

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 رضانی^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 توانایی جذب از طریق اندام‌های هوایی و ریشه، به سرعت مورد توجه تولیدکنندگان محصولات کشاورزی قرار گرفت. کنترل طیف وسیعی از علف‌های هرز و پایداری نسبتاً 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 شیمیایی 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 امکان‌پذیر 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 تعیین‌کننده سرنوشت علف‌کش‌ها در خاک از جمله، تجزیه نوری، فراربت، آبشویی، رونشینی و تجزیه از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده میزان پایداری علف‌کش‌ها در خاک هستند. فاکتورهای محیطی و همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی علفکش و خاک بر هر یک از فرایندهای فوق‌تأثیر گذاشته و بر آیند اثرات این فاکتورها میزان پایداری بقایای علف‌کش‌ها را در خاک و در نتیجه 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 تأثیر فرایندهای تعیین‌کننده 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:

شروع مدیریت علف‌های هرز با مواد شیمیایی جدید

با کشف علف‌کش‌های شبه هورمونی در اوائل دهه

۱۹۴۰ آغاز گردید. اولین گروه علف‌کش‌های شبه

کاربرد مواد شیمیایی توسط بشر با هدف کنترل

گیاهان مزاحم به چندین قرن قبل بر می‌گردد، ولی

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 شیمیایی علف‌های هرز را پس از جنگ جهانی دوم رقم زد. در طی دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بود که استفاده از علف‌کش‌های با دز نسبتاً 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 تقریباً ۵۰۰ هزار ترکیب شیمیایی مختلف غربال شود، در حالی که این رقم در دهه ۱۹۴۰ یک به ۵۰۰ بوده است (Tan et al., 2005). صنایع تولید کننده مواد شیمیایی کشاورزی در توسعه علف‌کش‌های جدید بسیار موفق عمل نموده است، به طوری که 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 طوری که از زمان معرفی سولکوتریون^۱ در سال ۱۹۹۱ که یک علف‌کش بازدارنده آنزیم هیدروفیل پیروات دی اکسیژناز^۲ 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

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 شیمیایی علف‌های هرز را پس از جنگ جهانی دوم رقم زد. در طی دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بود که استفاده از علف‌کش‌های با دز نسبتاً 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 تقریباً ۵۰۰ هزار ترکیب شیمیایی مختلف غربال شود، در حالی که این رقم در دهه ۱۹۴۰ یک به ۵۰۰ بوده است (Tan et al., 2005). صنایع تولید کننده مواد شیمیایی کشاورزی در توسعه علف‌کش‌های جدید بسیار موفق عمل نموده است، به طوری که 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 طوری که از زمان معرفی سولکوتریون^۱ در سال ۱۹۹۱ که یک علف‌کش بازدارنده آنزیم هیدروفیل پیروات دی اکسیژناز^۲ 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

مرغی (Smith, 1995; Tan et al., 2005). 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 سیستم‌های 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 می‌رود. 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).

علف‌کش‌هایی که بقایای آنها برای مدت طولانی‌تری در خاک باقی می‌مانند دوره کنترل علف‌های هرز را طولانی می‌کنند، و در نتیجه کارایی 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 گروه‌های 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

^۱- Sulcotrione

^۲- 4-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase (HPPD)

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^۱ 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^۲ آن علف‌کش در خاک می‌گویند و معمولا با نیمه عمر^۳ 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 عمر تاثیر 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^۴ 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

وسعی 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 طوری که 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 این که 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).

¹ Adsorption

² Persistence

³ Half-life

⁴ Dissipation

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 علف-کش‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند عبارتند از بافت خاک، خصوصیات شیمیایی خاک، و فعالیت میکروارگانیسم‌های موجود در خاک. بافت خاک یک فاکتور فیزیکی است که بیان‌کننده 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 شیمیایی 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 در نتیجه پایداری علف‌کش‌ها در خاک تاثیر دارد. بافت خاک فعالیت علف‌کش و پایداری آن را از طریق رانشینی علف‌کش‌ها به روی ذرات خاک، آبشویی آن به قسمت‌های زیرین و فراریت علف‌کش تحت تاثیر قرار می‌دهند. به طور کلی خاک‌هایی که میزان رس، ماده آلی و یا هر دو آن‌ها بالا باشد به علت افزایش جذب علف‌کش‌ها به خاک و کاهش آبشویی 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

نمایند و بلافاصله پس از مصرف علف‌کش امکان کشت آنها وجود دارد. در صورتی که ممکن است گیاهان دیگری برای مدت طولانی تری 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 علف-کش دیگری ممکن است برای مدت طولانی تری 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 شیمیایی 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 شیمیایی علف‌های هرز است (Loux and Reese, 1993; Ayeni et al., 1998). در این بخش فاکتورهای که پایداری

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 بیشتر در 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) دریافته‌اند که پایداری علف‌کش‌های ایمیدازولینون‌ها در خاک با کاهش اسیدیته خاک افزایش می‌یابد، در حالی که 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 شیمیایی (واکنش با مولکول‌های آب) صورت می‌گیرد مسیرهای اصلی تجزیه این علف‌کش‌ها در خاک می‌باشند. 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).

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

اسیدیته‌های کم خاک می‌تواند پایداری علف‌کش‌های برخی خانواده علف‌کش‌ها از جمله تریازین‌ها و سولفونیل اوره‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. تحقیقات نشان داده است که اسیدیته‌های کمتر از ۶ سبب تسریع در ناپدید شدن علف‌کش‌های هر دو خانواده فوق در خاک می‌شوند. در خاک‌های اسیدی، رونشینی علف‌کش‌هایی مانند آترازین به روی ذرات خاک افزایش می‌یابد و آن‌ها را برای کنترل علف‌های هرز غیر قابل دسترس می‌کند ولی در همین زمان تجزیه شیمیایی 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^۱ ها مانند ایمازتاپیر^۲ 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)

¹ Imidzolinone

² Imazethapyr

۲-۱-۲- فاکتور های محیطی

فرایند های موثر در اتلاف علف کش ها است به میزان حلالیت علف کش ها در آب بستگی دارد. هر چه میزان حلالیت علف کش ها در آب بیشتر باشد، احتمال انتقال آن ها از طریق آبشویی بیشتر است. فشار بخار یک علف کش بر میزان فراریت آن تاثیر می-گذارد. فراریت فرایندی است که طی آن علف کش از حالت مایع یا جامد به گاز تبدیل می-شود. علف-کش های فرار (گروهی از علف کش ها با فشار بخار بالا) معمولاً سریع تر از علف کش های با فشار بخار کم تر از محیط خارج می-شوند. با افزایش رطوبت و حرارت میزان فراریت علف کش ها افزایش می-یابد. اغلب علف کش ها در شرایط مزرعه ای که مورد استفاده قرار می-گیرند فرار نیستند (Shaner and Hornford, 2005; Renner and Powell 1991; Helling, 2005).

فرایندهای موثر بر اتلاف علف کش ها در خاک:

فرایندهای زیادی که با یکدیگر در ارتباط متقابل هستند و بر سرنوشت علف کش ها در خاک تاثیر دارند. جذب، تجزیه، آبشویی سطحی و فراریت علف کش ها به اتمسفر اهمیت بیشتری نسبت به بقیه فرایندها دارند. میزان تاثیر هر یک از این فرایندها بر سرنوشت علف کش ها در خاک به شرایط محیطی و عملیات مدیریتی، و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی علف کش ها بستگی دارد. جذب و تجزیه علف-کش ها در خاک مهم ترین فرایندهایی هستند که سرنوشت علف کش ها را در خاک تحت تاثیر قرار می-دهند. اهمیت فرایندهای آبشویی و فراریت علف کش ها از این جهت است که این دو فرایند می-توانند مانع از رسیدن علف کش به هدف مورد نظر و یا حذف کامل آن از هدف شوند (Helling, 2005; Loux, and Reese, 1993).

مهم ترین متغیرهای محیطی که بر تجزیه علف-کش ها تاثیر دارد رطوبت، درجه حرارت، و نور خورشید است. افزایش درجه حرارت و رطوبت هر دو بر سرعت تجزیه علف کش ها تاثیر مثبت دارد. شرایط خشک و سرد سرعت تجزیه علف کش ها را کاهش می-دهد. مشخص شده است که اثرات باقیمانده علف کش ها در خاک معمولاً در سال های پس از وقوع خشکسالی بیشتر است. نور خورشید در برخی موارد یک فاکتور مهم در تجزیه علف-کش ها به ویژه در سطح خاک و آب است. تجزیه نوری علف کش ها توسط خورشید برای برخی علف کش در محلول ها (برای مثال، آب)، یا سطوح گیاهی گزارش شده است. تجزیه نوری برای علف-کش های خاک کاربرد که پایداری و جذب آن ها در خاک بالا است اهمیت زیادی ندارد. موارد استثناء در این مورد علف کش های گروه دی-نیتر و آنیلین ها مانند تریفلورالین و پندیمتالین هستند. این علف کش ها در صورتی که برای مدت طولانی در سطح خاک باقی بمانند می-توانند از بین بروند. تجزیه نوری و فراریت علف کش دو دلیل اختلاط دی نیتر و آنیلین ها با خاک پس از مصرف است (Beckie and McKercher, 1989; Rice *et al.*, 2002).

۲-۱-۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی علف کش ها:

خصوصیات شیمیایی یک علف کش می-تواند پایداری آن را تحت تاثیر قرار دهد. حلالیت در آب، فشار بخار، و حساسیت مولکول به تجزیه میکروبی یا شیمیایی از جمله خصوصیات مهم است که می-تواند بر پایداری علف کش ها تاثیر داشته باشد. برای مثال، آبشویی علف کش ها که یکی از

روشنی 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 روشنی این گروه از علف‌کش‌ها تبادل یونی است. به طور کلی، علف‌کش‌های بازی در مقادیر اسیدیته‌ای نزدیک به pKa آنها با حداکثر شدت روشنی کلویدهای خاک می‌شوند، هر چند علف‌کش‌های اسیدی، می‌توانند در اسیدیته‌های کم‌روشن‌تر رس‌ها شوند ولی در اسیدیته‌های معمول (۵ تا ۸) خاک‌ها می‌توانند توسط مواد آلی نیز روشن‌تر شوند. در اسیدیته‌های نزدیک و بالاتر از pKa آنها علف‌کش‌ها اسیدی تجزیه شده و تشکیل آنیون‌هایی را می‌دهند که اغلب توسط کلویدهای دارای بار منفی خاک دفع می‌شوند. به طور کلی، مشخص شده است که میزان ماده آلی خاک مهم‌ترین فاکتور در روشنی 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 روشنی آنها در خاک، در تحقیقی روشنی 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، روشنی

طرفی با توجه به اینکه فرایندهای روشنی 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- روشنی علف‌کش‌ها در خاک:

واژه روشنی به فرایندی اطلاق می‌شود که در آن مولکول علف‌کش در لایه مشترک بین مایع و جامد قرار می‌گیرد. فرایند روشنی منجر به تشکیل یک لایه مولکول روی سطوح اجزاء خاک می‌شود که قابل برگشت است. روشنی در خاک‌ها می‌تواند تا حدی سبب غیرفعال شدن علف‌کش‌ها شود به طوری که خصوصیات علف‌کشی یک ترکیب خنثی شود. روشنی 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 روشنی خاک (x/m) می‌شود با مقداری که در محلول خاک در حالت تعادل (C) وجود دارد از ضرایب روشنی (K_d) استفاده می‌شود. با توجه به این فرضیه که روشنی علف‌کش‌ها در خاک به میزان ماده آلی خاک ارتباط دارد معمولاً 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 روشنی توسط اجزاء خاک
خصوصیات علف‌کش‌ها از جمله اسیدی یا بازی بودن، قطبیت، و حلالیت در آب میزان

۳-۱-۲- تاثیر محیط خاک بر روشنی 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، می‌تواند به طور معنی‌داری بر روشنی علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد. همان‌گونه که قبلا اشاره شد، نقش اسیدیته خاک در روشنی 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 روشنی علف‌کش‌های بازی گزارش شده است. نقش رطوبت خاک بر روشنی علف‌کش‌ها از آن جهت است که رطوبت معمولا با علف‌کش‌های بدون بار (خنتی) برای روشنی سطحی کلوئیدهای خاک رقابت می‌کنند. روشنی 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 روشنی 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 روشنی علف‌کش‌ها در خاک تاثیر داشته باشد (Bolan, and Baskaran, 1996; Helling, 2005).

علف‌کش‌های بازی و بدون بار در تمام خاک‌ها حداکثر بود. بیشترین همبستگی بین ماده آلی و روشنی در مورد علف‌کش آلاکلر مشاهده شد. روشنی علف‌کش‌های بازی تریازین‌ها نیز با میزان ماده آلی خاک همبستگی نشان داد ولی روشنی این علف‌کش‌ها در خاک تحت تاثیر اسیدیته خاک قرار گرفت. ، به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که روشنی علف‌کش‌های اسیدی کمتر از علف‌کش‌های بازی و خنتی بود. ضریب روشنی 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 روشنی (Kd) و فعالیت میکروبی قرار گیرد. برای مثال بولان و باسکاران (Bolan and Baskaran, 1996) نشان دادند که مقادیر ضریب روشنی علف‌کش 2,4-D و فعالیت میکروبی خاک با افزایش ماده آلی افزایش می‌یابد (شکل ۴). مقادیر نیمه عمر با افزایش اولیه ضریب روشنی افزایش یافت، اما، وقتی مقادیر ضریب روشنی به بیشتر از ۸ میلی لیتر بر کیلوگرم رسید، نیمه عمر علف‌کش شروع به کاهش نمود. افزایش در مقادیر نیمه عمر (کاهش سرعت تجزیه) احتمالا به دلیل روشنی 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. فرایندهایی که میزان غلظت علف‌کش را در محلول خاک کاهش می‌دهند احتمالا سبب کاهش میزان تجزیه علف‌کش توسط میکروارگانیسم‌ها نیز می‌شوند (Bolan, and Baskaran, 1996).

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^۳ 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 می‌نماید. بر اساس نتایج آزمایشات مقادیر زیادی (۲۰ تا ۷۰ درصد) از بقایای آفت‌کش‌هایی که در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند به صورت بقایای پایدار غیر قابل استخراج، روشن خاک می‌شود (Fuhr, 1996; Krieger, et al., 2000).

افزایش طول مدت زمان تماس علف‌کش با خاک که ممکن است سبب روشن شدن شدیدتر علف‌کش‌ها به روی کلونیدهای خاک شود یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد بقایای غیر قابل استخراج علف‌کش‌ها است. بقایای غیر قابل استخراج علف‌کش‌ها که روشن کلونیدهای خاک شده‌اند می‌توانند از طریق فرایند-های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی، در محلول خاک آزاد شوند. این بقایا می‌توانند پس از آزاد شدن در محلول خاک توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده، مجدداً به روی کلونیدهای خاک روشن 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 گیاه‌سوزی را بر گیاهان غیر هدف داشته باشند. برای مثال، قابلیت دسترسی مجدد علف‌کش‌های روشن شده به روی

تأثیر درجه حرارت خاک بر روشن شدن علف‌کش‌ها متغیر است. اگرچه بعضی از مطالعات نشان داده است که روشن شدن علف‌کش‌ها با افزایش درجه حرارت خاک افزایش می‌یابد. وجود نتایج متفاوت در تأثیر درجه حرارت بر روشن شدن علف‌کش‌ها در خاک، ممکن است به علت تفاوت موجود در مکانیسم‌های روشن شدن و یا نتیجه اثر آن بر فاکتورهای دیگری از قبیل حلالیت علف‌کش، میزان فراریت و تجزیه زیستی و غیر زیستی (بخش ۲، ۳) آن باشد. ولی به طور کلی، روشن شدن علف‌کش‌ها در خاک، یک پدیده گرمازا^۱ است که منجر به کاهش میزان روشن شدن 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 روشن شدن علف‌کش‌ها در خاک تأثیر داشته باشد. در مورد برخی از علف‌کش‌ها کاهش روشن شدن با افزایش درجه حرارت ممکن است به افزایش حلالیت علف‌کش‌ها در آب بستگی داشته باشد (Krieger, et al., 2000.).

۳-۱-۳- بقایای غیر قابل دسترس علف‌کش‌ها در

خاک:

بر اساس تعریف انجمن بین‌المللی شیمی^۲، آن بخش از بقایای علف‌کش‌ها که می‌توانند به شکل ترکیب اصلی (مادری) یا متابولیت‌های آن‌ها روشن خاک شده و با روش‌های معمول قابل استخراج نیستند را بقایای غیر قابل دسترس می‌گویند. در این تعریف روش استخراج ناپیستی سبب

¹ Exothermic

² The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)

³ Soxhlet

۳-۲- تجزیه علف‌کش‌ها در خاک

واکنش‌های مختلف تجزیه (زیستی و غیر زیستی) شاید مهم‌ترین فرایندهایی 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 صورتی که 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 شیمیایی 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 این که با دخالت میکروارگانیسم‌های موجود در خاک صورت پذیرد یا به صورت غیر زیستی توسط واکنش‌های غیر آنزیمی انجام پذیرد، به دو گروه تجزیه زیستی^۱ (بیولوژیکی) و تجزیه غیرزیستی^۲ تقسیم می‌شوند. تمایز بین این دو فرایند در تجزیه علف‌کش‌ها در خاک مشکل و پیچیده است زیرا این

کلوئیدهای خاک برای کلزا، و کرم‌های خاکی مشاهده شده است. اخیراً گزارش شده است که ۴۸ درصد از بقایای متسولفورون-متیل، یکی از علف‌کش‌های گروه سولفونیل‌اوره، می‌تواند تبدیل به بقایای غیر قابل استخراج شده و با شدت به روی کلوئیدهای خاک رانشین 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 متسولفورون-متیل که پس از آزاد شدن در محلول خاک مجدداً 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 رانشین شده به روی کلوئیدهای خاک برای گیاهان زراعی غیر هدف و میکروارگانیسم‌ها از موضوع‌های مهم در تحقیقات سرنوشت علف‌کش‌ها در خاک است (Pons, and Baniuso, 1998; Ye et al., 2003).

¹ Biotic² Abiotic

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 مستقیماً نور ماوراء بنفش را جذب می‌کند، و یا ممکن است به صورت مکانیسم غیر مستقیم، که در آن انرژی نوری به وسیله اجزای خاک دریافت و سپس به مولکول علف‌کش منتقل می‌شود، صورت پذیرد. خاک و اجزای 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 بسزایی داشته باشند. عمق نفوذ نور در خاک نسبتاً 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 اکتینومیست‌ها هستند. اعتقاد بر این است که تجزیه میکروبی تقریباً مسیر اصلی تجزیه علف‌کش‌ها در اغلب خاک‌های سطحی، نزدیک مناطق ریشه گیاه (میکوریزا)، است. قسمت بیشتر علف‌کش‌هایی که برای کنترل علف‌های هرز استفاده می‌شوند در نهایت وارد خاک می‌شوند و در آنجا با

دو فرایند ممکن است به طور همزمان اتفاق افتد و محصول نهایی 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 محیط‌هایی که اکسیژن به شدت محدود باشد، اغلب فرایندهای تجزیه غیر زیستی علف‌کش‌ها با دخالت اکسیژن صورت می‌گیرد. در محلول خاک معمولاً 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 و همکاران (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 تریازین‌ها گزارش شده است. بعضی واکنش‌ها ممکن است سبب افزایش حلالیت علف‌کش‌ها در آب شده و در نتیجه آبشویی آن‌ها را در محیط خاک افزایش دهند. علاوه بر واکنش‌هایی که در درون توده

غذائی طبیعی که سیستم‌های آنزیمی برای تجزیه آن‌ها در میکروفلور طبیعی وجود دارد هستند. این پدیده می‌تواند سبب کاهش کارائی علف‌کش‌های خاک (Bolan, and Baskaran, 1996; مصرف شود (Krieger, et al., 2000).

تسریع تجزیه علف‌کش‌ها در خاک توسط میکروارگانیزم‌ها 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 قبلاً 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 تقریباً 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 ذرت-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 (شکل ۶) (Krutz, et al., 2007).

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 آبشویی 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 می‌تواند به محض تماس علف‌کش با میکروارگانیزم 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 علف‌کش‌هایی 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^۱، که نتیجه تطابق پذیری میکروارگانیزم‌ها برای تجزیه علف‌کش‌ها است صورت می‌گیرد. وجود فاز تاخیری نشان دهنده ضرورت تطابق (سازش) پذیری^۲ میکروارگانیزم‌ها در خاک قبل از شروع تجزیه علف‌کش‌ها است. پس از سازگاری میکروارگانیزم‌ها، تجزیه کامل علف‌کش‌ها همانند مکانیسم اول افزایش می‌یابد. مکانیسم تجزیه میکروبی با فاز تاخیری برای اغلب علف‌کش‌ها در خاک غالب است، زیرا معمولاً علف‌کش‌ها ترکیباتی مصنوعی بوده و دارای ساختار متفاوتی (به عبارت دیگر خارجی) با منابع

¹ lag period

² Acclimatization

۳-۲-۳- فاکتورهای موثر بر تجزیه علف‌کش‌ها

در خاک

فاکتورهایی که میزان تجزیه علف‌کش‌ها را در خاک تحت تاثیر قرار می‌دهند شامل هم خصوصیات ساختاری علف‌کش و هم خصوصیات خاک‌هاست. خصوصیات علف‌کش‌ها اصولاً مربوط به نوع، تعداد و مکان گروه‌های عاملی در مولکول علف‌کش‌هاست. گروه‌های عاملی مانند نیترو (NO_2) و گروه‌های هالوژن در مقایسه با گروه‌های دیگری از جمله هیدروکسیل‌ها^۱، متوکسیل‌ها^۲ و کربوکسیل‌ها^۳ 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 کلویدهای 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 کاملاً به هم وابسته‌اند. اثر مواد آلی بر واکنش‌های زیستی می‌تواند از دو جهت باشد؛ یکی این که 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، روشنی 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. فاکتورهایی مانند میزان تجزیه یا استفاده از تعداد بیشتری از علف‌کش‌ها می‌تواند بر تجزیه آنها تاثیر داشته باشد. همان‌طور که قبلاً 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 فاکتورها را 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

پتانسیل خسارت به گیاهان بعدی در تناوب را دارا هستند عبارتند از: تریازین‌ها (آترازین)، اوراسیل‌ها (تریاسیل)، فنیل‌اوره‌ها (دایورون)، سولفونیل‌اوره‌ها (متسولفورون)، دی‌نیترو‌آنیلین‌ها (تریفلورالین)، ایمیدازولینون‌ها (ایمازتاپیر)، و برخی علف‌کش‌های تنظیم‌کننده‌های 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.

۴-۱- پایداری علف‌کش‌های بازدارنده استولاکتات سنتاز (ALS) در خاک

علی‌رغم ایجاد مقاومت برخی از علف‌های هرز به علف‌کش‌های بازدارنده ALS، این گروه از علف‌کش‌ها 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 تقریباً حدود ۱۷/۵ درصد کل فروش علف‌کش‌ها در دنیا متعلق به این گروه است. علف‌کش‌های 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 علف‌کش‌ها عوامل مهم در مقبولیت آن‌ها نه تنها در ایران بلکه در بیشتر کشورهای جهان به شمار می‌رود.

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

تأثیر درجه حرارت بر تجزیه علف‌کش‌ها معمولاً 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. تأثیر درجه حرارت و رطوبت بر پایداری علف‌کش‌های آترازین، متریبوزین، و متولاکلر در خاک نشان داد که تأثیر 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 حرارت‌های 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 شیمیایی متریبوزین و متولاکلر ممکن است در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد به حد ایتیمم رسیده باشد (Topp et al., 1994).

۴-۲- علف‌کش‌های با پتانسیل بالای پایداری در خاک

پتانسیل پایداری علف‌کش‌ها در خاک متفاوت است. بر اساس منابع موجود خانواده‌هایی از علف‌کش‌ها که دارای علف‌کش‌های پایدار بوده و

ماده آلی کم به کندي صورت مي‌گيرد (Rice, et al., 2002). بقايای اين گروه از علف-کش‌ها مي‌تواند در شرايط خاص در خاک پايدياری خود را حتي بيش از يك فصل زراعی حفظ نموده و بر گياهان زراعی در تناوب‌های بعدي صدمه وارد نمايد (Brown, 1990; Moyer and Esau, 1996). در برخی شرايط، ثابت شده است که حتي غلظت‌های کم بقايای اين علف‌کش‌ها در خاک مي‌تواند اثرات سوئی را بر گياهان زراعی وارد نمايد. برای مثال، غلظت ۰/۰۱ تا ۰/۰۷ میکروگرم در کيلوگرم خاک از علف‌کش کلروسولفورون مي‌تواند رشد گياهان حساس از جمله لوبيا، نخود فرنگی، عدس، يا يونجه را در تناوب‌های زراعی کاهش دهد (Brown, 1990). يونجه، کلزا، ذرت، عدس، نخود فرنگی، سيب زمینی و چغندر قند در خاک‌هایی که سال قبل متسولفورون و يا ترياسولفورون مصرف شده بود، صدمهديدند. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که سولفسولفورون مي‌تواند به گياهان زراعی حساس صدمه وارد نمايد، آزمایشات نشان داد که رشد گياهان آفتابگردان و جو در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۱/۵ میکروگرم در کيلوگرم از اين علف‌کش، ۲۰ درصد کاهش نشان داد. در آزمایشات زیست‌سنجی که در اتاق‌های رشد انجام شد، طول ریشه آفتابگردان در غلظت ۰/۰۱ میکروگرم در کيلوگرم سولفسولفورون به طور معنی‌داری کاهش يافت (Moyer and Hamman, 2001)، در حالی که غلظتی که توانست ۵۰ درصد طول ریشه آفتابگردان را کاهش دهد ۱ تا ۳ میکروگرم در کيلوگرم در دو نوع مختلف خاک بود. در مطالعات مزرعه‌ای اثرات گياه سوزی در جو بهاره و نخود فرنگی نیز مشاهده شده است (Shinn et al., 1998). نيمه عمر

توانائی بالای فعاليت اين گروه از علف‌کش‌ها در خاک و جذب از طريق ریشه گياهان، هرچند مقوله‌ای بسيار مفيد برای کنترل علف‌های هرزی است که در طی فصل زراعی ظاهر مي‌شوند، ولی، پايدياری بقايای اين علف‌کش‌ها و متابوليت‌های آنها به فصول زراعی بعد مي‌تواند اثرات زیان‌آوری را بر گياهان زراعی حساس در تناوب‌های زراعی داشته باشد. اين مسئله در سال‌هایی که به علت کاهش درجه حرارت يا رطوبت خاک تجزیه اين علف‌کش‌ها کند مي‌شود، شدت مي‌يابد. پايدياری طولانی‌مدت اين علف‌کش‌ها در خاک مي‌تواند بر گياهان حساس از جمله کلزا و برخی از لگوم‌ها صدمه وارد نمايد. فاکتورهائی از جمله میزان رس و مواد آلی موجود در خاک، اسيدیته، جمعيت میکروبی و سيستم‌های شخم مي‌تواند بر رونشینی و تجزیه علف‌کش‌ها در خاک تأثير داشته باشد (Brown, 1990; Onofri, 1996). مطالعاتی که به طور دقيق رونشینی و تجزیه اين گروه از علف-کش‌ها را در خاک‌های کشور مورد بررسی قرار دهند و اثرات بقايای آنها را بر گياهان حساس در تناوب‌های مختلف مطالعه نمايد بسيار اندک است. علف‌کش‌های گروه سولفونیل‌اوره، یکی از اين گروه علف‌کش‌ها، اسيدهای ضعيفی هستند که در اکثر خاک‌های کشاورزی به صورت آنیون وجود دارند. در نتیجه، رونشینی اين علف‌کش‌ها به روی ذرات خاک ضعيف است. با افزايش اسيدیته خاک، به علت افزايش غلظت فرم آنیونی اين علف‌کش‌ها در محلول خاک، جذب اين گروه از علف‌کش‌ها کاهش مي‌يابد. مطالعات نشان داده است که تجزیه علف‌کش‌های سولفونیل‌اوره در خاک‌های قلیائی، سرد، خشک و دارای

روز برای ایمازاپیک^۲، و از ۶۰ تا ۳۶۰ روز برای ایمازتاپیر متفاوت باشد. پایداری نسبتاً بالای این علف کش‌ها 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 علف کش‌ها برای گیاهان زراعی در تناوب‌های زراعی ممکن است بالا باشد. در حال حاضر تحقیقاتی که پایداری علف کش‌های بازدارنده استولاکتات را در خاک‌ها و مناطق مختلف کشور بررسی و اثرات این علف کش‌ها را بر گیاهان حساس در تناوب‌های زراعی بررسی نماید وجود ندارد.

۵- نتیجه‌گیری و آینده تحقیقات پایداری علف کش‌ها در کشور:

با توجه به روند رو به رشد مصرف علف کش‌های بازدارنده سنتز استولاکتات و به خصوص سولفونیل اوره در کشور، و همچنین شرایط آب و هوایی (- کاهش بارندگی که عامل مهمی در افزایش پایداری این گروه از علف کش‌ها 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 علف کش‌ها داد و به مدیریت این جنبه بسیار مهم از علف کش‌ها پرداخت. مسئله دیگری که مشکلات بقایای این علف کش‌ها را در کشور ما تشدید می‌کند این است که این گروه از علف کش‌ها 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-

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

علف کش‌های خانواده ایمیدازولینون‌ها، گروه دیگری از علف کش‌های بازدارنده سنتز استولاکتات هستند که از این خانواده علف کش ایمازتاپیر در ایران برای کنترل علف‌های هرز یونجه به ثبت رسیده است. این گروه از علف کش‌ها با دز کم (۵۰ تا ۱۵۰ گرم در هکتار)، طیف وسیع از علف‌های هرز را کنترل می‌کنند. پایداری این گروه از علف کش‌ها در خاک نسبتاً بالا و به رطوبت خاک، اسیدیته، ماده آلی، و نوع خاک بستگی دارد. این فاکتورها قابلیت دسترسی علف کش‌ها را در محلول خاک تعیین می‌کنند و بر تجزیه آن که عمدتاً 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 علف کش‌ها نقش داشته باشد. بنابراین، مشخص شده است که پایداری این علف کش‌ها ممکن است از ۹۰ تا ۷۳۰ روز برای ایمازاپیر^۱، ۹۰

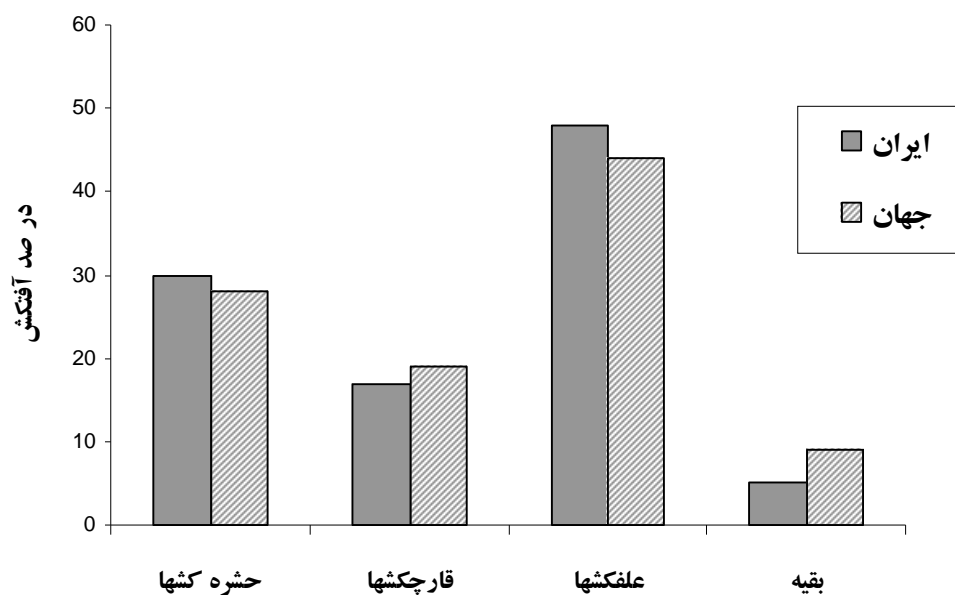
² Imazapic

¹ Imazapyr

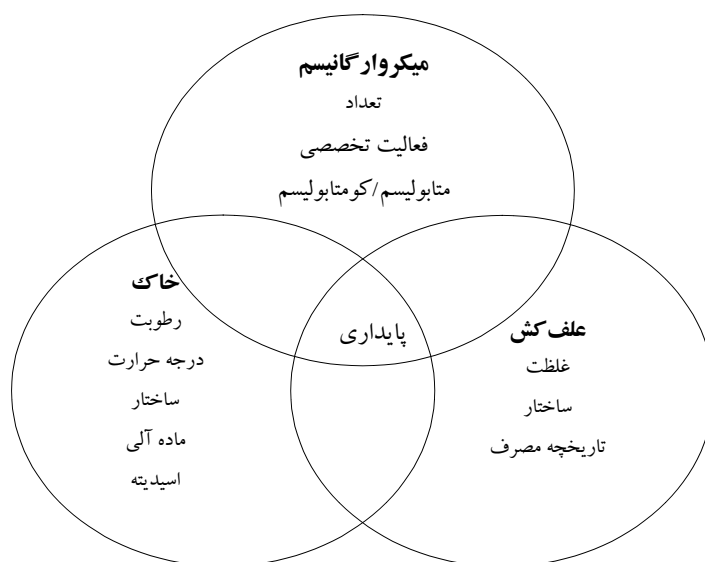
- تعیین فاصله زمانی بین مصرف هر یک از علف-کش‌ها تا کاشت گیاهان بعدی برای هر منطقه، سال-های مورد بررسی و نوع گیاه تناوبی مورد مطالعه؛
- تعیین حداقل غلظتی از علف‌کش‌های مورد بررسی که هیچ گونه اثر سوئی بر گیاهان زراعی کشت شده در تناوب ندارد؛
- تعیین غلظت علف‌کش‌های مورد آزمایش در زمان کاشت گیاه بعدی؛
-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

با توجه به شرایط جغرافیایی 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.

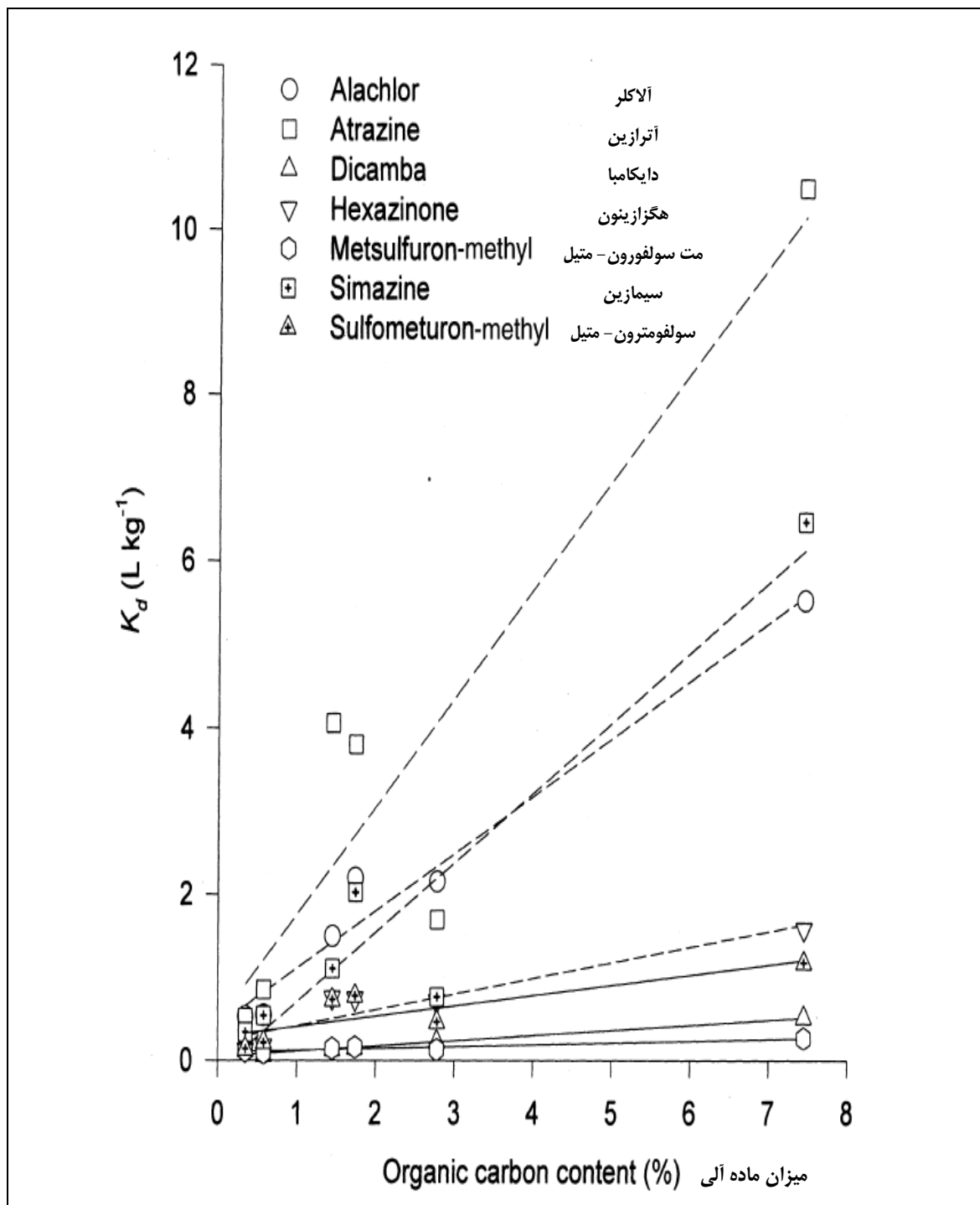
تواند منجر به مصرف مکرر علف‌کش‌های این گروه در سال‌های زراعی متوالی و یا حتی در یک فصل زراعی شود. مثال زیر می‌تواند به روشن‌تر شدن موضوع کمک نماید. برای مثال علف‌کش نیکوسولفورون (کروز) از گروه سولفونیل اوره‌ها برای کنترل علف‌های هرز مزارع ذرت مصرف می‌شود، در تناوب بعدی، که در بیشتر نقاط کشور گندم قرار می‌گیرد، علف‌کش سولفوسولفورون (آپروس) از گروه مشابه یعنی سولفونیل اوره مصرف می‌شود. تحقیقات زیادی در اغلب کشور-هائی که شرایط آب و هوایی 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 فوق‌الذکر 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:



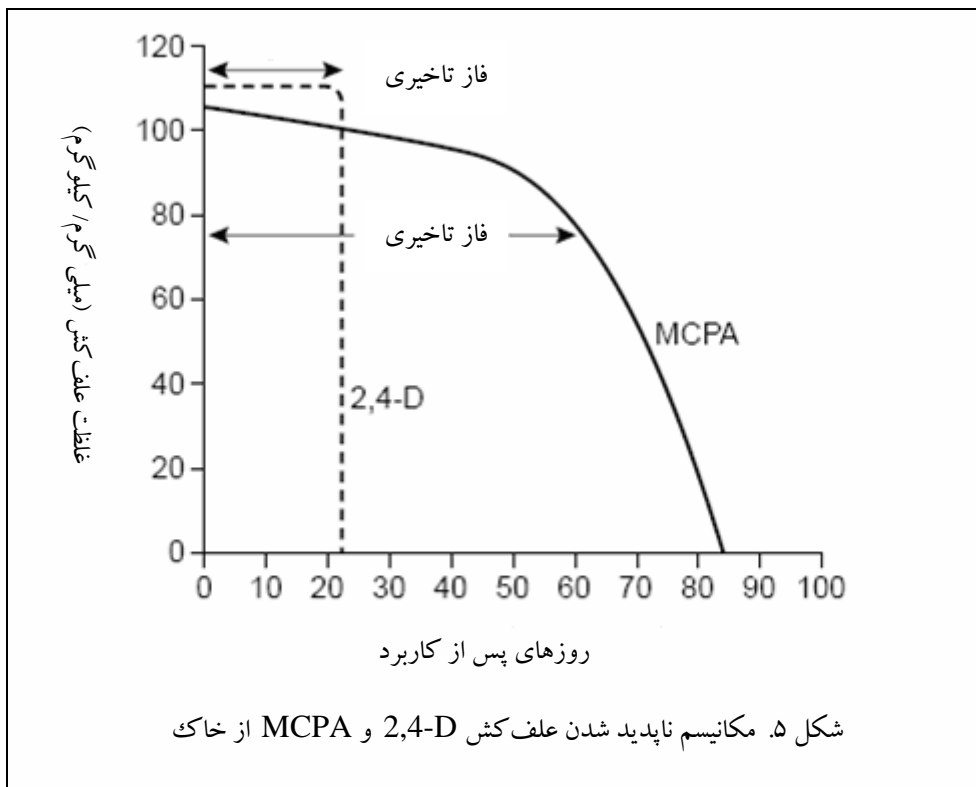
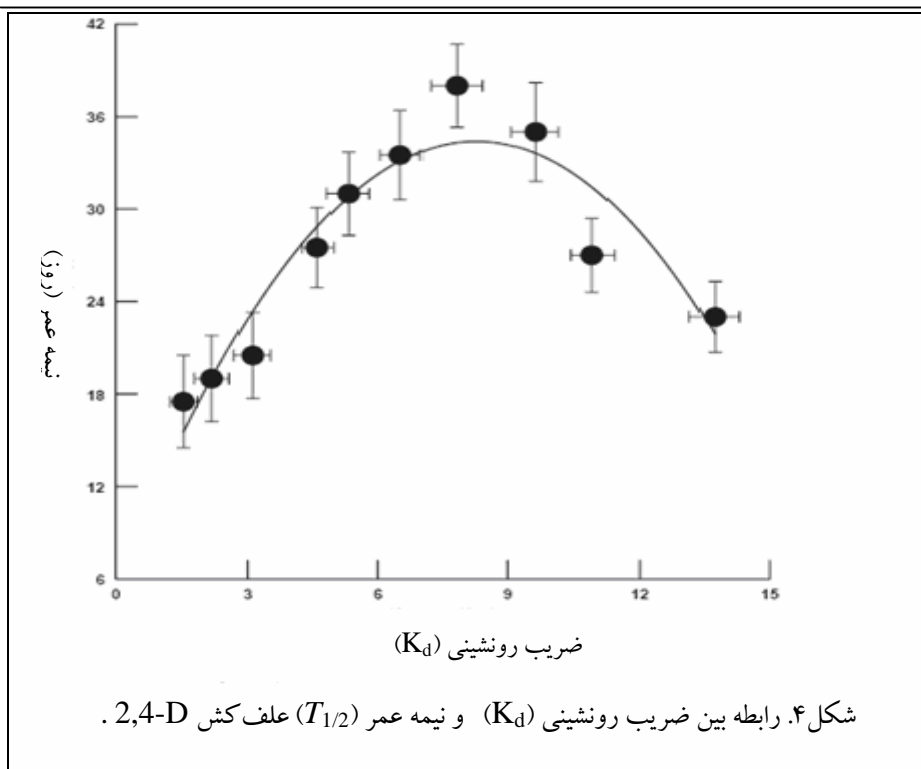
شکل ۱. مقایسه میزان مصرف آفت کشها (درصد) در ایران و جهان (Anonymous, 2008).

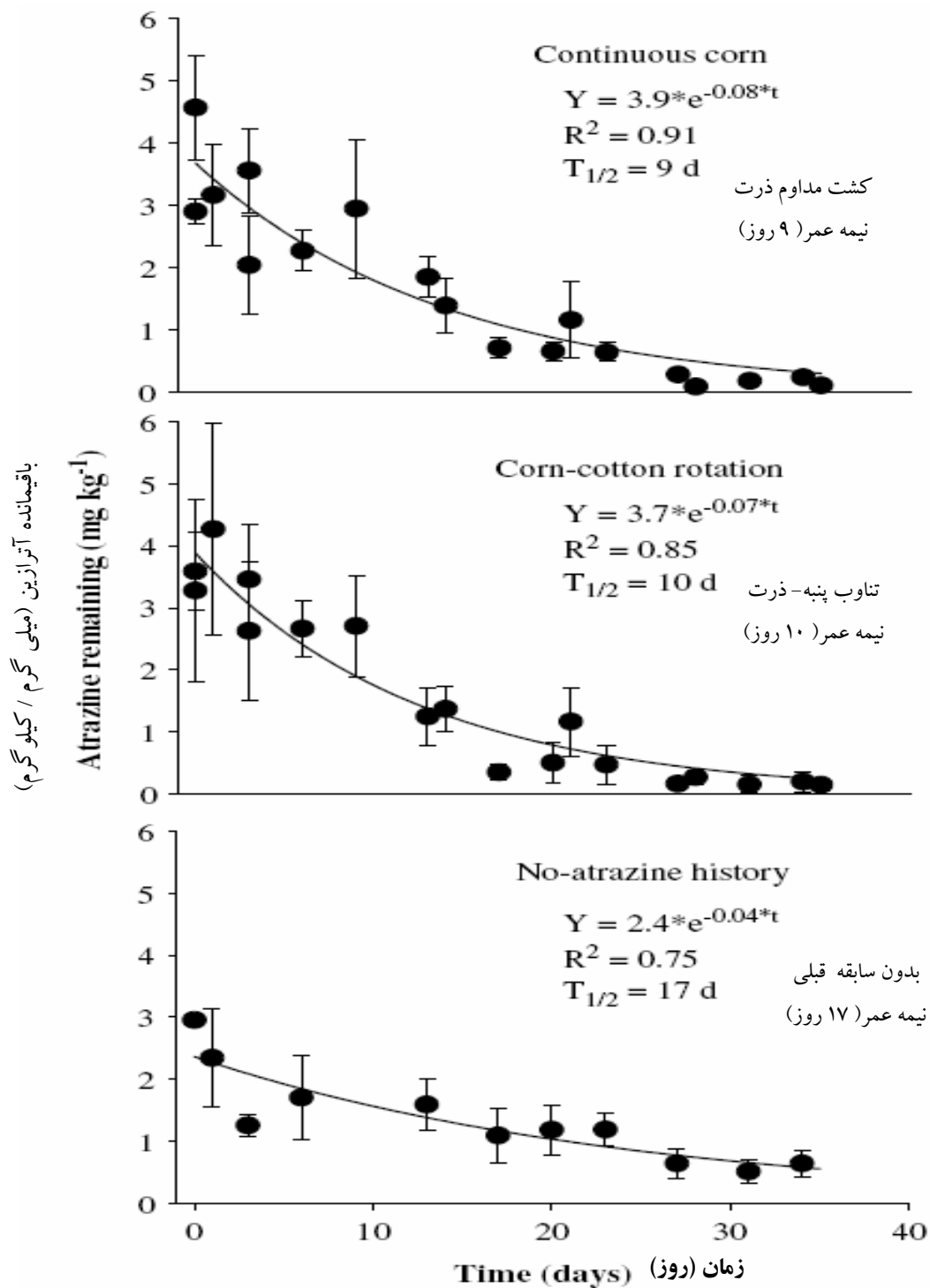


شکل ۲. فاکتورهای موثر بر پایداری یک علف کَش در خاک. فاکتورهای خاص مربوط به علف کَش، خاک و میکروارگانسیم های تجزیه کننده با هم در ارتباط متقابل هستند (Helling, 2005).

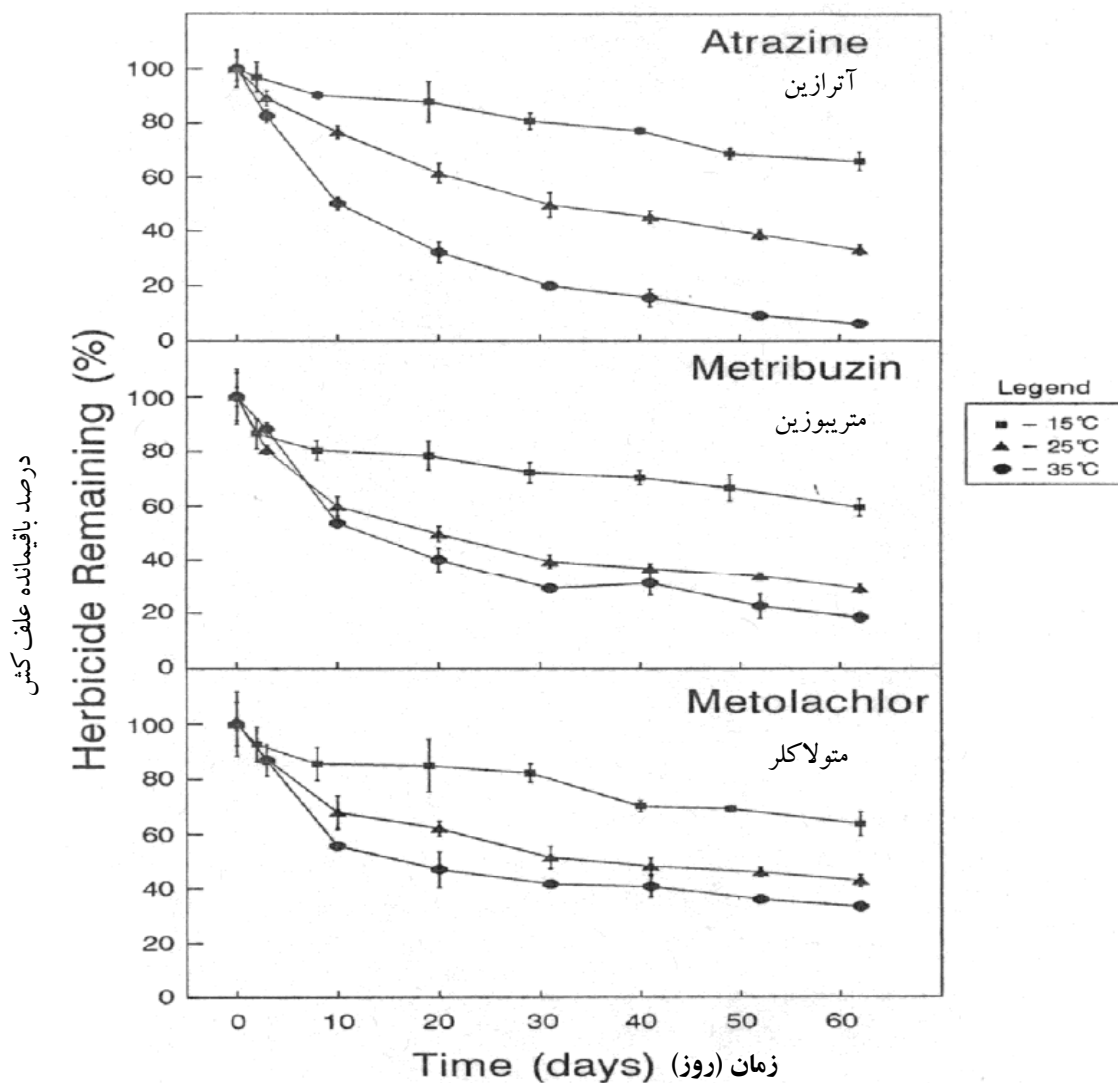


شکل ۳. رابطه بین ضرایب رونشینی (K_d) و میزان کربن آلی خاک برای علف‌کش‌های اسیدی، بازی یا خنثی (Oliveira et al., 2001).





شکل ۶. ائتلاف علف کش 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 علف کش های 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 canadienne 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 conditions correlates 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 canadienne 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, W.N., Reynolds, W.D., Khan, S.U.** 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.