مجله پژوهش علف‌های هرز
جلد ۲، شماره ۱، بهار ۱۳۸۹
صفحات ۱۱۹- ۹۵

مروری بر بقایای علف‌کش‌ها در خاک و اثرات آن بر گیاهان در تناوب‌های زراعی

Soil persistence of herbicides and their carryover effects on rotational crops – A review

محمد کاظم رمضانی[۱]

چکیده:

در بیشتر کشورهای دنیا استفاده از علف‌کش‌ها برای مبارزه با علف‌های هرز یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت این گیاهان ناخواسته است. معرفی خانواده‌های جدید علف‌کش‌ها در سال‌های اخیر، به علت داشتن فوائد بی‌شمار از جمله میزان مصرف کم در هکتار، سمیت کم برای پستانداران و توانائی جذب از طریق اندام-های هوائی و ریشه، به سرعت مورد توجه تولیدکنندگان محصولات کشاورزی قرار گرفت. کنترل طیف وسیعی از علف‌های هرز و پایداری نسبتا بالای این علف‌کش‌ها در خاک که امکان مدیریت علف‌های هرز را در طول فصل زراعی میسر می‌نماید، از عوامل دیگر در مقبولیت گروه‌های جدید علف‌کش‌ها از جمله بازدارنده‌های سنتز استولاکتات است. داشتن خصوصیات فوق، اگرچه از دیدگاه مدیریت شیمیائی علف‌های هرز در یک فصل زراعی بسیار مفید است، ولی به علت داشتن فعالیت زیاد، این گروه از علف‌کش‌ها می‌توانند پایداری خود را در خاک حفظ نموده و موجب صدمه به گیاهان زراعی حساس در تناوب‌های زراعی شوند. شناخت عوامل و فاکتورهای موثر بر پایداری بقایای این علف‌کش‌ها در خاک، مدیریت مناسب علف‌های هرز را در طول فصل زراعی امکان پذیر و کاهش اثرات زیان‌بار را به گیاهان غیر هدف در تناوب‌ها را ممکن می‌سازد. عوامل محیطی از جمله رطوبت و درجه حرارت فاکتورهای بسیار مهم در تعیین میزان تجزیه و جذب علف‌کش‌ها در خاک هستند. مکانیسم‌های تعیین کننده سرنوشت علف‌کش‌ها در خاک از جمله، تجزیه نوری، فراریت، آبشوئی، رونشینی و تجزیه از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده میزان پایداری علف‌کش‌ها در خاک هستند. فاکتورهای محیطی و همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیائی علفکش و خاک بر هر یک از فرایندهای فوق تاثیر گذاشته و برآیند اثرات این فاکتورها میزان پایداری بقایای علف‌کش‌ها را در خاک و درنتیجه اثرات جانبی آن‌ها را بر گیاهان زراعی و میکروارگانیسم‌های خاک تعیین می‌کنند. میزان مواد آلی و همچنین اسیدیته خاک دو فاکتور مهم در تعیین میزان بقایای قابل دسترس علف‌کش‌ها در خاک هستند. اسیدی، بازی و یا خنثی بودن مولکول علف‌کش‌ها از خصوصیات مهمی است که در میزان تاثیر فرایندهای تعیین کننده سرنوشت علف‌کش‌ها نقش دارد. در این مقاله مهم‌ترین فرایندهای (رونشینی و تجزیه) موثر بر پایداری علف‌کش‌ها در خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد و فاکتورهای محیطی، خصوصیات علف‌کش‌ها و ارتباط خصوصیات خاک با پایداری علف‌کش‌ها بحث خواهد شد.

کلمات کلیدی: علف‌کش، رونشینی، تجزیه، پایداری، خاک

۱- مقدمه:

کاربرد مواد شیمیائی توسط بشر با هدف کنترل گیاهان مزاحم به چندین قرن قبل بر می‌گردد، ولی شروع مدیریت علف‌های هرز با مواد شیمیائی جدید با کشف علف‌کش‌های شبه هورمونی در اوائل دهه ۱۹۴۰ آغاز گردید. اولین گروه علف‌کش‌های شبه

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۴/۰۶

۱- استادیار بخش تحقیقات آفت‌کش‌ها، موسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور
*- نویسنده مسئول E-mail: mkramezani@iripp.ir

هورمونی شناخته شده اسیدهای فنوکسی بودند. گسترش استفاده از علف‌کش‌های 2,4-D و MCPA و علف‌کش‌های شبه هورمونی دیگر برای کنترل علف‌های هرز پهن برگ در غلات دوره جدیدی از مدیریت شیمیائی علف‌های‌هرز را پس از جنگ جهانی دوم رقم زد. در طی دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بود که استفاده از علف‌کش‌های با دز نسبتا کم برای کنترل انتخابی علف‌های هرز در گیاهان زراعی به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفت (Smith, 1995).

در حال حاضر کشف یک ترکیب به عنوان علف‌کش جدید و یا یک علف‌کش با نحوه عمل متفاوت بسیار مشکل است. امروزه برای کشف یک علف‌کش جدید نیاز است تا تقریبا ۵۰۰ هزار ترکیب شیمیائی مختلف غربال شود، در حالی که این رقم در دهه ۱۹۴۰ یک به ۵۰۰ بوده است (Tan *et al*., 2005). صنایع تولید کننده مواد شیمیائی کشاورزی در توسعه علف‌کش‌های جدید بسیار موفق عمل نموده است، به طوریکه توانسته است ترکیبات جدیدی را با مقدار مصرف کم و همچنین نحوه عمل جدید وارد بازار نماید. هرچند، در سال‌های اخیر این روند کند شده است، به طوری‌که از زمان معرفی سولکوتریون[1] در سال ۱۹۹۱ که یک علف‌کش بازدارنده آنزیم هیدروفنیل پیروات دی اکسیژناز[2] است، هیچ گونه علف‌کشی با نحوه عمل متفاوت معرفی نشده است. در طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۵ ده نحوه عمل متفاوت و بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۱ پنج نحوه عمل متفاوت به صورت تجاری به بازار آمدند (Smith, 1995; Tan *et al.,* 2005). معرفی علف‌کش‌ها را در واقع می‌توان یکی از بزرگ‌ترین پیشرفت‌ها در کشاورزی دانست. در حال حاضر حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از هزینه نهاده‌ها را در آمریکا مصرف علف‌کش‌ها تشکیل می‌دهد. امروزه در بیشتر کشورهای جهان سیستم های کشاورزی پیشرفته بر مصرف علف‌کش‌ها برای تولید بیشتر تاکید دارد و در صورت عدم مبارزه با علف‌های هرز بیش از ۵۰ درصد محصول در اثر تهاجم آنها از بین می رود. با توجه به آمار موجود سهم علف‌کش‌ها از کل آفت-کش‌های مورد استفاده در کشور بیش از بقیه آفت-کش‌ها است . این نسبت در سال ۱۳۸۵ در حشره‌کش‌ها ۳۰٪ علف‌کش‌ها ۴۸٪ و قارچ‌کش‌ها ۱۷٪ بوده است (شکل ۱).

علف‌کش‌هائی که بقایای آن‌ها برای مدت طولانی‌تری در خاک باقی می‌مانند دوره کنترل علف‌های هرز را طولانی می‌کنند، و در نتیجه کارائی مدیریت علف‌های هرز را بالا می‌برند. از طرف دیگر، افزایش پایداری آن‌ها در خاک ممکن است به اندازه‌ای باشد که بتواند به گیاهان زراعی در تناوب-های سال بعد خسارت وارد نماید. بین پایداری علف-کش و فعالیت آن در خاک تفاوت وجود دارد. بعضی از علف‌کش‌ها ممکن است برای مدت طولانی در خاک پایدار بمانند ولی برای جذب توسط گیاه در دسترس نباشند و بنابراین فعالیت علف‌کشی نداشته باشند (Helling, 2005).

گروه‌های جدید علف‌کش‌ها همانند علف‌کش-های بازدارنده سنتز استولاکتات گروه های مهمی از علف‌کش‌ها هستند که بقایای آن‌ها برای مدت طولانی‌تری در خاک فعال هستند. این گروه از علف-کش‌ها ترکیباتی هستند که برای کنترل طیف

[1]- Sulcotrione
[2]- 4-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase (HPPD)

وسیعی از علف‌های هرز در گیاهان زراعی پهن برگ و باریک برگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحمل بالای گیاهان زراعی، کنترل مناسب علف‌های هرز در مقدار مصرف کم و سمیت پائین برای پستانداران علت افزایش مقبولیت این گروه از علف‌کش‌ها است (Moyer and Hamman, 2001). این گروه از علف‌کش‌ها فعالیت گیاهی نسبتا بالائی داشته به طوری‌که که توانائی جذب هم از طریق ریشه و هم برگ را دارا هستند. چون این گروه از علف‌کش‌ها قادرند برای مدت طولانی‌تری در خاک فعال باقی بمانند و با جذب از طریق سیستم ریشه، علف‌های هرزی را که در طول فصل رشد سبز می‌شوند، کنترل نمایند در برنامه‌های مدیریت علف‌های هرز بسیار مفید هستند. در واقع، یکی از اهداف استفاده از علف‌کش‌های دارای باقیمانده در خاک، کنترل طولانی‌مدت علف‌های هرز در طی فصل رشد است. اگرچه فعالیت علف‌کش فقط برای مدت زمانی که به آن نیاز است مفید می‌باشد ولی فعالیت این گروه از علف‌کش‌ها برای مدت طولانی‌تر می‌تواند مشکلاتی را برای گیاهان زراعی در تناوب‌های بعدی بوجود آورد (Brown, 1990; Vencil, 2002).

برای این‌که بتوان پایداری یک علف‌کش را در خاک پیش‌بینی نمود، شناخت فاکتورهائی که بر پایداری علف‌کش‌ها در خاک تاثیر می‌گذارد بسیار حائز اهمیت است. با ترکیب و استفاده از این اطلاعات و فاکتورها در برنامه‌های تناوبی می‌توان خسارت ناشی از بقایای علف‌کش‌ها را بر گیاهان زراعی غیر هدف را کاهش داد (Moyer and Easu, 1996; O'Sullivan, *et al*., 1998).

در این مقاله مروری سعی خواهد شد فاکتورها و فرایندهائی که بر پایداری علف‌کش‌ها در خاک تاثیرگذار هستند مورد بررسی قرار گیرد و مکانیسم‌های رونشینی[1] و تجزیه علف‌کش‌ها به عنوان دو فرایند کلیدی در خاک به طور مفصل مورد بحث قرارخواهند گرفت و گروه‌هائی از علف‌کش‌ها که پتانسیل پایداری آن‌ها در خاک قبلا گزارش شده و احتمال صدمه بقایای آن‌ها به گیاهان زراعی در تناوب‌ها وجود دارد نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- پایداری علف‌کش در خاک

طول مدت زمانی را که یک علف‌کش قادر است در خاک باقی بماند را عمر باقیمانده یا پایداری[2] آن علف‌کش در خاک می‌گویند و معمولا با نیمه عمر[3] بیان می‌شود. نیمه عمر یک علف‌کش بیان کننده مدت زمانی است که طول می‌کشد تا نیمی از علف‌کش مصرف شده به فرم غیر فعال علف‌کشی تبدیل شود (Helling, 2005). نیمه عمر یک علف‌کش معمولا در شرایط استاندارد در آزمایشگاه تعیین می‌شود و در شرایط مزرعه‌ای، شرایط محیطی و خصوصیات خاک بر نیمه عمرتاثیر خواهند داشت. نیمه عمر یک علف‌کش همیشه با حد تناوبی گیاهان زراعی به خوبی منطبق نیست زیرا پاسخ گیاهان زراعی در تناوب با نوع گیاه زراعی و علف‌کش متفاوت است. پایداری نتیجه تمام فرایندهای ناپدید شدن[4] است که با قرار گرفتن علف‌کش در محیط خاک بر آن تاثیر می‌گذارند. بعضی از گیاهان زراعی می‌توانند بقایای یک علف‌کش را به خوبی تحمل

[1] Adsorption
[2] Persistence
[3] Half-life
[4] Dissipation

نمایند و بلافاصله پس از مصرف علف‌کش امکان کشت آنها وجود دارد. در صورتی‌که ممکن است گیاهان دیگری برای مدت طولانی‌تری نسبت به بقایای یک علف‌کش در خاک حساسیت نشان دهند. این احتمال نیز وجود دارد که علف‌کش در خاک با سرعت بیشتری تجزیه و غلظت آن در خاک کاهش یابد، ولی حتی در غلظت‌های پائین‌تر بر گیاهان حساس تاثیر سوء داشته باشد ولی علف‌کش دیگری ممکن است برای مدت طولانی‌تری در خاک وجود داشته باشند ولی صدمه کم‌تری به گیاهان زراعی وارد نمایند (Helling, 2005; Moyer and Hamman, 2001).

۲-۱- فاکتورهای موثر بر پایداری علف‌کش‌ها در خاک:

مدت زمانی را که یک علف‌کش می‌تواند در خاک پایداری خود را حفظ نموده و سبب خسارت به گیاهان زراعی در تناوب‌های بعدی شود، با خصوصیات خاک، فاکتورهای محیطی و خصوصیات فیزیکی و شیمیائی علف‌کش تحت تاثیر قرار می‌گیرد (شکل ۲) (Moyer and Hamman, 2001). هر عاملی که تجزیه و اتلاف علف‌کش‌ها را در خاک تحت تاثیر قرار دهد بر پایداری علف‌کش در خاک تاثیر دارد. از آنجا که پایداری یک علف‌کش کارائی، انتقال آن در محیط خاک، و پتانسیل صدمه به گیاهان زراعی کشت شده در تناوب را تحت تاثیر قرار می‌دهد، یک فاکتور بسیار مهم در زمینه کاربرد علف‌کش‌ها در مدیریت شیمیائی علف‌های هرز است (Loux and Reese, 1993;Ayeni et al., 1998). در این بخش فاکتورهائی که پایداری علف‌کش‌ها را در خاک تحت تاثیر قرار می‌دهند مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۱-۱- فاکتورهای مربوط به خاک

فاکتورهای مربوط به خاک که پایداری علف‌کش‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند عبارتند از بافت خاک، خصوصیات شیمیائی خاک، و فعالیت میکروارگانیسم‌های موجود در خاک. بافت خاک یک فاکتور فیزیکی است که بیان کننده مقدار نسبی شن، سیلت، رس و همچنین میزان مواد آلی خاک است. کلوئیدهای رس و هوموس در خاک می‌توانند بر جذب علف‌کش‌ها، روابط آبی موجود در خاک، و همچنین با تاثیر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها، محیط خاک را تحت تاثیر قرار دهند. یکی از خصوصیات شیمیائی خاک که بر پایداری علف‌کش‌ها در خاک تاثیر دارد اسیدیته آن است. جنبه‌های میکروبی محیط خاک شامل انواع و فراوانی میکروارگانیسم‌های موجود در خاک عامل دیگری است که بر تجزیه و درنتیجه پایداری علف‌کش‌ها در خاک تاثیر دارد. بافت خاک فعالیت علف‌کش و پایداری آن را از طریق رونشینی علف‌کش‌ها به روی ذرات خاک، آبشوئی آن به قسمت‌های زیرین و فراریت علف‌کش تحت تاثیر قرار می دهند. به طور کلی خاک‌هائی که میزان رس، ماده آلی و یا هر دو آن‌ها بالا باشد به علت افزایش جذب علف‌کش‌ها به خاک و کاهش آبشوئی پتانسیل بالاتری برای صدمه به گیاهان زراعی در تناوب‌ها را دارند. این تجمع علف‌کش‌ها در خاک منجر به کاهش جذب اولیه گیاه و فعالیت علف‌کش می‌شود. هر چه مدت زمان نگهداری علف‌کش‌ها در خاک بیشتر باشد، احتمال صدمه به گیاهان زراعی حساس در تناوب‌های بعدی افزایش

می‌یابد (Ayeni *et al.,* 1998 Loux, and Reese. 1993).

اسیدیته‌های کم خاک می‌تواند پایداری علف-کش‌های برخی خانواده علف‌کش‌ها از جمله تریازین ها و سولفونیل اوره‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. تحقیقات نشان داده است که اسیدیته‌های کمتر از ۶ سبب تسریع در ناپدید شدن علف‌کش-های هر دو خانواده فوق در خاک می‌شوند. در خاک‌های اسیدی، رونشینی علف‌کش‌هائی مانند آترازین به روی ذرات خاک افزایش می‌یابد و آن-ها را برای کنترل علف‌های هرز غیر قابل دسترس می‌کند ولی در همین زمان تجزیه شیمیائی آن‌ها سریع‌تر صورت می‌گیرد. وجود این پدیده امکان افزودن آهک به خاک‌های اسیدی را برای به دست آوردن نتیجه بهتر امکان‌پذیر می‌نماید. بر عکس، اسیدیته کم خاک‌ها پایداری علف‌کش‌های خانواده ایمیدازولینون[1] ها مانند ایمازتاپیر[2] را افزایش می‌دهد. وقتی اسیدیته خاک‌ها به زیر ۶ کاهش می‌یابد، این علف‌کش‌ها رونشینی بیشتری را در خاک‌ها نشان می‌دهند که قابلیت دسترسی به آن‌ها را برای تجزیه میکروارگانیسم‌ها، که عامل اصلی تجزیه این علف‌کش‌ها در خاک است کاهش می‌دهد. اگرچه جذب این علف‌کش‌ها در اسیدیته‌های پائین کاهش می‌یابد ولی به مرور علف‌کش‌های جذب شده به محلول خاک آزاد شده و قابل دسترس قرار گرفته و می‌تواند گیاهان حساس کشت شده در تناوب را تحت تاثیر قرار دهد (Ayeni, et al., 1998;onofri, 1996; Loux and Reese, 1993).

تغییرات اسیدیته خاک می‌تواند بر مدت زمانی که علف‌کش در خاک پایدار می‌ماند تاثیر داشته باشد. در واقع اسیدیته خاک تعیین می‌کند که آیا علف‌کش در حالت کاتیونی، آنیونی یا خنثی است. شانر و هونفورد (Shaner and Hornford, 2005) نشان دادند که در اسیدیته‌های بالاتر از ۶، علف‌کش‌های ایمیدازولینون‌ها در خاک به صورت آنیون وجود دارند. در نتیجه در این شرایط علف‌کش بیشتردر محلول خاک وجود داشته و در نتیجه قابلیت دسترسی آن برای گیاه و در نتیجه اثرات گیاه‌سوزی آن نیز بیشتر خواهد شد، ولی از طرف دیگر تجزیه آن در خاک افزایش و پایداری آن کاهش می‌یابد. رنر و همکاران (Renner and Powell, 1991) دریافتند که پایداری علف‌کش‌های ایمیدازولینون‌ها در خاک با کاهش اسیدیته خاک افزایش می‌یابد، در حالی‌که محققین دیگر عکس آن را برای سولفونیل اوره‌ها گزارش کرده‌اند (Beckie and McKercher, 1989). مسیرهای اصلی ناپدید شدن علف‌کش‌ها در خاک تجزیه میکروبی و تجزیه شیمیائی (واکنش با مولکول‌های آب) صورت می‌گیرد مسیرهای اصلی تجزیه این علف‌کش‌ها در خاک می باشند. اثرات درجه حرارت و رطوبت بر تجزیه علف‌کش‌ها با بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌ها در شرایط اپتیمم رشد مشخص شده است. یک خاک حاصلخیز با میزان ماده آلی بالا ممکن است تجزیه علف‌کش‌ها را به علت فعالیت بیشتر میکروارگانیسم‌ها افزایش دهد ولی از طرفی با جذب بیشتر علف‌کش‌ها در خاک دسترسی میکروارگانیسم‌ها را برای تجزیه علف‌کش‌ها کاهش می‌دهد (Shin *et al.,*1998).

[1] Imidzolinone
[2] Imazethapyr

۲-۱-۲- فاکتور های محیطی

مهم‌ترین متغیرهای محیطی که بر تجزیه علف-کش‌ها تاثیر دارد رطوبت، درجه حرارت، و نور خورشید است. افزایش درجه حرارت و رطوبت هر دو بر سرعت تجزیه علف‌کش‌ها تاثیر مثبت دارد. شرایط خشک و سرد سرعت تجزیه علف‌کش‌ها را کاهش می‌دهد. مشخص شده است که اثرات باقیمانده علف‌کش‌ها در خاک معمولا در سال‌های پس از وقوع خشکسالی بیشتر است. نور خورشید در برخی موارد یک فاکتور مهم در تجزیه علف-کش‌ها به ویژه در سطح خاک و آب است. تجزیه نوری علف‌کش‌ها توسط خورشید برای برخی علف‌کش در محلول‌ها (برای مثال، آب)، یا سطوح گیاهی گزارش شده است. تجزیه نوری برای علف-کش‌های خاک کاربرد که پایداری و جذب آن‌ها در خاک بالا است اهمیت زیادی ندارد. موارد استثناء در این مورد علف‌کش‌های گروه دی-نیتروآنیلین ها مانند تریفلورالین و پندیمتالین هستند. این علف‌کش‌ها در صورتی‌که برای مدت طولانی در سطح خاک باقی بمانند می‌توانند از بین بروند. تجزیه نوری و فراریت علف‌کش دو دلیل اختلاط دی نیتروآنیلین‌ها با خاک پس از مصرف است (Beckie and McKercher, 1989; Rice *et al.*, 2002)

۲-۱-۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیائی علف‌کش‌ها:

خصوصیات شیمیائی یک علف‌کش می‌تواند پایداری آن را تحت تاثیر قرار دهد. حلالیت در آب، فشار بخار، و حساسیت مولکول به تجزیه میکروبی یا شیمیائی از جمله خصوصیات مهم است که می‌تواند بر پایداری علف‌کش‌ها تاثیر داشته باشد. برای مثال، آبشوئی علف‌کش‌ها که یکی از فرایند های موثر در اتلاف علف‌کش‌ها است به میزان حلالیت علف‌کش‌ها در آب بستگی دارد. هر چه میزان حلالیت علف‌کش‌ها در آب بیشتر باشد، احتمال انتقال آن‌ها از طریق آبشوئی بیشتر است. فشار بخار یک علف‌کش بر میزان فراریت آن تاثیر می-گذارد. فراریت فرایندی است که طی آن علف‌کش از حالت مایع یا جامد به گاز تبدیل می‌شود. علف-کش‌های فرار (گروهی از علف‌کش‌ها با فشار بخار بالا) معمولا سریع‌تر از علف‌کش‌های با فشار بخار کم‌تر از محیط خارج می‌شوند. با افزایش رطوبت و حرارت میزان فراریت علف‌کش‌ها افزایش می‌یابد. اغلب علف‌کش‌ها در شرایط مزرعه‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرند فرار نیستند (Shaner and Hornford, 2005; Renner and Powell 1991; Helling, 2005).

فرایندهای موثر بر اتلاف علف‌کش‌ها در خاک:

فرایندهای زیادی که با یکدیگر در ارتباط متقابل هستند و بر سرنوشت علف‌کش‌ها در خاک تاثیر دارند. جذب، تجزیه، آبشوئی سطحی و فراریت علف‌کش‌ها به اتمسفر اهمیت بیشتری نسبت به بقیه فرایندها دارند. میزان تاثیر هر یک از این فرایندها بر سرنوشت علف‌کش‌ها در خاک به شرایط محیطی و عملیات مدیریتی، و خصوصیات فیزیکی و شیمیائی علف‌کش‌ها بستگی دارد. جذب و تجزیه علف-کش‌ها در خاک مهم‌ترین فرایندهائی هستند که سرنوشت علف‌کش‌ها را در خاک تحت تاثیر قرار می‌دهند. اهمیت فرایندهای آبشوئی و فراریت علف‌کش‌ها از این جهت است که این دو فرایند می‌توانند مانع از رسیدن علف‌کش به هدف مورد نظر و یا حذف کامل آن از هدف شوند (Helling, 2005; Loux, and Reese, 1993). از

طرفی با توجه به اینکه فرایندهای رونشینی و تجزیه پس از قرار گرفتن علف‌کش در سطح یا درون خاک عمل نموده و اهمیت پیدا می‌کنند، در این مقاله بیشتر بر این دو فرایند به عنوان فرایندهای کلیدی موثر بر پایداری علف‌کش‌ها در خاک تاکید خواهد شد.

۳-۱- رونشینی علف‌کش‌ها در خاک:

واژه رونشینی به فرایندی اطلاق می‌شود که در آن مولکول علف‌کش در لایه مشترک بین مایع و جامد قرار می‌گیرد. فرایند رونشینی منجر به تشکیل یک لایه مولکول روی سطوح اجزاء خاک می‌شود که قابل برگشت است. رونشینی در خاک‌ها می‌تواند تا حدی سبب غیرفعال شدن علف‌کش‌ها شود به طوری که خصوصیات علف‌کشی یک ترکیب خنثی شود. رونشینی از طرف دیگر نیز می‌تواند با غیر قابل دسترس نمودن علف‌کش‌ها مانع از تجزیه زیستی و غیر زیستی شود. برای بیان رابطه بین میزان علف‌کشی که رونشینی خاک (x/m) می‌شود با مقداری که در محلول خاک در حالت تعادل (C) وجود دارد از ضرایب رونشینی (K_d) استفاده می‌شود. با توجه به این فرضیه که رونشینی علف‌کش‌ها در خاک به میزان ماده آلی خاک ارتباط دارد معمولا از Koc به جای Kd استفاده می‌شود (Helling, 2005; Loux, and Reese, 1993; Bresnahan,2000).

$$Koc = (kd \times 100)/ \text{درصد ماده آلی}$$

۳-۱-۱- خصوصیات علف‌کش‌ها و ارتباط آن با رونشینی توسط اجزاء خاک

خصوصیات علف‌کش‌ها از جمله اسیدی یا بازی بودن، قطبیت، و حلالیت در آب میزان رونشینی علف‌کش‌ها را در خاک تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مورد، می‌توان علف‌کش‌ها را به چهار گروه علف‌کش‌های اسیدی، بازی، کاتیونی و غیر یونی (خنثی) تقسیم نمود. علف‌کش‌های کاتیونی مانند پاراکوات و دایکوات با خصوصیات بازی شدید، به آسانی در محلول خاک یونیزه می‌شوند و بنابراین مکانیسم اصلی رونشینی این گروه از علف‌کش‌ها تبادل یونی است. به طور کلی، علف‌کش‌های بازی در مقادیر اسیدیته‌ای نزدیک به pKa آنها با حداکثر شدت رونشینی کلوئیدهای خاک می‌شوند، هر چند علف‌کش‌های اسیدی، می‌توانند در اسیدیته‌های کم‌رونشین رس‌ها شوند ولی در اسیدیته‌های معمول (۵ تا ۸) خاک‌ها می‌توانند توسط مواد آلی نیز رونشین شوند. در اسیدیته‌های نزدیک و بالاتر از pKa آن‌ها علف‌کش‌ها اسیدی تجزیه شده و تشکیل آنیون‌هائی را می‌دهند که اغلب توسط کلوئیدهای دارای بار منفی خاک دفع می‌شوند. به طور کلی، مشخص شده است که میزان ماده آلی خاک مهم‌ترین فاکتور در رونشینی اغلب علف‌کش‌ها است. با توجه به اینکه بیشتر علف‌کش‌های مورد استفاده بدون بار (خنثی) هستند، این مسئله می‌تواند صحیح باشد (Helling, 2005; Loux, and Reese, 1993; Bresnahan,2000).

در مورد ارتباط خصوصیات علف‌کش‌ها و رونشینی آن‌ها در خاک، در تحقیقی رونشینی علف‌کش‌های اسیدی ضعیف (دایکامبا، ایمازتاپیر، متسولفورون- متیل، نیکوسولفورون و سولفومتورون- متیل)، علف‌کش‌های بازی ضعیف (آترازین، هگزازینون و سیمازین) و علف‌کش بدون بار آلاکلر در شش خاک در برزیل مورد بررسی قرار گرفت (Oliveira *et al.,* 2001). به طور کلی، رونشینی

علف‌کش‌های بازی و بدون بار در تمام خاک‌ها حداکثر بود. بیشترین همبستگی بین ماده آلی و رونشینی در مورد علف‌کش آلاکلر مشاهده شد. رونشینی علف‌کش‌های بازی تریازین‌ها نیز با میزان ماده آلی خاک همبستگی نشان داد ولی رونشینی این علف‌کش‌ها در خاک تحت تاثیر اسیدیته خاک قرار گرفت. ، به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که رونشینی علف‌کش‌های اسیدی کمتر از علف‌کش‌های بازی و خنثی بود. ضریب رونشینی دایکامبا که یک علف‌کش اسیدی است، ۰/۰۷ تا ۰/۵۲ بود (شکل ۳).

قابلیت دسترس علف‌کش‌ها در خاک که با میزان تجزیه (نیمه عمر) بیان می‌شود می‌تواند هم تحت تاثیر هر دو ضریب رونشینی (Kd) و فعالیت میکروبی قرار گیرد. برای مثال بولان و باسکاران (Bolan and Baskaran, 1996) نشان دادند که مقادیر ضریب رونشینی علف‌کش 2,4-D و فعالیت میکروبی خاک با افزایش ماده آلی افزایش می‌یابد (شکل ۴). مقادیر نیمه عمر با افزایش اولیه ضریب رونشینی افزایش یافت، اما، وقتی مقادیر ضریب رونشینی به بیشتر از ۸ میلی لیتر برکیلوگرم رسید، نیمه عمر علف‌کش شروع به کاهش نمود. افزایش در مقادیر نیمه عمر (کاهش سرعت تجزیه) احتمالا به دلیل رونشینی علف‌کش بر روی کلوئیدهای خاک است. این مسئله می‌تواند منجر به غیر قابل دسترس شدن علف‌کش برای میکروارگانیسم‌ها و غلظت کم علف‌کش در محلول خاک باشد. فرایندهائی که میزان غلظت علف‌کش را در محلول خاک کاهش می‌دهند احتمالا سبب کاهش میزان تجزیه علف‌کش توسط میکروارگانیسم‌ها نیز می‌شوند (Bolan, and Baskaran. 1996).

۳-۱-۲- تاثیر محیط خاک بر رونشینی علف‌کش‌ها

علاوه بر میزان ماده آلی خاک و رس موجود در خاک، اسیدیته و میکروکلیمای محیط خاک، با در نظر گرفتن رطوبت و درجه حرارت به عنوان دو فاکتور مهم، می تواند به طور معنی‌داری بر رونشینی علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد. همان‌گونه که قبلا اشاره شد، نقش اسیدیته خاک در رونشینی علف‌کش‌های اسیدی و بازی در محیط خاک کاملا به اثبات رسیده است. در مورد این ترکیبات، اسیدیته خاک نه تنها یونیزه شدن مواد هوموسی و تا حد کم‌تری رس‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد ، بلکه میزان یونیزاسیون علف‌کش را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. چون مولکول‌های آب در سطح کلوئیدها بیشتر یونیزه شده و پروتون بیشتری تشکیل می‌دهند، اسیدیته سطح کلوئیدها معمولا از اسیدیته محلول توده خاک بیشتر است. این مسئله در مورد اثرات اسیدیته خاک بر رونشینی علف‌کش‌های بازی گزارش شده است. نقش رطوبت خاک بر رونشینی علف‌کش‌ها از آن جهت است که رطوبت معمولا با علف‌کش‌های بدون بار (خنثی) برای رونشینی سطحی کلوئیدهای خاک رقابت می‌کنند. رونشینی این گروه از علف‌کش‌ها معمولا در خاک‌های خشک شدیدتر از خاک‌های مرطوب است. رطوبت خاک همچنین با تاثیر بر ساختار خاک می‌تواند بر انتقال علف‌کش‌ها و در نتیجه رونشینی علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد. تغییر در رطوبت خاک همچنین بر فراریت و تجزیه علف‌کش‌ها در خاک تاثیر گذاشته و این اثر می‌تواند بر پدیده رونشینی علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد (Bolan, and Baskaran, 1996; Helling, 2005).

تـاثیر درجـه حـرارت خـاک بـر رونشـینی علف‌کش‌ها متغیر است. اگرچه بعضی ازمطالعات نشان داده است که رونشینی علف‌کش‌ها با افزایش درجه حرارت خاک افزایش می‌یابد. وجود نتایج متفاوت در تاثیر درجه حرارت بر رونشینی علف-کش‌ها در خاک، ممکن است به علت تفاوت موجود در مکانیسم‌های رونشینی و یا نتیجه اثر آن برفاکتورهای دیگری از قبیل حلالیت علف‌کش، میزان فراریت و تجزیه زیستی و غیر زیستی (بخش۲,۳) آن باشد. ولی به طور کلی، رونشینی علف‌کش‌ها در خاک، یک پدیده گرمازا[1] است که منجر به کاهش میزان رونشینی با افزایش درجه حرارت خاک می‌شود. افزایش درجه حرارت در محیط خاک، می‌تواند میزان فراریت و تجزیه علف‌کش‌ها را افزایش داده و در نتیجه بر رونشینی علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد. در مورد برخی از علف‌کش‌ها کاهش رونشینی با افزایش درجه حرارت ممکن است به افزایش حلالیت علف‌کش‌ها در آب بستگی داشته باشد (Krieger, *et al.,* 2000.).

۳-۱-۳- بقایای غیرقابل دسترس علف‌کش‌ها در خاک:

بر اساس تعریف انجمن بین المللی شیمی[2] ،آن بخش از بقایای علف‌کش‌ها که می توانند به شکل ترکیب اصلی (مادری) یا متابولیت‌های آن‌ها رونشین خاک شده و با روش‌های معمول قابل استخراج نیستند را بقایای غیر قابل دسترس می-گویند. در این تعریف روش استخراج نبایستی سبب تغییر ساختار ترکیب علف‌کش و یا خاک شود. به عبارت دیگر، بقایای غیر قابل استخراج علف‌کش‌ها از نظر عملی قسمتی (علف‌کش یا متابولیت‌های) است که پس از استخراج با روش سوکسله[3] و استفاده از متانول برای مدت ۲۴ ساعت قابل استخراج نیستند. ماده آلی خاک بویژه مواد هوموسی نقش اساسی را در تشکیل بقایای غیر قابل استخراج علف‌کش‌ها در خاک بازی می‌نمایند. بر اساس نتایج آزمایشات مقادیر زیادی (۲۰ تا ۷۰ درصد) از بقایای آفت‌کش‌هائی که در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند به صورت بقایای پایدار غیر قابل استخراج، رونشین خاک می‌شود (Fuhr, 1996; Krieger, *et al.,* 2000).

افزایش طول مدت زمان تماس علف‌کش با خاک که ممکن است سبب رونشینی شدیدتر علف‌کش‌ها به روی کلوئیدهای خاک شود یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد بقایای غیر قابل استخراج علف‌کش‌ها است. بقایای غیر قابل استخراج علف‌کش‌ها که رونشین کلوئیدهای خاک شده‌اند می‌توانند از طریق فرایند-های فیزیکی، شیمیائی و میکروبی ، در محلول خاک آزاد شوند. این بقایا می‌توانند پس از آزاد شدن در محلول خاک توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده، مجددا به روی کلوئیدهای خاک رونشین شده، توسط گیاه جذب و یا به آب‌های سطحی و زیرزمینی منتقل شوند. این ترکیبات آزاد شده ممکن است پس از مدتی برای گیاهان و جوامع زیستی موجود در خاک قابل جذب شده و اثرات متفاوتی از قبیل گیاه سوزی را بر گیاهان غیر هدف داشته باشند. برای مثال، قابلیت دسترسی مجدد علف‌کش های رونشین شده به روی

[1] Exothermic
[2] The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
[3] Soxhlet

کلوئیدهای خاک برای کلزا، وکرم‌های خاکی مشاهده شده است. اخیرا گزارش شده است که ۴۸ درصد از بقایای متسولفورون- متیل، یکی از علف‌کش‌های گروه سولفونیل اوره، می تواند تبدیل به بقایای غیر قابل استخراج شده و با شدت به روی کلوئیدهای خاک رونشین شود (Ye *et al.,* 2003). در تحقیقات دیگری توسط همین نویسنده مشخص شده است که ۱۰ تا ۵۵ درصد متسولفورون- متیل می‌تواند به بقایای غیر قابل استخراج تبدیل شود. از طرف دیگر گزارش شده است که بقایای غیر قابل استخراج این علف-کش سبب صدمه به گیاهان زراعی در تناوب‌های بعدی شده است. برای مثال، یو و همکاران (Ye *et al.,* 2003) گزارش نمودند که بقایای غیر قابل استخراج مت سولفورون- متیل که پس از آزاد شدن در محلول خاک مجددا در دسترس گیاه قرار گرفت سبب سمیت گیاهی برای کلزا شد. در تحقیق دیگری کاهش رشد ریشه برنج توسط بقایای غیر قابل استخراج این علف‌کش گزارش شده است. در تحقیق دیگری مشخص شده است که بقایای آزاد شده از کلروسولفورون در خاک سبب گیاه‌سوزی در گیاه برنج شد. بنابراین، احتمال آزادسازی، جذب، و پتانسیل گیاه‌سوزی بعدی علف‌کش‌های رونشین شده به روی کلوئیدهای خاک برای گیاهان زراعی غیر هدف و میکروارگانیسم‌ها ازموضوع‌های مهم در تحقیقات سرنوشت علف‌کش‌ها در خاک است (Pons, and Baniuso, 1998; Ye *et al.,* 2003).

۳-۲- تجزیه علف‌کش‌ها در خاک

واکنش‌های مختلف تجزیه (زیستی و غیر زیستی) شاید مهم‌ترین فرایندهائی باشند که علف‌کش‌ها را نه تنها در خاک بلکه در کل محیط تحت تاثیر قرار می‌دهند. این واکنش‌ها ممکن است منجر به تجزیه کامل علف‌کش‌ها به ترکیبات ساده معدنی (معدنی شدن) شوند. در صورتی‌که معدنی شدن کامل علف-کش‌ها در خاک صورت نگیرد واکنش‌های تجزیه منجر به تشکیل ترکیبات حد واسطی می‌شوند که ممکن است سمیت کمتر یا بیشتری در مقایسه با ترکیب اصلی علف‌کش برای گیاهان یا موجودات زنده دیگر را در بر داشته باشند. به علاوه، سرنوشت مواد از حاصل از تجزیه علف‌کش‌ها به علت تغییرات فیزیکی و شیمیائی در خاک ممکن است با ترکیبات اصلی متفاوت باشد. بنابراین اهمیت واکنش‌های تجزیه علف‌کش‌ها در این واقعیت نهفته است که آن‌ها ممکن است: (الف) منجر به تغییر شکل ترکیبات در حدی شوند که این ترکیبات نتوانند اثرات سوئی بر گیاهان یا موجودات غیر هدف داشته باشند؛ یا (ب) ممکن است منجر به تشکیل ترکیبات حد واسطی شوند که به طور بالقوه سمیت آنها در محیط بیشتر و سرنوشت آنها در خاک به خوبی شناخته نشده باشد.

واکنش‌های تجزیه علف‌کش‌ها در خاک بسته به این‌که با دخالت میکروارگانیسم‌های موجود در خاک صورت پذیرد یا به صورت غیر زیستی توسط واکنش‌های غیر آنزیمی انجام پذیرد، به دو گروه تجزیه زیستی[1] (بیولویکی) و تجزیه غیرزیستی[2] تقسیم می‌شوند. تمایز بین این دو فرایند در تجزیه علف‌کش‌ها در خاک مشکل و پیچیده است زیرا این

[1] Biotic
[2] Abiotic

دو فرایند ممکن است به طور همزمان اتفاق افتد و محصول نهائی تجزیه هر دو مسیر نیز مشابه باشد (Jackson, *et al,*. 2000).

۳-۲-۱- فرایندهای تجزیه غیر زیستی (غیر بیولوژیک)

فرایندهای غیر زیستی به تمام فرایندهای موثر در تجزیه علف‌کش‌ها که در آن آنزیم‌ها دخالتی ندارند، گفته می‌شود. به جز در محیط‌هائی که اکسیزن به شدت محدود باشد، اغلب فرایندهای تجزیه غیر زیستی علف‌کش‌ها با دخالت اکسیژن صورت می‌گیرد. در محلول خاک معمولا تجزیه علف‌کش‌ها از طریق واکنش هیدرولیز صورت می‌گیرد. مشخص شده است که هیدرولیز بسیاری از علف‌کش‌ها با اسیدیته وابسته است. برای مثال، هیدرولیز مهم‌ترین فرایند تجزیه علف‌کش‌های سولفونیل اوره در خاک‌های اسیدی گزارش شده است. سرمه وهمکاران (Sarmah *et al.,* 1998) هیدرولیز تریاسولفورون، متسولفورون- متیل و کلروسولفورون را در محلول خاک در دامنه متفاوتی از اسیدیته (۵/۲ تا ۱۱/۲) مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این آزمایش، میزان هیدرولیز هر سه علف‌کش به شدت وابسته به اسیدیته بود، و سرعت هیدرولیز در اسیدیته‌های پائین (۵/۲ تا ۶/۲) به مراتب سریع‌تر از اسیدیته‌های قلیائی بود. همچنین، تاثیر میزان مواد آلی و اسیدیته خاک بر هیدرولیز علف‌کش‌های خانواده تریازین ها گزارش شده است. بعضی واکنش‌ها ممکن است سبب افزایش حلالیت علف‌کش‌ها در آب شده و در نتیجه آبشوئی آن‌ها را در محیط خاک افزایش دهند. علاوه بر واکنش‌هائی که در درون توده خاک صورت می‌گیرد، برخی از واکنش‌ها مانند تجزیه نوری در سطح خاک اتفاق می‌افتد. تجزیه نوری علف‌کش‌ها ممکن است به صورت مستقیم، که در آن مولکول علف‌کش مستقیما نور ماورائ بنفش را جذب می‌کند، و یا ممکن است به صورت مکانیسم غیر مستقیم، که در آن انرژی نوری به وسیله اجزائ خاک دریافت و سپس به مولکول علف‌کش منتقل می‌شود، صورت پذیرد. خاک و اجزائ تشکیل دهنده آن، که از طریق رواناب به منابع آبی منتقل می‌شوند نیز می‌توانند نقش زیادی در تجزیه نوری علف‌کش‌ها در محیط‌های آبی داشته باشند. خاک به طور کلی، با اثر پوششی در رسیدن نور، سبب کاهش تجزیه نوری علف‌کش‌ها در خاک می‌شود، از طرف دیگر، مواد آلی و به خصوص اسیدهای هوموسی می‌توانند در تسریع تجزیه نوری علف‌کش‌ها نقش بسزائی داشته باشند. عمق نفوذ نور درخاک نسبتا کم است و مطالعات نشان داده است که یک لایه نیم میلی متری خاک می‌تواند مانع از رسیدن ۹۰ درصد نور خورشید به درون خاک شود (Sarmah *et al.,* 1998).

۳-۲-۲- تجزیه میکروبی (زیستی)

در بیشتر موارد تجزیه میکروبی علف‌کش‌ها در خاک اهمیت بیشتری نسبت به واکنش‌های تجزیه غیر زیستی دارد. عوامل اصلی تجزیه میکروبی در خاک باکتری‌ها، قارچ‌ها، و اکتینومایست ها هستند. اعتقاد بر این است که تجزیه میکروبی تقریبا مسیر اصلی تجزیه علف‌کش‌ها در اغلب خاک‌های سطحی، نزدیک مناطق ریشه گیاه (میکوریزا)، است. قسمت بیشتر علف‌کش‌هائی که برای کنترل علف‌های هرز استفاده می‌شوند در نهایت وارد خاک می‌شوند و در آنجا با

مواد آلی خاک واکنش نشان داده و ممکن است با تجزیه شیمیائی یا میکروبی تغییر شکل دهند. تجزیه میکروبی فرایند کلیدی است که پویائی یک علف‌کش و در نتیجه پایداری را در خاک و همچنین آبشوئی آن را به خارج از محل مصرف تحت تاثیر قرار می‌دهد (Aislabie, 1995).

تجزیه میکروبی علف‌کش‌ها در خاک ممکن است مکانیسم‌های متفاوتی داشته باشد. تجزیه میکروبی می تواند به محض تماس علف‌کش با میکروارگانیسم موجود در خاک شروع شود که در این مکانیسم ، علف‌کش بلافاصله به عنوان منبع انرژی برای جامعه میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در نتیجه علف‌کش تجزیه و جمعیت میکروبی خاک افزایش می‌یابد. تجزیه میکروبی علف‌کش‌هائی از قبیل گلیفوست، و علف‌کش‌های سولفونیل اوره از طریق این مکانیسم اتفاق می‌افتد. نوع دیگر مکانیسم تجزیه میکروبی علف‌کش در خاک پس از وجود یک فاز تاخیری[1]، که نتیجه تطابق پذیری میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه علف‌کش‌ها است صورت می‌گیرد. وجود فاز تاخیری نشان دهنده ضرورت تطابق (سازش) پذیری[2] میکروارگانیسم‌ها در خاک قبل از شروع تجزیه علف‌کش‌ها است. پس از سازگاری میکروارگانیسم‌ها ، تجزیه کامل علف‌کش‌ها همانند مکانیسم اول افزایش می یابد. مکانیسم تجزیه میکروبی با فاز تاخیری برای اغلب علف‌کش‌ها در خاک غالب است، زیرا معمولا علف‌کش‌ها ترکیباتی مصنوعی بوده و دارای ساختار متفاوتی (به عبارت دیگر خارجی) با منابع غذائی طبیعی که سیستم‌های آنزیمی برای تجزیه آن‌ها در میکروفلور طبیعی وجود دارد هستند. این پدیده می‌تواند سبب کاهش کارائی علف‌کش‌های خاک مصرف شود (Bolan, and Baskaran, 1996; Krieger, *et al.,* 2000).

تسریع تجزیه علف‌کش‌ها در خاک توسط میکروارگانیسم‌ها پدیده‌ای است که ممکن است کاهش کارائی علف‌کش‌های خاک مصرف را به دنبال داشته باشد. این پدیده در اثر مصرف مداوم یک ترکیب مشابه و یا ترکیباتی از گروه‌های مشابه که قبلا استفاده شده‌اند بوجود می‌آید. کاربرد علف‌کش‌های فنوکسی اسیدها از قبیل 2,4-D و MCPA مثال‌های خوبی از این نوع هستند. این علف‌کش‌ها وقتی برای اولین مرتبه استفاده می‌شوند، تجزیه آن‌ها با کندی صورت می‌گیرد. پس از یک دوره تاخیری، اتلاف آنها در خاک در نتیجه متابولیسم میکروبی بسیار سریع است (شکل ۵) (Krieger, *et al.,* 2000).

تسریع تجزیه علف‌کش آترازین در خاک‌های مزارع ذرت که سابقه مصرف این علف‌کش را داشته است نیز گزارش شده است. ناپدید شدن آترازین در شرایط مزرعه‌ای و گلخانه‌ای در خاک‌های مزارع ذرت با سابقه مصرف این علف‌کش تقریبا دو برابر خاک‌های مزارعی بود که هیچگونه علف‌کشی در آن‌ها استفاده نشده بود. نیمه عمر آترازین در مزارعی که به طور پیوسته برای ۶ سال متوالی ذرت کاشته شده و آترازین هر سال مصرف شده بود ۹ روز، در مزارعی که تناوب درت- پنبه بود و هر دو سال یک مرتبه آترازین استفاده شده بود ۱۰ روز و در مزارعی که سابقه مصرف آترازین نداشت ۱۷ روز محاسبه شد (شکل۶) (Krutz, *et al.,* 2007).

[1] lag period
[2] Acclimatization

۳-۲-۳- فاکتورهای موثر بر تجزیه علف‌کش‌ها در خاک

فاکتورهائی که میزان تجزیه علف‌کش‌ها را در خاک تحت تاثیر قرار می‌دهند شامل هم خصوصیات ساختاری علف‌کش و هم خصوصیات خاک اشند. خصوصیات علف‌کش‌ها اصولا مربوط به نوع، تعداد و مکان گروه‌های عاملی در مولکول علف‌کش‌ها است. گروه‌های عاملی مانند نیترو (NO_2) و گروه‌های هالوژن در مقایسه با گروه‌های دیگری از جمله هیدروکسیل‌ها[1]، متوکسیل‌ها[2] و کربوکسیل‌ها[3] نسبت به تجزیه مقاوم‌تر هستند. علاوه بر اثر گروه‌های عاملی در مولکول علف‌کش‌ها، قابلیت تجزیه زیستی با افزایش تعداد کربن، اندازه مولکول، و تعداد حلقه‌ها در مولکول کاهش می‌یابد (Bolan, and Baskaran, 1996; Krieger, *et al.,* 2000)

مهم‌ترین خصوصیات خاک که تجزیه علف‌کش‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند شامل رطوبت خاک، درجه حرارت، پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، اسیدیته خاک، ماده آلی و دیگر کلوئیدهای خاک هستند. حد بالا و پائین هر یک از فاکتورهای محیطی فوق می‌تواند بر فعالیت میکروبی خاک تاثیر گذاشته و فرایند تجزیه میکروبی را کند نماید. در شرایط مزرعه‌ای، این فاکتورها کاملا به هم وابسته‌اند. اثر مواد آلی بر واکنش‌های زیستی می‌تواند از دو جهت باشد؛ یکی این‌که ماده آلی به عنوان یک منبع انرژی افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها را سبب شده و با افزایش تعداد و فعالیت آنها فرایندهای زیستی تجزیه علف‌کش‌ها را سرعت می‌بخشد و از طرف دیگر، رونشینی علف‌کش‌ها تجزیه آنزیمی آن‌ها را به تاخیر می‌اندازد. رطوبت خاک جدای از تاثیر بر افزایش فعالیت میکروبی، با تحت تاثیر قرار دادن شرایط اکسیداسیون و احیاء بر هر دو فرایند تجزیه زیستی و غیر زیستی تاثیر می‌گذارد (Krieger, *et al.,* 2000;Jackson *et al.,* 2000)

علاوه بر فاکتورهای مربوط به ساختار علف‌کش و همچنین محیطی، الگوهای مصرف علف‌کش میزان واکنش‌های تجزیه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد. عمق قرار گرفتن علف‌کش در خاک و یا عمق اختلاط علف‌کش در تجزیه آن مهم است. فاکتورهائی مانند میزان تجزیه یا استفاده از تعداد بیشتری از علف‌کش‌ها می‌تواند بر تجزیه آنها تاثیر داشته باشد. همان‌طور که قبلا گفته شد تکرار مصرف علف‌کش‌های مشابه و یا هم‌گروه می‌تواند منجر به تسریع تجزیه علف‌کش‌ها در خاک‌های با سابقه مصرف شود. شخم و نوع خاک‌ورزی بر توزیع مواد آلی در خاک، درجه حرارت، رطوبت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته و بیوماس و فعالیت میکروبی که هر یک از این فاکتور-ها پایداری علف‌کش‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند تاثیر دارد. سیستم‌های بدون شخم سبب افزایش ماده آلی خاک، کاهش اسیدیته، بیوماس و فعالیت بیشتر میکروارگانیسم‌ها، بالا بردن میزان رطوبت خاک، و کاهش درجه حرارت در مقایسه با شخم معمولی می‌شود که نتیجه نهائی آن کاهش پایداری علف‌کش‌ها در خاک است. برای مثال، در تحقیقی مشخص شد که اثرات سوء آترازین بر گیاهان زراعی در تناوب در شرایط شخم حداقل کمتر از شخم‌های معمولی بود (Burnside and Wicks, 1980). همچنین مشخص شد که ۱۲ ماه پس از مصرف آترازین،

[1] Hydroxyl
[2] Methoxyl
[3] Carboxyl

غلظت این علف‌کش در کرت‌هائی که با گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شده بود دو برابر بیشتر از کرت‌هائی بود که شخم دریافت نکرده بودند (Krieger, *et al.,* 2000; Jackson *et al.,* 2000; Aislabie, 1995).

تاثیر درجه حرارت بر تجزیه علف‌کش‌ها معمولا با فاکتور Q_{10} بیان می‌شود. در واقع، Q_{10} فاکتوری است که نشان دهنده افزایش تجزیه علف‌کش‌ها با افزایش ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. اگرچه این فاکتور اساس ترمودینامیکی دارد، ولی درک آن برای مطالعه اثرات درجه حرارت بر تجزیه علف‌کش‌ها آسان است. تاثیر درجه حرارت و رطوبت بر پایداری علف‌کش‌های آترازین، متریبوزین، و متولاکلر در خاک نشان داد که تاثیر درجه حرارت بر تجزیه این علف‌کش‌ها با بافت خاک مرتبط است و مشخص شد که برای هر سه علف‌کش، Q_{10} در خاک‌های با میزان رس بالاتر بیشتر است. منحنی‌های ناپدید شدن علف‌کش‌ها در درجه حرارت های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد در خاک لومی در شکل ۷ نشان داده شده است. تفاوت تجزیه آترازین در ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر از تجزیه متریبوزین و متولاکلر بود که نشان می‌دهد تجزیه بیولوژیکی و شیمیائی متریبوزین و متولاکلر ممکن است در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد به حد اپتیمم رسیده باشد (Topp *et al.,* 1994).

٤- علف‌کش‌های با پتانسیل بالای پایداری در خاک

پتانسیل پایداری علف‌کش‌ها در خاک متفاوت است. بر اساس منابع موجود خانواده‌هائی از علف‌کش‌ها که دارای علف‌کش‌های پایدار بوده و پتانسیل خسارت به گیاهان بعدی در تناوب را دارا هستند عبارتند از: تریازین‌ها (آترازین)، اوراسیل‌ها (تربا‌سیل)، فنیل اوره‌ها (دایورون)، سولفونیل اوره‌ها (متسولفورون)، دی نیترو آنیلین‌ها (تریفلورالین)، ایمیدازولینون‌ها (ایمازتاپیر)، وبرخی علف‌کش‌های تنظیم کننده‌های رشد از گروه پیریدین‌ها (کلوپیرالید) هستند. با توجه به اهمیت علف‌کش‌های بازدارنده سنتز استولاکتات، تحقیقات مربوط به پایداری این گروه از علف‌کش‌ها و فاکتورهای موثر بر پایداری آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

٤-١- پایداری علف‌کش‌های بازدارنده استولاکتات سنتاز (ALS) در خاک

علی‌رغم ایجاد مقاومت برخی از علف‌های هرز به علف‌کش‌های بازدارنده ALS، این گروه از علف-کش‌ها هنوز به عنوان موثرترین و پرمصرف‌ترین علف‌کش‌ها در جهان مطرح هستند. کل فروش علف‌کش‌های بازدارنده‌های ALS در طی یک دهه (۱۹۹۴ تا ۲۰۰۴) از ۱/۸۶ به ۲/۵۶ میلیارد دلار افزایش یافته است و تقریبا حدود ۱۷/۵ درصد کل فروش علف‌کش‌ها در دنیا متعلق به این گروه است. علف-کش‌های بازدارنده سنتز استولاکتات گروه بسیار مهمی از علف‌کش‌های نسل جدید است که بیشتر این علف‌کش‌ها پس از مصرف در خاک به صورت فعال باقی می‌مانند. این گروه از علف‌کش‌ها در گیاهان زراعی باریک برگ و پهن برگ برای کنترل طیف وسیعی از علف‌های هرز استفاده می‌شوند. تحمل بالای گیاهان زراعی و کنترل مناسب علف‌های هرز، همراه با میزان مصرف کم و سمیت پائین این علف-کش‌ها عوامل مهم در مقبولیت آن‌ها نه تنها در ایران بلکه در بیشتر کشورهای جهان به شمار می‌رود.

توانائی بالای فعالیت این گروه از علف‌کش‌ها در خاک و جذب از طریق ریشه گیاهان، هرچند مقوله‌ای بسیار مفید برای کنترل علف‌های هرزی است که در طی فصل زراعی ظاهر می‌شوند، ولی، پایداری بقایای این علف‌کش‌ها و متابولیت‌های آنها به فصول زراعی بعد می‌تواند اثرات زیان‌آوری را بر گیاهان زراعی حساس در تناوب‌های زراعی داشته باشد. این مسئله در سال‌هائی که به علت کاهش درجه حرارت یا رطوبت خاک تجزیه این علف‌کش‌ها کند می‌شود، شدت می‌یابد. پایداری طولانی‌مدت این علف‌کش‌ها در خاک می‌تواند بر گیاهان حساس از جمله کلزا و برخی از لگوم‌ها صدمه وارد نماید. فاکتورهائی از جمله میزان رس و مواد آلی موجود در خاک، اسیدیته، جمعیت میکروبی و سیستم‌های شخم می‌تواند بر رونشینی و تجزیه علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد (Brown, 1990; Onofri, 1996). مطالعاتی که به طور دقیق رونشینی و تجزیه این گروه از علف‌کش‌ها را در خاک‌های کشور مورد بررسی قرار دهند و اثرات بقایای آن‌ها را بر گیاهان حساس در تناوب‌های مختلف مطالعه نماید بسیار اندک است.

علف‌کش‌های گروه سولفونیل اوره، یکی از این گروه علف‌کش‌ها ، اسیدهای ضعیفی هستند که در اکثر خاک‌های کشاورزی به صورت آنیون وجود دارند. در نتیجه، رونشینی این علف‌کش‌ها به روی ذرات خاک ضعیف است. با افزایش اسیدیته خاک، به علت افزایش غلظت فرم آنیونی این علف‌کش‌ها در محلول خاک، جذب این گروه از علف‌کش‌ها کاهش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که تجزیه علف‌کش‌های سولفونیل اوره در خاک‌های قلیائی، سرد، خشک و دارای ماده آلی کم به کندی صورت می‌گیرد (Rice, *et al.*, 2002). بقایای این گروه از علف‌کش‌ها می‌تواند در شرایط خاص در خاک پایداری خود را حتی بیش از یک فصل زراعی حفظ نموده و بر گیاهان زراعی در تناوب‌های بعدی صدمه وارد نماید (Brown, 1990; Moyer and Esau, 1996). در برخی شرایط، ثابت شده است که حتی غلظت‌های کم بقایای این علف‌کش‌ها در خاک می‌توانند اثرات سوئی را بر گیاهان زراعی وارد نماید. برای مثال، غلظت ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ میکروگرم در کیلوگرم خاک از علف‌کش کلروسولفورون می‌تواند رشد گیاهان حساس از جمله لوبیا، نخود فرنگی، عدس، یا یونجه را در تناوب‌های زراعی کاهش دهد (Brown, 1990). یونجه، کلزا، ذرت، عدس، نخود فرنگی، سیب زمینی و چغندرقند در خاک‌هائی که سال قبل متسولفورون و یا تریاسولفورون مصرف شده بود، صدمه دیدند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که سولفوسولفورون می‌تواند به گیاهان زراعی حساس صدمه وارد نماید، آزمایشات نشان داد که رشد گیاهان آفتابگردان و جو در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۱/۵ میکروگرم در کیلوگرم از این علف‌کش، ۲۰ درصد کاهش نشان داد. در آزمایشات زیست سنجی که در اتاق‌های رشد انجام شد، طول ریشه آفتابگردان در غلظت ۰/۰۱ میکروگرم در کیلوگرم سولفوسولفورون به طور معنی‌داری کاهش یافت (Moyer and Hamman, 2001)، در حالی که غلظتی که توانست ۵۰ درصد طول ریشه آفتابگردان را کاهش دهد ۱ تا ۳ میکروگرم در کیلوگرم در دو نوع مختلف خاک بود. در مطالعات مزرعه‌ای اثرات گیاه سوزی در جو بهاره و نخود فرنگی نیز مشاهده شده است (Shinn *et al.*, 1998). نیمه عمر

متسولفورون متیل در خاک‌های اسیدی ۵ روز و در خاک‌های قلیائی ۶۹ روز بوده است، که نشان دهنده وابستگی تجزیه این علف‌کش به اسیدیته خاک است (Pons and Baniuso, 1998). یکی از مشکلات بعضی از علف‌کش‌های سولفونیل اوره تشکیل بقایای غیر قابل استخراج در خاک است. مطالعات نشان داده است که این بقایای می‌توانند در طول زمان در محلول خاک آزاد شده و در نتیجه به گیاهان حساس در تناوب‌های زراعی آسیب وارد نماید.

علف‌کش‌های خانواده ایمیدازولینون ها، گروه دیگری از علف‌کش‌های بازدارنده سنتز استولاکتات هستند که از این خانواده علف‌کش ایمازتاپیر در ایران برای کنترل علف‌های هرز یونجه به ثبت رسیده است. این گروه از علف‌کش‌ها با دز کم (۵۰ تا ۱۵۰ گرم در هکتار)، طیف وسیع از علف‌های هرز را کنترل می‌کنند. پایداری این گروه از علف‌کش‌ها در خاک نسبتا بالا و به رطوبت خاک، اسیدیته، ماده آلی، و نوع خاک بستگی دارد. این فاکتورها قابلیت دسترسی علف‌کش‌ها را در محلول خاک تعیین می‌کنند و بر تجزیه آن که عمدتا از طریق میکروارگانیسم‌ها و تا حد کمتری از طریق نور است را تنظیم می‌نماید (Loux and Reese, 1993). هر یک از فاکتور-های فوق از جمله اسیدیته کم و بالا بودن میزان ماده آلی خاک می‌تواند در افزایش پایداری این گروه از علف‌کش‌ها نقش داشته باشد. بنابراین، مشخص شده است که پایداری این علف‌کش‌ها ممکن است از ۹۰ تا ۷۳۰ روز برای ایمازاپیر[1]، ۹۰ روز برای ایمازاپیک[2]، و از ۶۰ تا ۳۶۰ روز برای ایمازتاپیر متفاوت باشد. پایداری نسبتا بالای این علف‌کش‌ها در خاک به علاوه حساسیت برخی از گیاهان زراعی مانند چغندر قند، سیب زمینی، گندم و برخی گیاهان زراعی دیگر نشان می‌دهد که خطرات این علف‌کش‌ها برای گیاهان زراعی در تناوب‌های زراعی ممکن است بالا باشد. در حال حاضر تحقیقاتی که پایداری علف‌کش‌های بازدارند استولاکتات را در خاک‌ها و مناطق مختلف کشور بررسی و اثرات این علف‌کش‌ها را بر گیاهان حساس در تناوب‌های زراعی بررسی نماید وجود ندارد.

۵- نتیجه‌گیری و آینده تحقیقات پایداری علف‌کش‌ها در کشور:

با توجه به روند رو به رشد مصرف علف‌کش‌های بازدارنده سنتزاستولاکتات و به خصوص سولفونیل اوره در کشور، و همچنین شرایط آب و هوائی (-کاهش بارندگی که عامل مهمی در افزایش پایداری این گروه از علف‌کش‌ها و در نتیجه تشدید اثرات بقایای آن‌ها بر گیاهان حساس در تناوب‌های زراعی است)، تحقیقات مربوط به اثرات سوء بقایای علف-کش‌ها بر گیاهان زراعی در تناوب‌ها و مناطق مختلف کشور ضروری است تا بتوان پاسخ دقیقی به مسائل و مشکلات مربوط به بقایای علف‌کش‌ها داد و به مدیریت این جنبه بسیار مهم از علف‌کش‌ها پرداخت. مسئله دیگری که مشکلات بقایای این علف‌کش‌ها را در کشور ما تشدید می‌کند این است که این گروه از علف‌کش‌ها در دامنه وسیعی از گیاهان زراعی از جمله گندم، برنج، چغندر قند، ذرت، پنبه و یونجه در مناطق مختلف کشور استفاده می‌شود. این مسئله می-

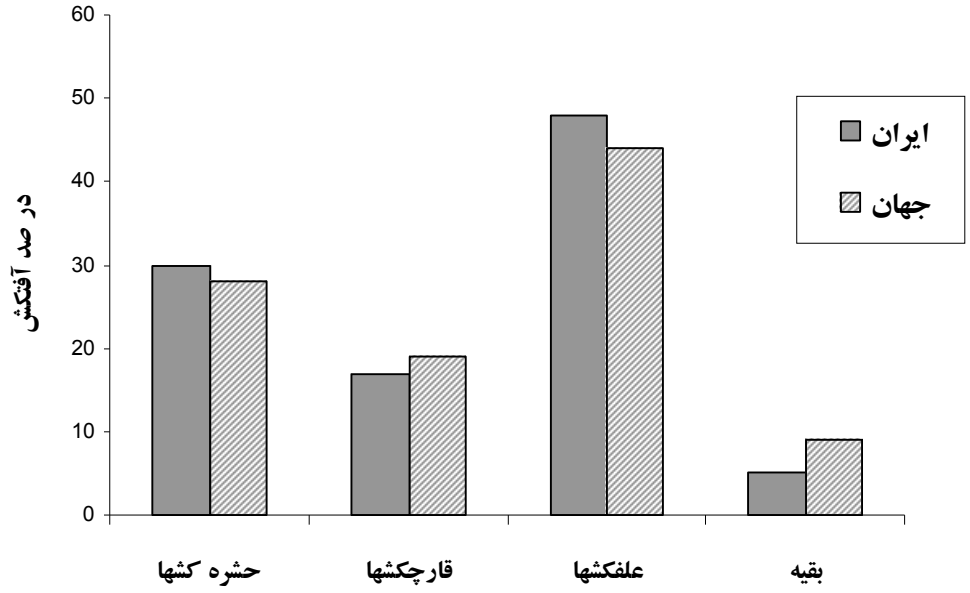
[1] Imazapyr

[2] Imazapic

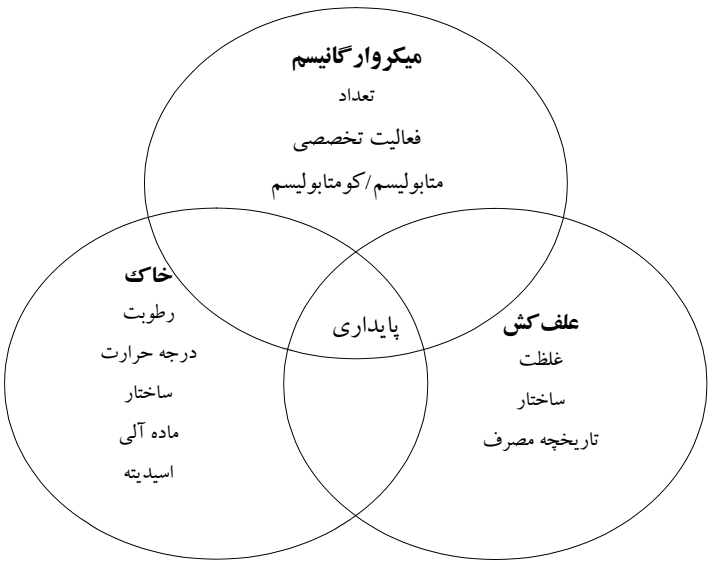
تواند منجر به مصرف مکرر علف‌کش‌های این گروه در سال‌های زراعی متوالی و یا حتی در یک فصل زراعی شود. مثال زیر می‌تواند به روشن‌تر شدن موضوع کمک نماید. برای مثال علف‌کش نیکوسولفورون (کروز) از گروه سولفونیل اوره‌ها برای کنترل علف‌های هرز مزارع ذرت مصرف می‌شود، در تناوب بعدی، که در بیشتر نقاط کشور گندم قرار می‌گیرد، علف‌کش سولفوسولفورون (آپیروس) از گروه مشابه یعنی سولفونیل اوره مصرف می‌شود. تحقیقات زیادی در اغلب کشورهائی که شرایط آب و هوائی مشابه کشور ما دارند نشان داده است که بسیاری از گیاهان زراعی حساس مانند چغندر قند، کلزا، آفتابگردان و گیاهان خانواده نخود فرنگی به یک هزارم میزان اولیه مصرف این علف‌کش‌ها یعنی ۰٫۰۱ تا ۰٫۰۷ نانوگرم در هر گرم خاک حساس هستند و این یعنی رعایت ۳ تا ۷ سال فاصله کشت مجدد گیاهان حساس در تناوب پس از مصرف علف‌کش‌های گروه فوق الذکر ضرورت دارد. برای ارائه پاسخ مناسب در مورد اثرات سوء بقایای علف‌کش‌ها بر گیاهان زراعی در تناوب و برنامه ریزی به منظور کاهش این اثرات بر گیاهان غیر هدف تحقیقات در آینده باید بتواند موارد زیر را پاسخ دهد:

- تعیین فاصله زمانی بین مصرف هر یک از علف‌کش‌ها تا کاشت گیاهان بعدی برای هر منطقه، سال‌های مورد بررسی و نوع گیاه تناوبی مورد مطالعه؛
- تعیین حداقل غلظتی از علف‌کش‌های مورد بررسی که هیچ گونه اثر سوئی بر گیاهان زراعی کشت شده در تناوب ندارد؛
- تعیین غلظت علف‌کش‌های مورد آزمایش در زمان کاشت گیاه بعدی ؛
- برآورد نیمه عمر هر یک از علف‌کش‌های مورد مطالعه برای هر منطقه و سال‌های مورد مطالعه؛
- ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و شیمیائی خاک‌ها، میزان نزولات، و به طور کلی شرایط آب و هوائی با پایداری علف‌کش‌های مورد مطالعه به منظور ارائه راهکارهای مناسب در هر منطقه از کشور

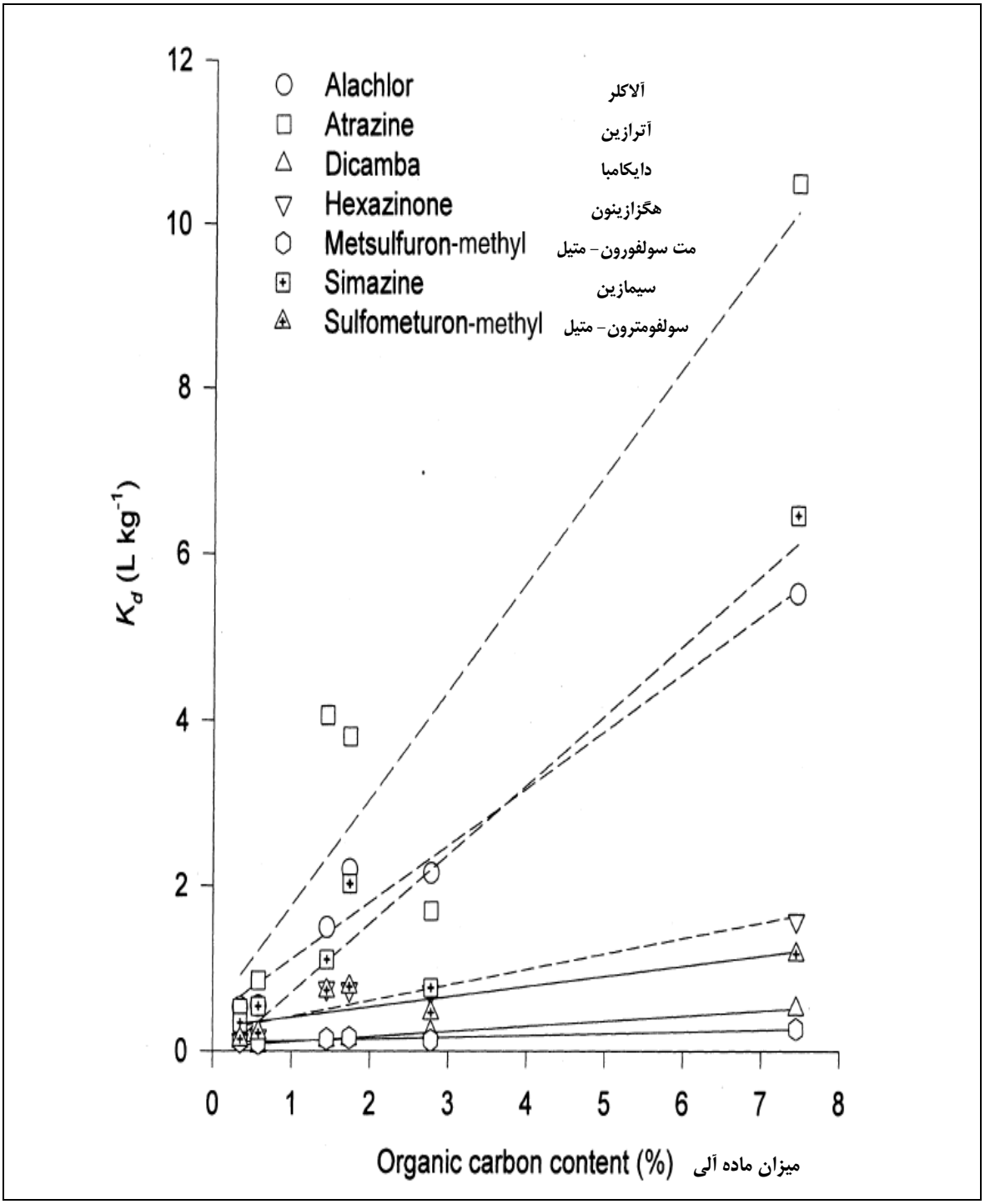
با توجه به شرایط جغرافیائی و تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر که افزایش پایداری و تشدید اثرات بقایای علف‌کش‌ها را به دنبال دارد، و همچنین روند نامطلوب ثبت علف‌کش‌های بازدارنده سنتز استولاکتات، و وجود تناوب‌های خاص کشور که مصرف مکرر این گروه از علف‌کش‌ها را اجتناب ناپذیر می‌کند، تحقیقات در مورد میزان پایداری علف‌کش‌ها و اثرات بقایای آن‌ها بر گیاهان زراعی اهمیت بسیار زیادی دارد.



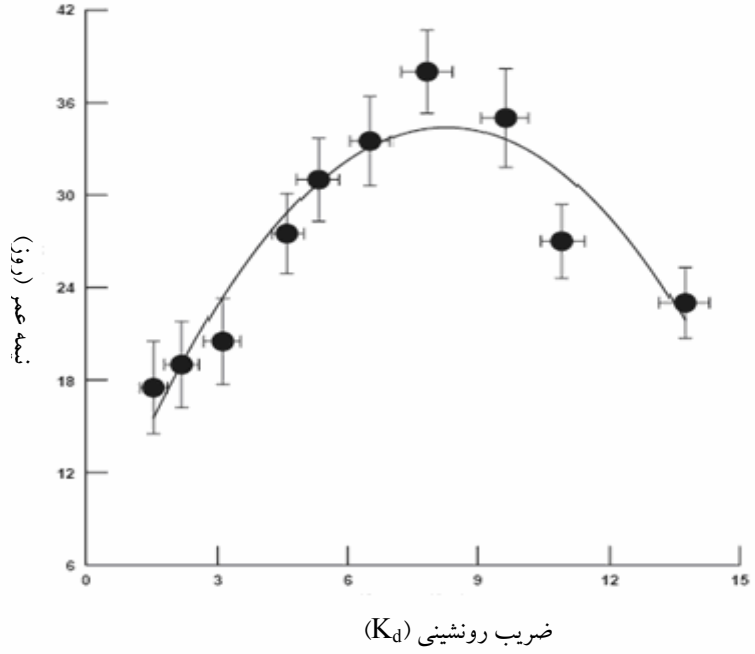
شکل۱. مقایسه میزان مصرف آفت‌کش‌ها (درصد) در ایران و جهان (Anonymous, 2008).



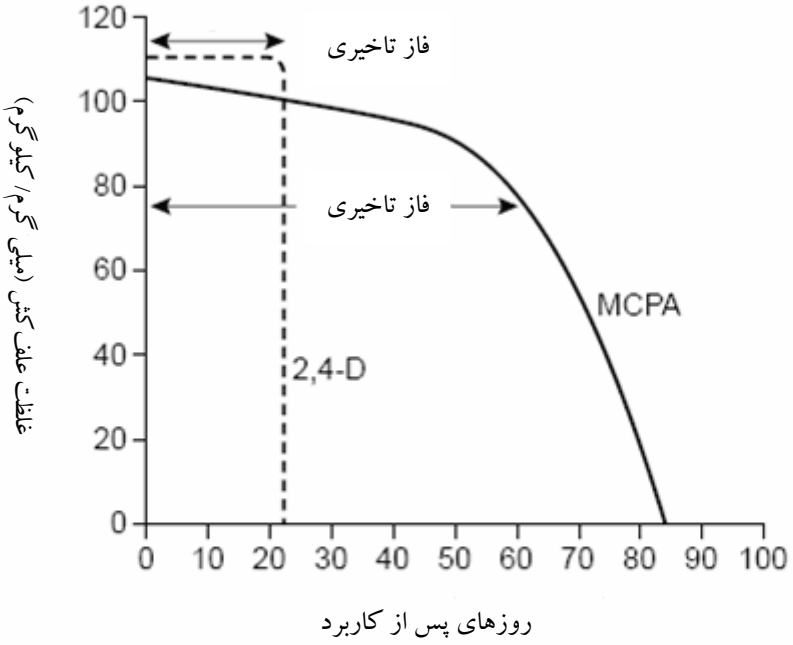
شکل۲. فاکتورهای موثر بر بایداری یک علف‌کش در خاک. فاکتورهای خاص مربوط به علف‌کش، خاک و میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده با هم در ارتباط متقابل هستند (Helling, 2005).



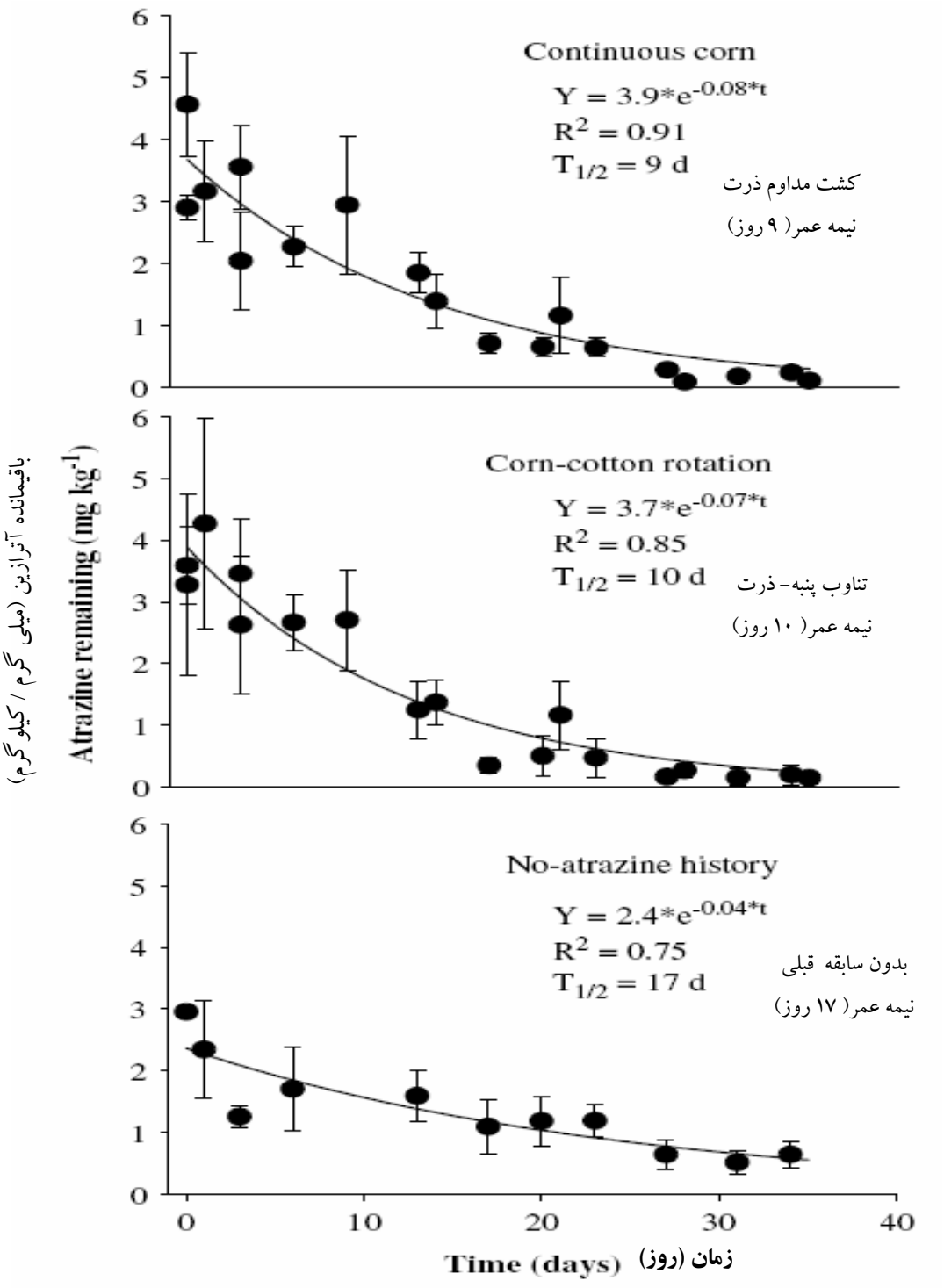
شکل ۳. رابطه بین ضرایب رونشینی (Kd) و میزان کربن آلی خاک برای علف‌کش‌های اسیدی، بازی یا خنثی (Oliveira *et al.*, 2001).



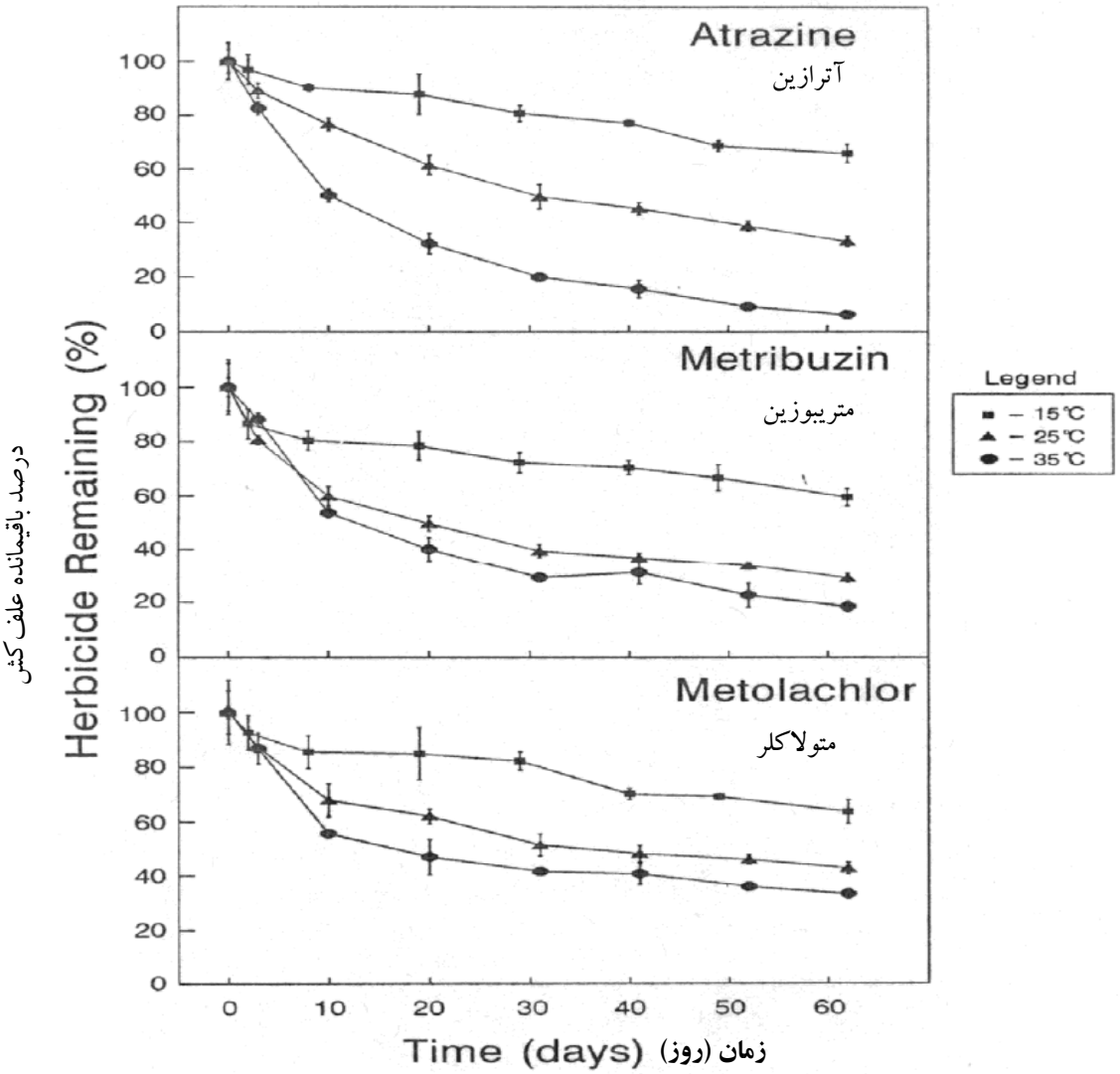
شکل۴. رابطه بین ضریب رونشینی (K_d) و نیمه عمر ($T_{1/2}$) علف‌کش 2,4-D .



شکل ۵. مکانیسم ناپدید شدن علف‌کش 2,4-D و MCPA از خاک



شکل۶ . اتلاف علف‌کش آترازین در ۶ سال کشت متوالی ذرت (مصرف سالیانه آترازین) ، تناوب پنبه- ذرت (هر دو سال یکبار مصرف آترازین) و بدون سابقه مصرف قبلی آترازین (Krutz, *et al.*, 2007).



شکل ۷. تاثیر درجه حرارت بر پایداری علف‌کش‌های آترازین، متریبوزین و متولاکلر در ۱۵ (■)، ۲۵ (▲) و ۳۵ (●) درجه سانتی گراد در یک خاک لومی (Topp *et al.*, 1994).

Reference

فهرست منابع

Aislabie, **J., and G. Lloyd-Jones**, 1995**.** Bacterial degradation of pesticides. Aus. J. Soil Res. 33:925-942.

Anonymous. 2008. Strategic plan. Pesticides Research Department. Iranian Research institute of Plant Protection (IRIPP). (in Persian).

Ayeni, A.O., B.A. Majek, and J. Hammerstedt. 1998. Rainfall influence on imazethapyr bioactivity in New Jersey soils. Weed Sci. 46: 581-586

Beckie, H.J. and R.B. McKercher. 1989. Soil residual properties of DPX-A7881 under laboratory conditions. Weed Sci. 412-418.

Bolan, N.S. and S. Baskaran. 1996. Biodegradation of 2,4-D Herbicide as Affected by its Adsorption -Desorption Behavior and Microbial Activity of Soils. Aus. J. Soil Res. 34:1041-1053.

Bresnahan, G.A., W.C. Koskinen, A.G. Dexter, and W.E. Lueschen. 2000. Influence of soil pH – sorption interactions on imazethapyr carry-over. J. Agric. Food Chem. 48: 1929-1934.

Brown, H.M. 1990. Mode of action, crop selectivity, and soil relations of the sulfonylurea herbicides. Pesticide Sci. 29: 263-281.

Burnside, O.C. and G.A. Wicks. 1980. Atrazine carry-over in soil in a reduced tillage crop production system. Weed Sci., 28: 661–666.

Fuhr, F., H. Ophof, P. Burauel, U. Wanner, and K. Haider. 1996. Modification of definition of bound residues. Pesticide Bound Residues in Soil, Bonn, 175-176.

Helling, C.S. 2005. The science of soil residual herbicides. Pages 3-22 *in* R.C. Van Acker, ed. Soil Residual Herbicides: Science and Management. Topics in Canadian Weed Science, Volume 3. Sainte-Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadian de malherbologie.

Krieger, M.S., F. Pillar, and J.A. Ostrander. 2000. Effect of temperature and moisture on the degradation and sorption of florasulam and 5-hydroxyflorasulam in soil. J. Agric. Food Chem. 48: 4757-4766.

Krutz, L.J., R.M. Zablotowicz, K.N. Reddy, C.H. Koger III, and M.A. Weaver. 2007. Enhanced degradation of atrazine under field conditionscorrelates with a loss of weed control in the glasshouse. Pest Manag Sci 63:23–31

Jackson, R., D. Ghosh, and G. Paterson. 2000. The soil degradation of the herbicide florasulam. Pest Manag. Sci. 56: 1065-1072.

Loux, M.M. and K.D. Reese. 1993. Effect of soil type and pH on persistence and carryover of imidazolinone herbicides. Weed Technol. 7: 452-458.

Moyer, J.R. and W.M. Hamman. 2001. Factors affecting the toxicity of MON 37500 residues to following crops. Weed Technol. 15: 42-47.

Moyer, J.R. and R. Esau. 1996. Imidazolinone herbicide effects on following rotational crops in Southern Alberta. Weed Technol. 10: 100-106.

Oliveira,R.S., Koskinen W.C. and F.A. Ferreira, 2001. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. Weed Res. 41, 97–110.

Onofri, A. 1996. Biological activity, field persistence, and safe cropping intervals for imazethapyr and rimsulfuron on a silty-clay soil. Weed Res. 36: 73-83

O'Sullivan, J., R.J. Thomas, and W.J. Bouw. 1998. Effect of imazethapyr and imazamox soil residues on several vegetable crops grown in Ontario. Can. J. Plant Sci. 78: 647-651.

Pons, N., and Baniuso, E., 1998. Fate of metsulfuron-methyl in soils in relation to pedo-climatic conditions. Pesticide Sci. 53, 311– 323.

Ramezani, M.K., Oliver, DP, Kookana, RS, Gill, G, and C. Preston. 2008. Abiotic degradation (photodegradation and hydrolysis) of imidazolinone herbicides, J Environ Sci Health B. 43,105-12.

Renner, K.A. and G.E. Powell. 1991. Response to sugar beet (*Beta vulgaris*) to herbicide residues in soil. Weed Technol. 5: 622-627.

Rice, C.P., C.B. Nochetto, and P. Zara. 2002. Volatilization of trifluralin, atrazine, metolachlor, chlorpyrifos, Endosulfan from freshly tilled soil. J. Agric. Food Chem. 50:4009-4017.

Sarmah, R.S. Kookanana, M.J. Duffy, A.M. Alston and B.D. Harch. 2000. Hydrolysis of triasulfuron**,** metsulfuron-methyl, and chlorsulfuron in alkaline soil and aqueous solutions. Pest Manage. Sci. 56:463–471.

Secor, J., 1994. Inhibition of barnyardgrass 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase by sulcotrione. Plant Physiol. 106, 1429–1433.

Shaner, D.L. and R. Hornford. 2005. Soil interactions of imidazolinone herbicides used in Canada. Pages 23-30 *in* R.C. Van Acker, ed. Soil Residual Herbicides: Science and Management. Topics in Canadian Weed Science, Volume 3. Sainte- Anne-de Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadian de malherbologie.

Shinn, S.L., D.C. Thill, W.J. Price, and D.A. Ball. 1998. Response of downy brome (*Bromus tectorum*) and rotational crops to MON-37500. Weed Technol. 12: 690- 698.

Smith, A. E. 1995. Handbook of Weed Management Systems, Books in Soils, Plants, and the Environment, CRC Press, New York, U.S.

Tan, S. Y., R. R. Evans, M. L. Dahmer, B. K. Singh, and D. L. Shaner. 2005. Imidazolinone-tolerant crops**:** History**,** current status and future. Pest Manage. Sci. 61:246–257.

Topp, E., Smith, WN., Reynolds, WD., Khan, SU. 1994. Atrazine and metolachlor dissipation in soils incubated in undisturbed cores, repacked cores, and flasks. J. Environ. Qual.23, 693–700.

Vencill, W.K., 2002. Herbicide Handbook, 8th ed. Lawrence, KS: Weed Science Society of America. 493 pp.

Ye, Q.F., Sun, J.H. and J.M. Wu. 2003. Cause of phytotoxicity of metsulfuron-methyl bound residues in soil. Environ. Pollut. 126, 417–423.