ها می‌تواند عملکرد گندم را به شدت کاهش دهد. مبارزه‌ی شیمیایی و استفاده از علف‌کش‌ها رایج‌ترین شیوه‌ی مدیریت علف‌های هرز در گندم است (Yaghoobi 2014). در بین علف‌کش‌های ثبت شده برای گندم، پهن برگ‌کش‌ها از نظر نحوه‌ی عمل تنوع بیشتری دارند اما تری بنورون متیل (Tribenuron- methyl) یکی از پرمصرف‌ترین پهن‌برگ‌کش‌های به کار رفته در سال‌های اخیر بوده است (Zand et al. 2009).

علف‌کش‌های پس‌رویشی مانند تری بنورون متیل مستقیماً روی برگ کانوبی علف‌های هرز مورد استفاده قرار می‌گیرند و با جذب توسط برگ‌ها، ساقه‌ها و ریشه‌های علف هرز آن‌ها را از بین می‌برند. مقدار جذب این علف‌کش‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند اندازه قطرات، کشش سطحی و غیره ممکن است تغییر کند. در برخی موارد لایه چربی دوست کوتیکول موجود در سطح برگ سبب ایجاد حالت کروی در قطرات محلول سم و عدم پخش شدن آن‌ها در سطح برگ می‌شود (Adnan et al. 2020). از سوی دیگر وجود باقی مانده سموم در محصولات کشاورزی، نگرانی‌های زیست محیطی مصرف علف‌کش‌ها و پدیده مقاومت علف‌های هرز به علف‌کش‌ها باعث توجه بیشتر محققین به کاهش مقدار مصرف علف‌کش شده‌است (Dehghani et al. 2021).

استفاده‌ی مناسب از مواد افزودنی همراه با علف‌کش‌های خاص اغلب فعالیت بیولوژیکی ماده موثره و اثربخشی علف‌کش را بهبود می‌بخشد و در نتیجه مقدار مصرف سموم و هزینه‌های اقتصادی و اثرات نامطلوب این مواد برای موجودات زنده کاهش می‌یابد (Pannacci et al. 2010; Mirgorodskaya et al. 2020). مویان‌ها که شامل مقادیر متفاوتی از اسیدهای چرب هستند و قادرند به دو نوع سطح مختلف مانند آب و روغن متصل شوند، از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین انواع مواد افزودنی در کشاورزی هستند. کاربرد این مواد به توزیع یکنواخت علف‌کش روی برگ و نفوذ به آن کمک می‌کند و با کند کردن سرعت خشک شدن محلول موجب افزایش زمان نگهداری علف‌کش روی گیاه می‌شود (Tu & Randall 2003). تحقیقات پیشین نشان داده‌اند کارایی علف‌کش‌های خانواده سولفونیل‌اوره در صورت کاربرد با مویان‌های مختلف افزایش پیدا می‌کند (Pannacci et al. 2010; Bunting et al. 2004; Koger et al.)

مواد و روش‌ها

تجزیه رگرسیون داده‌ها پس از برازش معادله چهار پارامتری لوگ لوجستیک به زیست توده خشک گیاهان (Y) در مقابل غلظت علف‌کش (x) با استفاده از رویه NLIN نرم‌افزار SAS (9.2) انجام و مقدار علف‌کش لازم برای ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش ماده خشک گیاهان (ED10، ED50 و ED90) محاسبه و در تحلیل نتایج آزمایش به کار گرفته شد.

$$y = \frac{(\max - \min)}{(1 + \exp(b * (\ln(x) - \ln(ED50))))}$$

در این معادله b، شیب منحنی در نقطه ED₅₀، Min، حد پایین منحنی تلفات ماده خشک (تلفات زیست توده وقتی که مقدار کاربرد علف‌کش حداکثر است و تقریباً برابر صفر می‌باشد)، ED₅₀، مقداری از علف‌کش که سبب کاهش ۵۰ درصد وزن خشک گیاه می‌شود و Max حد بالای منحنی (حداکثر زیست توده زمانی که مقدار کاربرد علف‌کش صفر است) هستند. برای محاسبه ED₁₀ و ED₉₀ به ترتیب فرمول‌های زیر به جای ED₅₀ در معادله فوق قرار گرفت:

$$\exp(\ln(ED10) - \left(\frac{1}{b}\right) * \ln\left(\frac{1}{9}\right))$$

$$\exp(\ln(ED90) - \left(\frac{1}{b}\right) * \ln(9))$$

برای بررسی دقت مدل‌ها از R²، RMSE استفاده شد که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R^2 = 1 - \frac{SSe}{SSt}$$

$$RMSE = \sqrt{MSe}$$

در روابط فوق، SSe مجموع مربعات خطای آزمایشی، SSt مجموع مربعات کل، MSe میانگین مربعات خطای آزمایشی می‌باشد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی مویان، علف‌کش و نیتروژن و اثرات متقابل دوگانه مویان و نیتروژن، مویان و علف‌کش و نیتروژن و اثر متقابل سه‌گانه مویان، نیتروژن و علف‌کش بر وزن خشک کل بوته علف هرز و سطح برگ خردل وحشی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (p ≤ ۰/۰۱). با توجه به اینکه لازم است میانگین اثرات متقابل با درجه بالاتر در صورت معنی‌دار شدن ارائه شود در این آزمایش برای تمام صفات میانگین‌های اثر متقابل سه‌گانه تری بنورون متیل، منابع نیتروژن و مواد افزودنی ارائه شد (جدول ۱).

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۴۰۰ انجام شد. فاکتور اول شامل غلظت‌های صفر، ۴/۵، ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش تری بنورون متیل (Tribenuron-methyl DF 75%, Arysta) در هکتار بود. فاکتور دوم شامل تیمار بدون مویان، سدیم لوریل اتروسولفات (sodium lauryl ether sulfate)، کاستراویل اتوکسیلات (castor oil ethoxylate)، لوریل الکل اتوکسیلات (lauryl alcohol ethoxylate) و کوکامیدوپروپیل بتائین (cocamidopropyl betaine) بود. تیمارهای بدون نیتروژن، نیترات آمونیوم، سولفات آمونیوم، استات آمونیوم و اسیدآمین‌های آسپاراژین نیز فاکتور سوم این آزمایش را تشکیل دادند. در ابتدا بذر خردل وحشی که از بخش علف‌های هرز مرکز تحقیقات گیاهپزشکی کشور تهیه شده بود در گلدان‌های حاوی مخلوط ۱:۱ خاک زراعی و خاکبرگ کاشته شد و در مرحله ۴-۳ برگی گیاهچه‌ها به تراکم ۱۰ بوته در هر گلدان تنک شدند. مویان‌ها با غلظت ۰/۱ درصد، منابع نیتروژن شامل سولفات آمونیوم، نیترات آمونیوم، استات آمونیوم با غلظت یک درصد و اسیدآمین‌های آسپاراژین با غلظت ۰/۱ درصد مورد استفاده قرار گرفتند. یک ماه بعد از کشت تیمارها اعمال شدند. سمپاشی با استفاده از یک سمپاش ۱۶ لیتری (Hecht 4166, Germany) با نازل تی جت و با فشار چهار بار و خروجی حدود ۳۰۰ لیتر در هکتار نازل انجام شد.

دو هفته پس از اعمال تیمارها شاخص سبزیگی در پنج برگ از بوته‌های هر گلدان توسط دستگاه کلروفیل متر (SPAD 502 plus) اندازه‌گیری شد. سپس تعداد پنج بوته از هر گلدان کف بر شده و پس از انتقال به آزمایشگاه، سطح برگ آن‌ها توسط دستگاه سطح برگ سنج (Model DELTA-T, England) اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک کل، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس توزین شدند.

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، تست نرمالیتی روی باقیمانده‌ها انجام گرفته و پس از اطمینان از حالت توزیع نرمال باقیمانده‌ها و همگنی واریانس‌ها، تجزیه واریانس از طریق مدل خطی عمومی (GLM) انجام شد. برای همه تیمارها میانگین و خطای معیار ارائه شد. در صورت معنی‌دار شدن اثر متقابل از روش برش‌دهی برای ارائه میانگین‌ها استفاده شد.

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تاثیر غلظت‌های مختلف علف‌کش تری بنورون متیل (G) همراه مواد افزودنی (E) و منابع نیتروژن (N) بر صفات رویشی خردل وحشی.

Table 1. Analysis of variance (mean square) of the effect of different rates of tribenuron methyl (G), surfactants (E) and nitrogen sources (N) on vegetative characteristics of *S. arvensis*.

Variation Resources	Degree of freedom	Greenness index	Total dry weight	Leaf area
E	4	513.22**	2.00**	40554.21**
N	4	292.60**	0.15**	12333.90**
E × N	16	47.40**	0.28**	7386.11**
G	3	14448.70**	38.09**	935379.54**
E × G	12	50.63**	0.20**	3630.27**
N × G	12	115.87**	0.19**	6528.73**
E × N × G	48	97.40**	0.17**	4039.01**
error	300	5.95	0.02	468.89
CV (%)	-	9.47	24.39	27.24

CV = coefficient of variation, ns=non-significant difference, * and** are significant at %5 and %1 probability levels, respectively

با ۴/۵ گرم ماده موثره علف‌کش بیشتر از تیمار بدون مویان این غلظت بود (شکل ۱).

کمترین مقدارهای وزن خشک در بین تیمارهای علف‌کش به‌علاوه‌ی نیتروژن ۱/۳۰، ۰/۴۷، ۰/۳۱ و ۰/۲۲ گرم در بوته بودند و به ترتیب از تیمارهای اسید آمینه‌ی آسپاراژین بدون علف‌کش، اسید آمینه آسپاراژین با ۴/۵ گرم علف‌کش، استات آمونیوم با ۹ گرم علف‌کش و سولفات آمونیوم با ۱۵ گرم علف‌کش به دست آمدند.

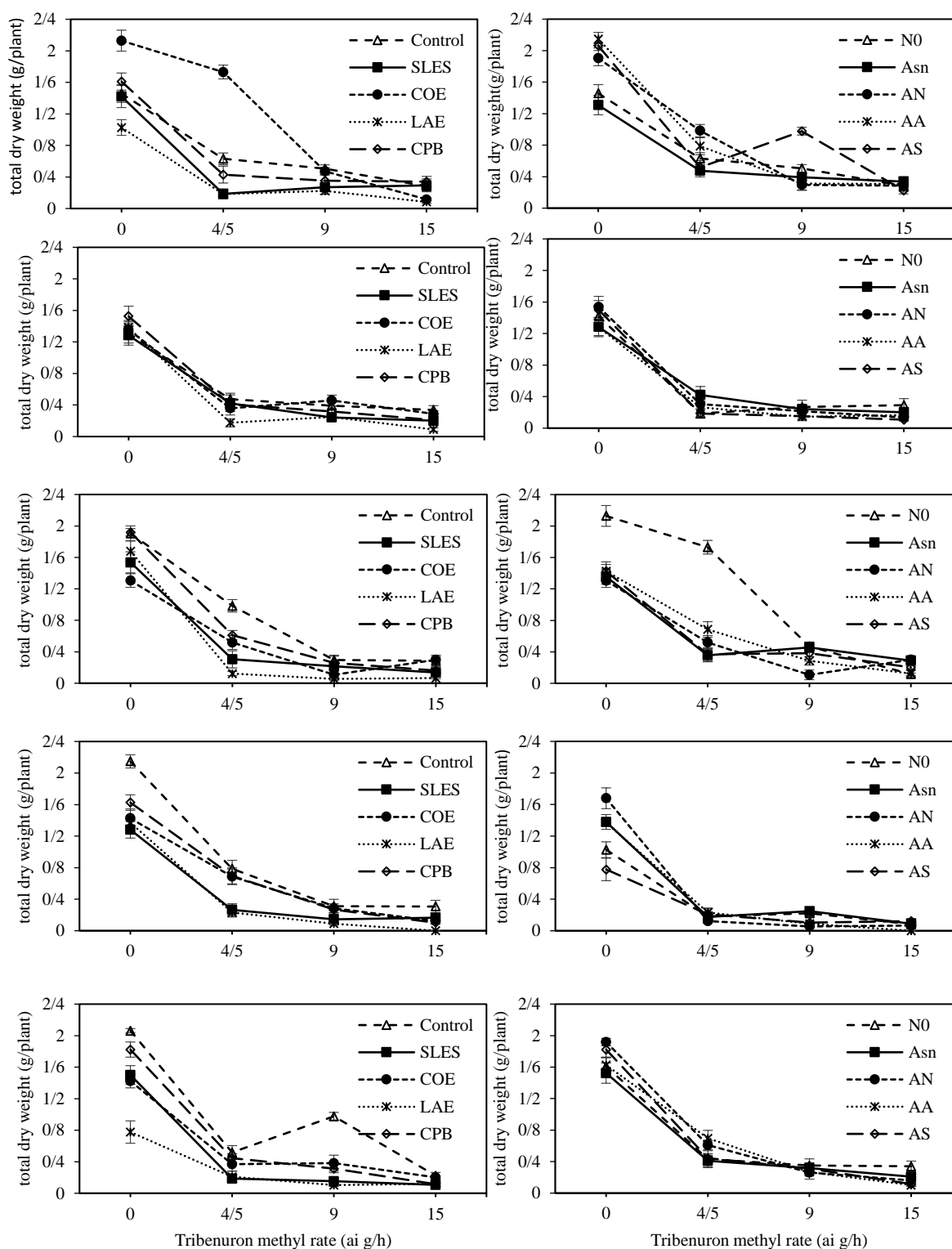
کمترین مقدارهای وزن خشک کل خردل وحشی در بین تیمارهای علف‌کش به‌علاوه‌ی مویان ۱/۰۲، ۰/۱۸، ۰/۲۲ و ۰/۰۸ گرم در بوته بود و به ترتیب در مویان‌های لوریل الکل اتوکسیلات بدون علف‌کش، لوریل الکل اتوکسیلات و سدیم لوریل اتر سولفات با ۴/۵ گرم ماده موثره علف‌کش و لوریل الکل اتوکسیلات با ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش مشاهده شدند (شکل ۱).

مقایسه میانگین مقدار وزن خشک کل بوته نشان داد وزن خشک کل خردل وحشی در کاربرد هم‌زمان مویان و نیتروژن با تری بنورون متیل کاهش بیشتری در مقایسه با کاربرد علف‌کش با هر یک از این دو ماده افزودنی به تنهایی داشته است. کمترین مقدار وزن خشک کل خردل وحشی در کاربرد هم‌زمان مویان و نیتروژن در غلظت صفر، ۰/۷۷ و مربوط به سولفات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات، با غلظت علف‌کش ۴/۵ گرم ماده موثره ۰/۱۲ و مربوط به نیترات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات، با غلظت ۹ گرم ماده موثره علف‌کش ۰/۰۵ و مربوط به نیترات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات و با غلظت ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش صفر و مربوط به استات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات بود (شکل ۱).

وزن خشک کل بوته

به‌طور کلی حداکثر مقدار وزن خشک کل بوته از تیمارهای بدون علف‌کش به‌دست آمد. کاربرد ۴/۵ گرم ماده موثره تری بنورون متیل وزن خشک بوته‌ی خردل وحشی را کاهش داد و با افزایش غلظت ماده موثره‌ی علف‌کش به ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره وزن خشک کل خردل وحشی کاهش بیشتری نشان داد. زمانی‌که علف‌کش با منابع نیتروژن به کار برده شد همه منابع نیتروژن بجز اسید آمینه‌ی آسپاراژین در غلظت‌های پایین علف‌کش باعث افزایش وزن خشک کل بوته در مقایسه با کاربرد این مقادیر علف‌کش بدون نیتروژن شدند. با این وجود وزن خشک خردل وحشی در تیمارهای دارای سولفات آمونیوم با سرعت چشمگیری کاهش یافت و از ۲/۰۶ در غلظت صفر به ۰/۵۱ گرم در ۴/۵ گرم ماده موثره رسید که به‌طور معنی‌داری کمتر از وزن خشک حاصل از کاربرد ۴/۵ گرم ماده موثره تری بنورون متیل به‌تنهایی بود. با افزایش غلظت علف‌کش کارایی اغلب تیمارهای دارای نیتروژن بیشتر از کاربرد همان غلظت از علف‌کش بدون نیتروژن بود و در برخی تیمارها تفاوت معنی‌داری با آن‌ها نداشت (شکل ۱).

در شرایطی که علف‌کش با مویان‌های مختلف به‌کار برده شد وزن خشک خردل وحشی در اکثر تیمارهای دارای مویان با هر چهار غلظت صفر، ۴/۵، ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاربرد همان مقدارهای علف‌کش به تنهایی کاهش پیدا کرد و در تعداد کمی از تیمارهای دارای مویان تفاوت معنی‌داری با کاربرد علف‌کش به‌تنهایی نداشت. زمانی‌که تری بنورون متیل با مویان‌های مختلف به‌کار برده شد وزن خشک خردل وحشی تنها در تیمار کاستر اوایل اتوکسیلات



شکل ۱. تاثیر برهمکنش سه گانه دز تری بنورون متیل همراه مواد افزودنی (در سمت راست به ترتیب از بالا به پایین شامل Control: بدون ماده افزودنی، SLES: سدیم لوریل اتر سولفات، COE: کاستر اویل اتوکسیلات، LAE: لوریل الکل اتوکسیلات و CPB: کوکامیدوپروپیل بتائین) و منابع نیتروژن (در سمت چپ به ترتیب از بالا به پایین شامل N0: بدون نیتروژن، Asn: اسید آمینه‌ی آسپاراژین، AN: آمونیم نیترات، AA: استات آمونیم و AS: سولفات آمونیم) بر وزن خشک کل خردل وحشی. خطوط عمودی نشان دهنده خطای معیار هستند.

Figure 1. The three-way interaction among the concentration of tribenuron methyl with surfactants (on the right, from top to bottom: Control: without adjuant, SLES: sodium lauryl ether sulfate, COE: castor oil ethoxylate, LAE: lauryl alcohol ethoxylate and CPB: cocamidopropyl betaine) and nitrogen sources (on the left, from top to bottom N0: no nitrogen, Asn: asparagine amino acid, AN: ammonium nitrate, AA: ammonium acetate, and AS: ammonium sulfate) on total dry weight of *S. arvensis*. Vertical lines represent the standard error

نظر کاهش شاخص سبزینگی تفاوتی با تیمارهای بدون مویان نداشتند و یا کارایی کمتری داشتند (شکل ۲).

کمترین مقادیر شاخص سبزینگی در بین تیمارهای علف‌کش به‌علاوه‌ی نیتروژن ۳۳/۵۰، ۲۳/۰۱، ۲۱/۵۱ و ۲۱/۱۱ و به ترتیب مربوط به اسیدآمین‌های اسپاراژین و نیترات آمونیوم بدون علف‌کش، اسیدآمین‌های اسپاراژین با ۴/۵ گرم ماده موثره، استات آمونیوم با ۹ گرم ماده موثره و سولفات آمونیوم با ۱۵ گرم ماده موثره‌ی تری بنورون متیل بودند.

کمترین مقادیر شاخص سبزینگی در بین تیمارهای علف‌کش به‌علاوه مویان به ترتیب ۳۵/۵۳، ۲۰/۳۵، ۲۱/۹ و ۲۲/۴۵ بودند و به ترتیب در مویان لوریل الکل اتوکسیلات بدون علف‌کش، با ۴/۵ و ۹ گرم ماده موثره علف‌کش و ۱۵ گرم ماده موثره تری بنورون متیل به‌تنهایی مشاهده شدند (شکل ۲).

مقایسه میانگین مقدار شاخص سبزینگی خردل وحشی نشان داد با کاربرد هم‌زمان مویان و نیتروژن با تری بنورون متیل شاخص سبزینگی خردل وحشی کاهش بیشتری در مقایسه با کاربرد علف‌کش با هر یک از این دو ماده افزودنی به‌تنهایی داشته است. کمترین مقدار شاخص سبزینگی خردل وحشی در غلظت صفر علف‌کش ۲۸/۵۵ و مربوط به سولفات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات، در غلظت ۴/۵ گرم ماده موثره ۱۹/۹۶ و مربوط به نیترات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات، در غلظت ۹ گرم ماده موثره علف‌کش ۱۷/۳۸ و مربوط به نیترات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات و در غلظت ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش ۱۰/۶۱ و مربوط به استات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات بود (شکل ۲).

در برخی گزارش‌ها اشاره شده زردی و نکروز برگ گیاه از علائم مصرف برخی علف‌کش‌هاست. به‌عنوان مثال کاربرد علف‌کش کلتودیم سبب زردی کامل و متلاشی شدن نقاط رشد علف‌هرز برموداگراس (Nandula et al. 2007) و علف‌کش‌های فورام سولفورون و نیکوسولفورون باعث زردی، کلروز و نکروز برگ‌های علف‌هرز سوروف شده‌است (Assadollahi et al. 2015). در بررسی‌های انجام شده روی گونه‌های وحشی آفتاب‌گردان به‌منظور تعیین وجود مقاومت به تری بنورون متیل در آن‌ها، اغلب نمونه‌های بررسی‌شده به علف‌کش حساس بودند و علائمی مانند زردی، کندی رشد و قهوه‌ای شدن برگ‌های جوان نشان دادند (Terzic & Atlagic 2008).

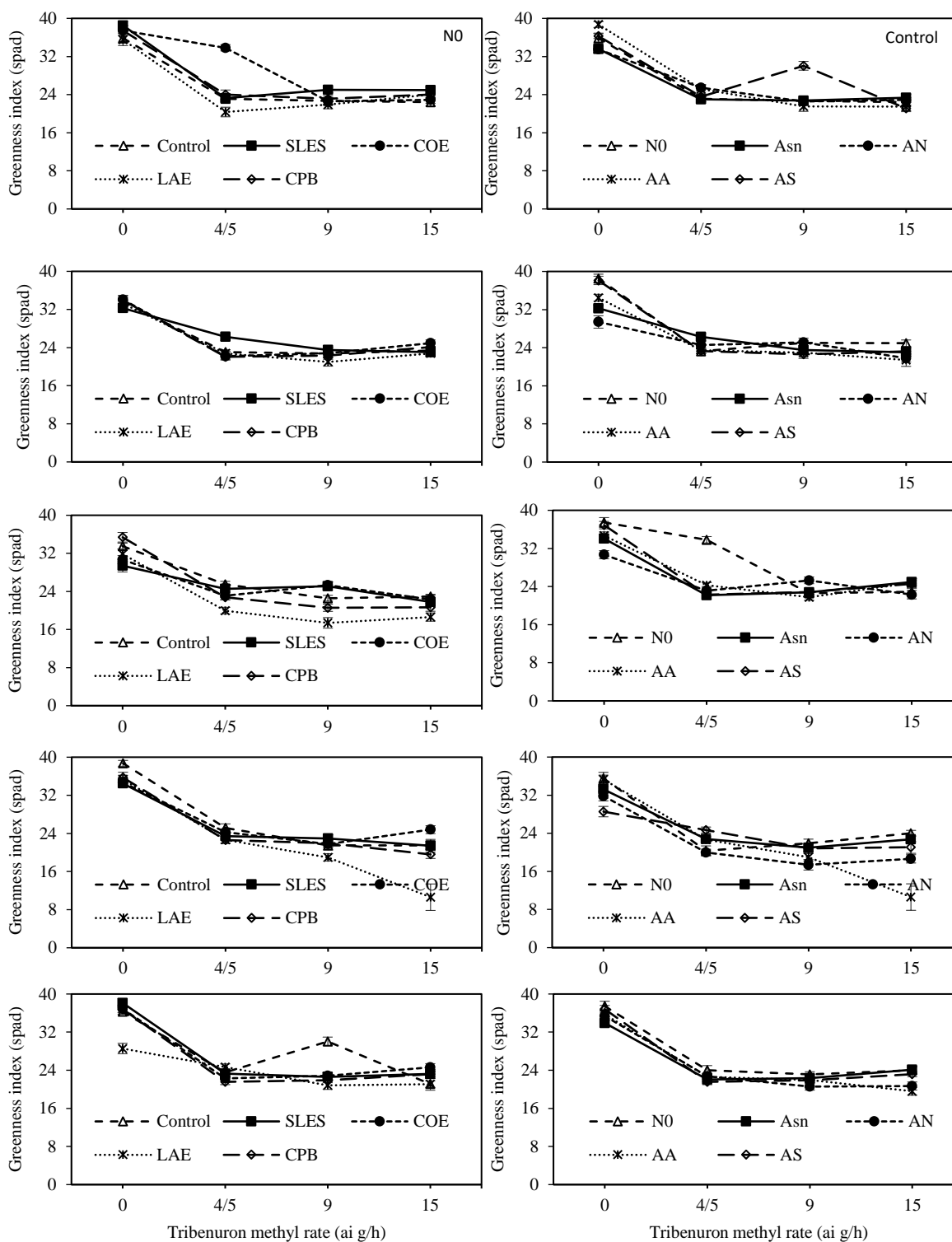
نتایج یک تحقیق نشان داد کارایی علف‌کش تری بنورون متیل در کنترل چهار گونه‌ی علف‌هرز به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر مویان‌های غیریونی و آنیونی و روغن گیاهی قرار گرفت و اختلاف بین مویان‌ها جزئی بود (Pannacci et al. 2010).

اختلاف مقادیر کاهش یافته علف‌کش‌های ایزوپروتورون، تری‌بنورون متیل و کلودینافوپ پروپارژیل با اوره به میزان یک درصد حجمی باعث کنترل موثر علف‌های هرز یکساله شد که احتمالاً به این دلیل باشد که اوره ظرفیت ایجاد اثرات هم‌افزایی با این علف‌کش‌ها را داشته و این اثر را با کاهش بیشتر رشد علف‌های هرز نشان داده‌است (Soliman et al. 2011). افزایش کارایی علف‌کش‌های مختلف در صورت اختلاط با منابع نیتروژنی احتمالاً به دلیل اثر این مواد روی میزان جذب علف‌کش‌هاست. (Dodds et al. 2007) گزارش کردند مواد افزودنی انتقال علف‌کش بی‌سپیرییک به قسمت‌هایی که علف‌کش به آن‌ها برخورد نکرده را افزایش داده‌اند و این افزایش انتقال به دلیل افزایش جذب بوده‌است. اضافه کردن ۳۲ درصد اوره آمونیوم نیترات به مویان‌های MSO/OSL و OSL/NIS جذب علف‌کش را چهار تا پنج برابر افزایش داد.

شاخص سبزینگی

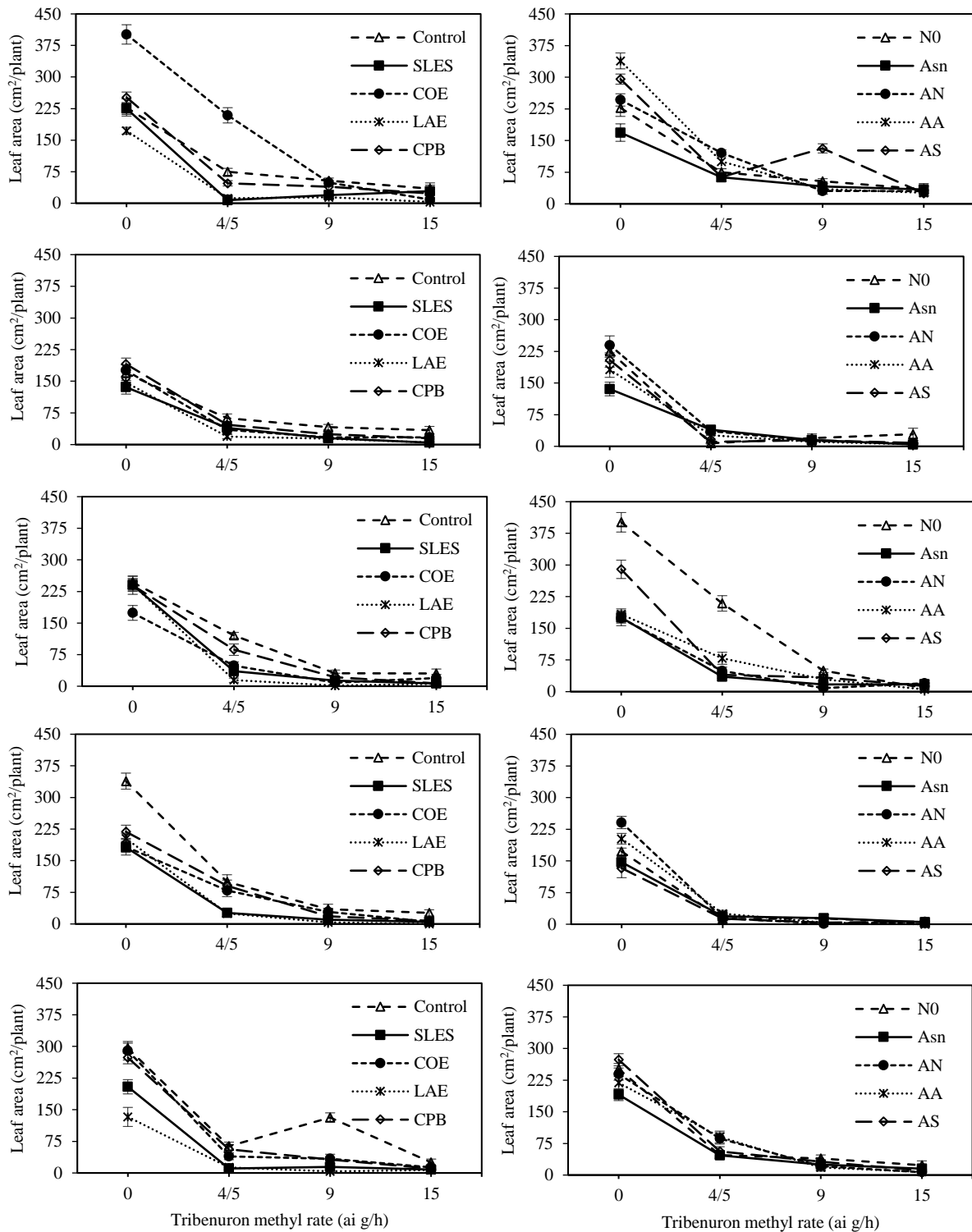
به‌طور کلی حداکثر مقدار شاخص سبزینگی خردل وحشی از تیمارهای بدون علف‌کش به‌دست آمد. با اضافه شدن تری بنورون متیل به تیمارها و افزایش مقدار آن شاخص سبزینگی خردل وحشی کاهش یافت. زمانی که علف‌کش با منابع نیتروژن به‌کار برده شد، شاخص سبزینگی به دست آمده از کاربرد اسیدآمین‌های اسپاراژین با غلظت‌های صفر و ۴/۵ گرم ماده موثره علف‌کش، نیترات آمونیوم بدون علف‌کش، استات آمونیوم با ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش و سولفات آمونیوم با ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش به‌طور معنی‌داری کمتر از کاربرد این مقادیر علف‌کش به‌تنهایی بود. شاخص سبزینگی در دیگر تیمارهای دارای نیتروژن تفاوت معنی‌داری با تیمارهای بدون نیتروژن نداشت و یا بیشتر از آن‌ها بود (شکل ۲).

در شرایطی که علف‌کش با مویان‌های مختلف به‌کاربرده شد لوریل الکل اتوکسیله در دزهای صفر، ۴/۵ و ۹ گرم ماده موثره تری بنورون متیل شاخص سبزینگی خردل وحشی را در مقایسه با کاربرد این دزهای علف‌کش بدون ماده افزودنی به‌طور معنی‌داری کاهش داد. سایر تیمارهای دارای مویان از



شکل ۲. تاثیر برهمکنش سه گانه دز تری بنورون متیل همراه مواد افزودنی (در سمت راست به ترتیب از بالا به پایین شامل Control: بدون ماده افزودنی، SLES: سدیم لوریل اتر سولفات، COE: کاستر اویل اتوکسیلات، LAE: لوریل الکل اتوکسیلات و CPB: کوکامیدوپروپیل بتائین) و منابع نیتروژن (در سمت چپ به ترتیب از بالا به پایین شامل N0: بدون نیتروژن، Asn: اسید آمینه‌ی آسپاراژین، AN: نیترات آمونیوم، AA: استات آمونیوم و AS: سولفات آمونیوم) بر شاخص سزینگی خردل وحشی. خطوط عمودی نشان دهنده خطای معیار هستند.

Figure 2. The three-way interaction among the concentration of tribenuron methyl with surfactants (on the right, from top to bottom: Control: without adjuvant, SLES: sodium lauryl ether sulfate, COE: castor oil ethoxylate, LAE: lauryl alcohol ethoxylate and CPB: cocamidopropyl betaine) and nitrogen sources (on the left, from top to bottom N0: no nitrogen, Asn: asparagine amino acid, AN: ammonium nitrate, AA: ammonium acetate, and AS: ammonium sulfate) on the greenness index of *S. arvensis*. Vertical lines represent the standard error



شکل ۳. تاثیر برهمکنش سه گانه دز تری بنورون متیل همراه مواد افزودنی (در سمت راست به ترتیب از بالا به پایین شامل Control: بدون ماده افزودنی، SLES: سدیم لوریل اتر سولفات، COE: کاستر اویل اتوکسیلات، LAE: لوریل الکل اتوکسیلات، CPB: کوکامیدو پروپیل بتائین) و منابع نیتروژن (در سمت چپ به ترتیب از بالا به پایین شامل N0: بدون نیتروژن، Asn: اسید آمینه‌ی آسپاراژین، AN: نیترات آمونیوم، AA: استات آمونیوم و AS: سولفات آمونیوم) بر سطح برگ خردل وحشی. خطوط عمودی نشان دهنده خطای معیار هستند.

Figure 3. The three-way interaction among the concentration of tribenuron methyl with surfactants (on the right, from top to bottom: Control: without adjuvant, SLES: sodium lauryl ether sulfate, COE: castor oil ethoxylate, LAE: lauryl alcohol ethoxylate and CPB: cocamidopropyl betaine) and nitrogen sources (on the left, from top to bottom N0: no nitrogen, Asn: asparagine amino acid, AN: ammonium nitrate, AA: ammonium acetate, and AS: ammonium sulfate) on the leaf area of *S. Arvensis*. Vertical lines represent the standard error.

سطح برگ

موثره، همه منابع نیتروژن بجز سولفات آمونیوم با ۹ گرم ماده موثره علف‌کش سطح برگ خردل وحشی را در مقایسه با کاربرد همان غلظت‌های علف‌کش بدون نیتروژن به‌طور معنی‌داری کاهش دادند. در غلظت ۱۵ گرم ماده موثره تری بنورون متیل بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری وجود نداشت.

به‌طور کلی حداکثر مقدار سطح برگ خردل وحشی از تیمارهای بدون علف‌کش به‌دست آمد. با اضافه شدن تری بنورون متیل به تیمارها و افزایش مقدار آن سطح برگ خردل وحشی کاهش یافت. زمانی‌که علف‌کش با منابع نیتروژن به کار برده شد اسید آمینه‌ی آسپاراژین با غلظت‌های صفر، ۴/۵ و ۹ گرم ماده موثره‌ی علف‌کش، سولفات آمونیوم با ۴/۵ گرم ماده

جدول ۲. پارامترهای برآورد شده توسط مدل چهار پارامتری لوگ-لجستیک برای تعیین اثر غلظت‌های تری بنورون متیل بر وزن خشک نسبی خردل وحشی با کاربرد مواد افزودنی.

Table 2. The parameters estimated by the four-parameter log-logistic model to determine the effect of tribenurone methyl rates and surfactants on the relative dry weight of *S. arvensis*.

Treatments		Model coefficients (standard error)						Accuracy parameters	
Surfactant	Nitrogen	Min	Max	b	ED10	ED50	ED90	R ²	RMSE
Control	N0	10 ⁻⁸ (0)	98.97(4.47)	0.96(0.18)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.98	9.79
	Asn	10 ⁻⁸ (0)	85.89(15.00)	0.86(0.40)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.96	11.41
	AN	19.58(5.62)	130.70(5.36)	7.11(1.00)	3.18(2.89)	4.33(0.42)	6.00(0.01)	0.96	10.72
	AA	10 ⁻⁸ (0)	142.80(6.48)	1.82(0.31)	2.80(2.00)	4.00(0.01)	6.00(0.01)	0.97	13.99
	AS	10 ⁻⁸ (0)	133.00(15.00)	0.92(0.90)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.93	22.72
SLES	N0	10 ⁻⁸ (0)	85.49(9.35)	1.34(0.55)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	14.00(0.01)	0.87	20.35
	Asn	10 ⁻⁸ (0)	83.88(5.84)	1.55(0.40)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	8.41(6.67)	0.94	12.66
	AN	10 ⁻⁸ (0)	97.45(8.01)	2.59(0.97)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	13.95(9.85)	0.92	17.09
	AA	7.59(3.20)	86.05(5.00)	10.00(0.01)	2.90(0.23)	4.00(0.01)	6.00(0.01)	0.96	10.22
	AS	3.72(3.50)	99.77(5.91)	10.00(0.01)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	7.95(4.89)	0.95	12.06
COE	N0	3.52(3.00)	146.00(5.71)	4.06(0.72)	3.73(0.38)	6.42(0.46)	11.02(1.50)	0.97	11.42
	Asn	10 ⁻⁸ (0)	86.29(10.00)	0.90(0.75)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.94	13.58
	AN	13.91(3.82)	89.57(5.39)	10.00(0.01)	3.30(0.13)	4.11(0.17)	6.00(0.01)	0.96	10.78
	AA	10 ⁻⁸ (0)	97.77(5.58)	1.89(0.47)	2.00(0.01)	4.32(0.60)	13.84(3.28)	0.97	11.17
	AS	10 ⁻⁸ (0)	90.81(6.47)	1.31(0.35)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.94	14.10
LAE	N0	10 ⁻⁸ (0)	63.99(5.70)	1.83(0.62)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.91	12.30
	Asn	10 ⁻⁸ (0)	84.97(7.71)	2.39(0.93)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.90	16.50
	AN	10 ⁻⁸ (0)	111.00(9.43)	10.00(0.01)	2.62(0.35)	4.00(0.01)	6.00(0.01)	0.95	12.90
	AA	0.56(0.50)	92.65(3.20)	10.00(0.01)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	6.18(0.76)	0.98	6.53
	AS	10 ⁻⁸ (0)	49.89(5.39)	1.91(0.79)	3.02(0.34)	4.00(0.01)	6.00(0.01)	0.87	11.63
CPB	N0	10 ⁻⁸ (0)	102.20(7.48)	1.21(0.34)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.94	16.31
	Asn	10 ⁻⁸ (0)	97.65(6.59)	1.56(0.39)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	14.00(0.01)	0.94	14.29
	AN	10 ⁻⁸ (0)	126.40(5.14)	2.28(0.39)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	15.00(0.01)	0.98	11.02
	AA	10 ⁻⁸ (0)	111.10(4.36)	2.03(0.31)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	11.90(2.17)	0.98	9.37
	AS	10 ⁻⁸ (0)	117.00(6.74)	2.21(0.52)	2.00(0.01)	4.00(0.01)	13.23(3.82)	0.96	14.47

Control: no adjuvant, SLES: sodium lauryl ether sulfate, COE: castor oil ethoxylate, LAE: lauryl alcohol ethoxylate CPB: cocamidopropyl betaine

N0: no nitrogen, Asn: asparagine amino acid, AN: ammonium nitrate, AA: ammonium acetate, AS: ammonium sulfate

Min, Max, b, ED10, ED50 and ED90 coefficients are the lower and upper ranges of the curve, the slope, the effective rate of herbicide for killing 10%, 50% and 90% *S. arvensis*, respectively.

اتوکسیلات با غلظت ۹ گرم ماده موثره علف‌کش تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد آن نداشت (شکل ۳). کمترین مقدارهای سطح برگ در بین تیمارهای علف‌کش به‌علاوه‌ی نیتروژن ۱۶۸/۹، ۶۳/۹، ۳۰/۷۵ و ۲۵ سانتی متر مربع در هر بوته بودند و به‌ترتیب در تیمارهای اسید آمینه

در کاربرد تری بنورون متیل با مویان سطح برگ به‌دست آمده از کاربرد همه مویان‌ها با غلظت‌های ۴/۵، ۹ و ۱۵ گرم ماده موثره علف‌کش به‌طور معنی‌داری کمتر از کاربرد همان مقادیر علف‌کش بدون مویان بود و تنها کاربرد کاستراویل

پارامتر ED₉₀ در حضور مواد افزودنی به طور معنی داری کاهش یافت. مقدار علف کش مورد نیاز برای ۹۰ درصد کاهش زیست توده ی خردل وحشی زمانی که تری بنورون به تنهایی به کار برده شد ۱۵ گرم ماده موثره در هکتار بود. کاربرد نیترات آمونیوم و استات آمونیوم مقدار این پارامتر را به شش گرم ماده موثره علف کش در هکتار کاهش داد. در بین چهار مویان مورد بررسی کاستراویل اتوکسیلات و سدیم لوریل اتر سولفات مقدار ED₉₀ را از ۱۵ به ۱۱/۰۲ و ۱۴ گرم ماده موثره در هکتار کاهش دادند. افزودن منابع نیتروژن به مویان های مختلف مقدار ED₉₀ را در تعداد بیشتری از مویان ها کاهش داد. کاربرد نیترات آمونیوم، استات آمونیوم و سولفات آمونیوم با مویان لوریل الکل اتوکسیلات، کاربرد نیترات آمونیوم با کاستر اوایل اتوکسیلات و استات آمونیوم با سدیم لوریل اتر سولفات ED₉₀ را به ۶ گرم ماده موثره در هکتار کاهش داد. کاربرد اسید آمینه ی اسپاراژین و سولفات آمونیوم با مویان سدیم لوریل اتر سولفات ED₉₀ را از ۱۵ به ۸/۴۱ و ۷/۹۵ گرم ماده موثره در هکتار رساند. مقدار ED₉₀ در اختلاط اسید آمینه اسپاراژین، سولفات آمونیوم و استات آمونیوم با کوکامیدو پروپیل بتائین به ترتیب ۱۴، ۱۳/۲۳ و ۱۱/۹۰ گرم ماده موثره و در اختلاط نیترات آمونیوم با سدیم لوریل اتر سولفات و استات آمونیوم با کاستر اوایل اتوکسیلات به ترتیب ۱۳/۹۵ و ۱۳/۸۴ گرم ماده موثره در هکتار بود (جدول ۲).

اسپاراژین بدون علف کش و با ۴/۵ گرم ماده موثره علف کش، نیترات آمونیوم با ۹ گرم ماده موثره و سولفات آمونیوم با ۱۵ گرم ماده موثره علف کش مشاهده شد.

کمترین مقدارهای سطح برگ در بین تیمارهای علف کش به علاوه مویان ۱۷۲/۴، ۱۱/۹۲، ۱۴/۰۵، ۳/۱۵ سانتی متر مربع در بوته بودند و به ترتیب در کاربرد لوریل الکل اتوکسیلات بدون علف کش و لوریل الکل اتوکسیلات با ۴/۵ و ۹، ۱۵ گرم ماده موثره علف کش مشاهده شدند (شکل ۳).

مقایسه میانگین مقدار سطح برگ خردل وحشی نشان داد با کاربرد همزمان مویان و نیتروژن با تری بنورون متیل سطح برگ خردل وحشی کاهش بیشتری در مقایسه با کاربرد علف کش با هر یک از این دو ماده افزودنی به تنهایی داشته است. کمترین مقدار سطح برگ در غلظت صفر ۱۳۲/۹۲ سانتی متر مربع در بوته و مربوط به سولفات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات، در غلظت ۴/۵ گرم ماده موثره ۱۰/۵ سانتی متر مربع در بوته و مربوط به سولفات آمونیوم با سدیم لوریل اتر سولفات، در غلظت ۹ گرم ماده موثره علف کش ۳/۸ سانتی متر مربع در بوته و مربوط به سولفات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات و در غلظت ۱۵ گرم ماده موثره علف کش صفر و مربوط به استات آمونیوم با لوریل الکل اتوکسیلات بود (شکل ۳).

کاربرد و عدم کاربرد ماده ی افزودنی ED₁₀ و ED₅₀ مورد نیاز برای کنترل خردل وحشی را تحت تاثیر قرار نداد اما مقدار

References

- Abdollahi F, Mohammaddoust Chamanabad, HR, 2017. Competitive Ability and Tolerance of 18 Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars to Wild Mustard (*Sinapis arvensis* L.). *Journal of Iranian Plant Protection Research* 30 (4): 629–638 (In Persian with English abstract).
- Adnan M, Asif M, Hussain I, Hayyat MS, Ul Haq M, Hassan M, Abbas B, 2020. Chemical management of parthenium: A review. *International Journal of Botany Studies* 5 (2): 52–56.
- Assadollahi H, Assadollahi M, Izadi E, Ghanbari A, 2015. Evaluation tank-mixing foramsulfuron with nicosulfuron by the addition of ammonium-sulfate to control of barnyard grass (*Echinochloa crus-galli* (L) Beauv) in maize (*Zea mays* L.). *Applied Field Crops Research* 28 (4): 85–92.
- Bunting JA, Sprague CL, Riechers DE, 2004. Proper adjuvant selection for foramsulfuron activity. *Crop Protection* 23 (4): 361–366.
- Derakhshan A, Najari Kalantari N, Gherekhloo J, Kamkar B, 2015. Resistance of Wild mustard (*Sinapis arvensis*) and Turnipweed (*Rapistrum rugosum*) to Tribenuron-methyl Herbicide in Aq Qala. *Journal of Iranian Plant Protection Research* 29 (2): 199–205.
- Dehghani, M, Mokhtassi- Bidgoli A, Yaghoobi SR, 2021. Effects of some adjuvants on 2,4-D+MCPA, bromoxynil octanoate + MCPA + ethylhexyl ester, tribenuron methyl, bentazone + dichlorprop efficacy in dandelion (*Taraxacum officinale*) control in bermuda grass lawn (*Cynodon dactylon*). *Iranian Journal of Weed Science* 17 (2): 175–185 (In Persian with English abstract).
- Dodds DM, Reynolds DB, Massey JH, Smith MC, Koger C, 2007. Effect of adjuvant and urea ammonium nitrate on bispyribac efficacy, absorption, and translocation in barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*). II. Absorption and translocation. *Weed science* 55 (5): 406–411.
- Idziak R, Woznica Z, 2013. Effect of nitrogen fertilizers and oil adjuvants on nicosulfuron efficacy. *Turkish Journal of Field Crops* 18 (2): 174–178.

- Koger CH, Dodds DM, Reynolds DB, 2007. Effect of adjuvants and urea ammonium nitrate on bispyribac efficacy, absorption, and translocation in barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*). I. Efficacy, rainfastness, and soil moisture. *Weed science* 55 (5): 399-405.
- Mirgorodskaya AB, Kushnazarova RA, Lukashenko SS, Nikitin EN, Sinyashin KO, Nesterova LM, Zakharova LY, 2020. Carbamate-bearing surfactants as effective adjuvants promoted the penetration of the herbicide into the plant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 586: 124252.
- Nandula VK, Poston DH, Reddy KN, Koger CH, 2007. Formulation and adjuvant effects on uptake and translocation of clethodim in bermudagrass (*Cynodon dactylon*). *Weed science* 55 (1): 6-11.
- Pannacci E, Mathiassen SK, Kudsk P, 2010. Effect of adjuvants on the rainfastness and performance of tribenuron-methyl on broad-leaved weeds. *Weed Biology and Management* 10 (2): 126-131.
- Pearson BA, Scott RC, Carey VF, 2008. Urea ammonium nitrate effects on bispyribac and penoxsulam efficacy. *Weed technology* 22 (4): 597-601.
- Soliman I, El-Hamed A, Fadel-Allah A, 2011. Effect of herbicides and urea as additive on wheat, nutrient uptake, photosynthetic pigments and associated weeds. *Journal of Plant Production* 2 (10): 1393-1407.
- Terzic S, Atlagic J, 2008. *Tribenuron-methyl resistance in accessions of annual wild sunflower species from the NoviSad germplasm collection. 17th Int. Sunflower Conference*, Cordoba, Spain.
- Tu M, Randall J, 2003. Adjuvants. *TU, M. et al. Weed control methods handbook the nature conservancy. Davis: TNC*, 1-24.
- Yaghoobi SR, 2014. Weed management, ecological and chemical control. 1st Edition, Sepehr Publishing, Tehran, 150 pp (In Persian).
- Zand E, Baghestani MA, Nezamabadi N, Minbashi MM, Hadizadeh MH, 2009. A review on the last list of herbicides and the most important weeds of Iran. *Iranian Journal of Weed Research* 1 (2): 83-100 (In Persian with English abstract).



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)