فصلنامه تحقیقات نوین در گیاه‌پزشکی
دانشگاه آزاد اسلامی شیراز
۱۴۰۰ - ۱۰ (۲) : ۱۰۵-۱۲۱

مروری بر مدل‌های تداخل علف‌های هرز

(مقاله مروری)

رحمان خاکزاد [۱*]، مصطفی اویسی [۲]، رضا دیهیم فرد [۳]

(۱) آموزشکده کشاورزی ساری، دانشگاه فنی و حرفه ای، مازندران، ایران

(۲) گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

(۳) گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(*) rahman.khakzad@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

چکیده

علف‌های هرز به دلیل ماهیت پویا و انعطاف‌پذیرشان، معضلی همیشگی در تولید محصولات کشاورزی هستند. مدل‌های ریاضی ابزاری قابل توجه برای درک و پیش‌بینی تلفات عملکرد محصول ناشی از تداخل علف هرز-گیاه زراعی ارائه می‌دهند. مدل‌های رقابت علف هرز-گیاه زراعی به آگاهاندن تصمیمات مدیریتی علف‌های هرز هم به صورت کوتاه مدت برای مقابله با جمعیت علف‌های هرز موجود و هم در دراز مدت برای برنامه‌ریزی استراتژیهای مدیریت پایدار علف‌های هرز کمک می-کنند. بیشتر مطالعات مربوط به رقابت مبتنی بر مدل‌های تجربی هستند. توابع تجربی متداول‌ترین مدل‌هایی هستند که اطلاعاتی را برای مقادیر آستانه علف‌های هرز ارائه می‌دهند. محدودیت چنین مدل‌هایی این است که آنها بر مبنای توابع آماری هستند و معمولا بینش‌های بیولوژیکی را برای تداخل گیاه زراعی-علف هرز در نظر نمی‌گیرند. رقابت علف هرز-گیاه زراعی یک پدیده پیچیده است و برای درک این (پدیده)، یک مدل مکانیستیکی دقیق بینش بهتری نسبت به یک مدل تجربی ارائه می‌دهد. مدل‌های مکانیستیکی یا توضیحی تمام فرایندها یا مکانیسم‌های اساسی و وابستگی آنها به یکدیگر را با توجه به زمان و محرک‌های خارجی در نظر می گیرند. مدل‌های رقابت را می‌توان در چارچوبی از یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری ادغام کرد. در این بررسی، ما مدل‌های تجربی و مکانیستیکی را که در حال حاضر برای مطالعه تداخل گیاه زراعی-علف هرز استفاده می‌شوند، ارائه می دهیم.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، تلفات عملکرد، رقابت، مدل‌های تجربی، مدل‌های مکانیستیک.

مقدمه

علف‌های هرز یکی از محدودیت‌های عمده زیستی در سراسر جهان هستند. آنها گیاهان نامطلوبی هستند که با تولید گیاه زراعی و استفاده از منابع طبیعی تداخل دارند. تداخل بیانگر اثرات مستقیم و غیرمستقیمی است که دو گیاه مجاور بر یکدیگر تحمیل می‌کنند. علم علف‌های هرز به طور کلی شامل مطالعه رقابت و آللوپاتی (دگرآسیبی) به عنوان برهم‌کنش‌های اصلی گیاه زراعی-علف هرز هستند. کاهش باروری گیاه زراعی به گونه‌های علف هرز موجود، شدت و دوره آلودگی، قدرت گیاه زراعی و شرایط اقلیمی وابسته است. سالانه علف‌های هرز بیش از ۳۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی را سبب می‌شوند (Abouziena & Haggag, 2016) و علف-کش‌هایی به ارزش ۴۰ میلیارد دلار در مقیاس جهانی برای مدیریت علف‌های هرز استفاده می‌شوند (Gaba *et al*., 2016). با وجود اتخاذ اقدامات مختلف کنترل علف‌های هرز توسط کشاورزان، ۱۰ تا ۱۵ درصد افت عملکرد برآورد شده است (Abouziena &

Haggag, 2016). علاوه بر این تلفات عملکرد گیاه زراعی مربوط به علف‌های هرز در کشورهای توسعه یافته و توسعه نیافته به ترتیب ۵ و ۲۵ درصد تخمین زده می‌شود (Kansas State University, 2016).

رقابت و آللوپاتی دو عامل اصلی تداخل علف‌های هرز هستند. رقابت منابع، شکلی از تداخل فیزیکی است و زمانی رخ می‌دهد که تعدادی از گونه‌های گیاهی در حین استفاده از منابع مشترکی که ذخیره کوتاهی دارند، بر یکدیگر تاثیر منفی بگذارند. در آللوپاتی که یک تداخل شیمیایی است یک گونه گیاه زراعی یا علف هرز علی رغم وجود ذخیره ماده غذایی فراوان، مواد سمی یا بازدارنده رشد تولید می‌کند. اگر چه آللوپاتی علف‌های هرز در بسیاری از مطالعات نشان داده شده است، اما اثر این تداخل شیمیایی نسبت به رقابت جزئی بوده است. علاوه بر این تفکیک اثرات آللوپاتی از رقابت در مطالعات مزرعه‌ای ممکن است بسیار دشوار باشد (Bertholdsson, 2010). این دشواری در ارزیابی برهم‌کنش‌های آللوپاتیک منجر به تحقیقات مزرعه‌ای واقعی کمتر در مقایسه با مطالعات رقابت علف‌های هرز شده است که به تنهایی در بیشتر موارد به عنوان "تداخل علف‌های هرز" معرفی شده است.

درباره رقابت گیاه زراعی-علف هرز، دو اصل مهم باید ذکر شود: (۱) افراد (گونه‌های) تهاجمی‌تر معمولا در جامعه مخلوط علف‌های هرز و گیاهان زراعی غالب می‌شوند، (۲) اولین فرد (گونه‌ای) که منطقه خاصی را اشغال می‌کند نسبت به گونه‌های دیر واردشونده برتری دارد. اصل دوم در مدیریت عملی علف‌های هرز از اهمیت بیشتری برخوردار است که در آن عملیات زراعی همیشه قبل از قرارگیری علف‌های هرز بر روی استقرار سریع گیاه زراعی متمرکز شده است. به طور کلی علف‌های هرز با الگوی رشد مشابه با گیاهان زراعی رقبای جدی‌تری نسبت به گونه‌هایی با الگوی رشد متفاوت هستند (Mason & Spaner, 2006).

رقابت مزرعه‌ای علف هرز-گیاه زراعی همیشه در مراحل اولیه یک گیاه زراعی نسبت به مراحل بعد شدیدتر است. هجوم‌های اولیه علف هرز منجر به کاهش در میزان فتوسنتز گیاه زراعی می‌شود، لذا مزیت رشد نامتقارن گیاه زراعی را از بین می‌برد. این امر منجر به خفه شدن گیاه زراعی به دلیل رقابت و در نهایت کاهش عملکرد می‌شود. با این وجود یک دوره بحرانی رقابت[1] (CCP) وجود دارد که طی آن اثر علف‌های هرز بر عملکرد گیاه زراعی بالاترین است (یعنی کوتاهترین بازه زمانی طی رشد گیاه زراعی هنگامی که وجین منجر به بالاترین بازده اقتصادی می‌شود). بنابراین گیاه زراعی باید در شرایط عاری از علف هرز در طی CCP حفظ شود. تلاش برای ایجاد شرایط عاری از علف هرز در سراسر تاریخچه رشد و رویش گیاه زراعی (کل استحصال گیاه زراعی) ممکن است مستلزم هزینه اضافی غیرضروری بدون افزایش معادل در عملکرد باشد. همواره یک محصول ۱۰۰ روزه باید برای ۳۵ روز اول کاشت، عاری از علف هرز نگهداری شود. گیاه زراعی می‌تواند عمدتا از طریق سایه‌اندازی به طور موفقیت‌آمیزی با علف‌های هرز دیررویش رقابت کند، اگرچه این علف‌های هرز دیررویش قطعات تکثیری تولید خواهند کرد که باعث افزایش بانک بذر خاک می‌شوند. به طور کلی شدت رقابت علف هرز-گیاه زراعی در محصولاتی با سرعت رشد آهسته (یعنی ۶ تا ۸ هفته پس از کاشت) مانند آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، پنبه (*Gossypium arboreum* L.) و نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) شدیدتر است (Hyvonen & Ramula, 2014).

کاهش عملکرد یک متغیر کاملا پذیرفته شده برای کمی‌سازی رقابت گیاه زراعی- علف هرز است. رابطه بین عملکرد گیاه زراعی و تراکم علف هرز به وضوح غیرخطی [به طور کلی یک مدل هذلولی یا سایر توابع غیرخطی (به عنوان مثال نمایی)] است، لذا افزایش تراکم علف هرز منجر به کاهش عملکرد می شود. علاوه بر این علف‌های هرز در برداشت گیاه زراعی تداخل ایجاد می‌کنند و به عنوان مخزنی از آفات و بیماریهای گیاهی عمل می‌کنند. در این بررسی، مدل‌های تجربی و مکانیستیکی برای مطالعه تداخل گیاه زراعی-علف هرز مورد بحث قرار می گیرند.

1- Critical competition period (CCP)

عوامل مؤثر بر رقابت علف هرز-گیاه زراعی

رقابت می‌تواند بین گونه‌ای (در میان علف هرز و گیاه زراعی) یا درون گونه‌ای (درون همان گونه) باشد، در حالی که مشخصه ارتباط گیاه زراعی-علف هرز، نتیجه نهایی رقابت است (Tominaga & Yamasue, 2004). ماهیت نامتعادل رقابت گیاه زراعی- علف هرز را می‌توان به منظور حمایت از گیاهان زراعی با اصلاح شرایط خاکی و زراعی دستکاری نمود. ارتباط علف هرز با یک گیاه زراعی خاص ممکن است به دلیل یک محیط سازگار [مانند کاسنی (*Cichorium intybus* L.) در شبدر مصری یا برسیم (*Trifolium alexandrinum* L.)]، شباهت‌های مورفولوژیکی [مانند علف خونی (*Phalaris minor* L.) در گندم (*Triticum aestivum* L.)]، رفتار ریزش بذر [مانند پنیرک (*Malva neglecta* L.) در بذور گندم]، فلاش‌های جوانه‌زنی یا رویش (مانند علف خونی در گندم]، استفاده از علف‌کش‌هایی با مکانیسم عمل یکسان [مانند تسلط سزولیا (*Caesulia axillaris* Roxb.) بر برنج (*Oryza sativa* L.) به دلیل کاربردهای مکرر علف‌کش آنیلوفوس] باشد (Walia, 2010).

طبق یک قاعده کلی، رقابت تا زمانی که گیاه زراعی بیش از ۸۰ درصد سطح زمین را پوشش دهد ادامه دارد (Rasmussen, 1992). توانایی رقابتی گیاهان زراعی به عوامل متعددی وابسته است از جمله: (۱) نوع گیاه زراعی و انتخاب رقم (واریته)، تاریخ کاشت، فاصله ردیف و سیستم‌های خاک‌ورزی، (۲) تراکم (فراوانی) و ترکیب علف هرز، (۳) عوامل اقلیمی خاکی (نوع خاک، شرایط محیطی) و (۴) سناریوهای تناوب گیاه زراعی.

تراکم گیاه زراعی و یکنواختی فضایی

هم تراکم گیاه زراعی و هم یکنواختی فضایی بر نیچ (آشیان) اکولوژیکی علف‌های هرز تاثیر می‌گذارند. همانطور که تراکم گیاه زراعی افزایش می‌یابد، متناسب با آن رشد علف هرز کاهش می‌یابد، اگرچه تراکم‌های بسیار بالای گیاه زراعی ممکن است منجر به رقابت بین گونه‌ای شود (Bleasdale & Nelder, 1960). یک گیاه زراعی کاشته شده در فاصله ردیف پهن منجر به رشد متراکم علف‌های هرز و رقابت بین و درون گونه‌ای می‌شود (Chauhan & Johnson, 2010)، در حالی که یک گیاه زراعی رشد یافته در کاشت مربع برای کاهش رقابت درون گونه‌ای ایده‌آل است (Hashem *et al*., 1998).

تراکم و ترکیب علف هرز

تراکم علف هرز بر طول دوره بحرانی رقابت تاثیر می‌گذارد، در حالی که زمان‌بندی رویش علف هرز نسبت به گیاه زراعی، آستانه‌های تراکم را تعیین می کند (Dunan *et al*., 1995). معماری گونه علف هرز و عادت رشدی (به عنوان مثال باریک برگ‌ها، پهن برگ‌ها یا جگن‌ها) نیز روابط رقابتی علف هرز-گیاه زراعی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. تنوع علف‌های هرز اثر متغیری بر عملکرد گیاه زراعی دارد و این تفاوت ممکن است به دلیل سازگاریهای متنوع اکولوژیکی علف هرز باشد که در طول زمان به دست آمده‌اند. به عنوان مثال علف‌های هرز یک ساله که سرعت توسعه سطح برگ بالایی نشان می‌دهند [به عنوان مثال سوروف (*Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv.) در برنج و ارزن وحشی (*Setaria viridis* L.) در ذرت (*Zea mays* L.)] تا حد زیادی رقابت علف هرز-گیاه زراعی را تحت تاثیر قرار می‌دهند که باعث کاهش قابل توجه عملکرد گیاه زراعی می‌شوند. توق (*Xanthium strumarium* L.) و خردل وحشی (*Sinapis* spp.) به دلیل توانایی‌شان برای پوشش سریع خاک، رقبای بهتری نسبت به باریک برگ‌ها در مراحل اولیه رشد هستند. همچنین خردل وحشی پس از ۳ هفته از رویش، سیستم ریشه‌ای گسترده‌تری نسبت به گونه‌های باریک برگ ایجاد می‌کند (Snapp *et al*., 2005). بسیاری از علف های هرز چند ساله دارای سیستم ریشه‌ای عمیق هستند که از لایه‌های عمیق خاک تغذیه می‌کنند [به عنوان مثال قیاق (*Sorghum halepense* L.)، تلخه (*Acroptilon repens* L.)]. در مناطق خشک علف‌های هرز چند ساله نسبت به یک ساله‌ها رقابتی‌تر هستند (Liebman *et al*., 2004).

انواع گیاهان زراعی و ارقام آنها

تخمین زده شده است که استفاده از گونه‌های (یا ارقام) گیاهان زراعی قوی می‌تواند هزینه‌های مربوط به مدیریت علف‌های هرز را تا ۳۰ درصد کاهش دهد (Snapp *et al*., 2005). برخی گیاهان زراعی مانند سورگوم (*Sorghum bicolor* L. Moench)، ذرت، ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br) و نخود (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) توانایی رشد سریع و پوشش سریع خاک را دارند که نشان‌دهنده تحمل به رقابت با علف هرز است. از طرف دیگر محصولاتی مانند نیشکر، پنبه و آفتابگردان رشد اولیه آهسته‌ای دارند که نیازمند به زمان طولانی‌تری برای پوشش سطح خاک می‌باشند.

انتخاب یک واریته زراعی معین به سازگاری آن با شرایط اقلیمی محلی و مدیریتی بستگی دارد. جو (*Hordeum vulgare* L.) در مقایسه با سایر محصولات غلات مانند چاودار، گندم و یولاف توانایی رقابتی بالاتری در برابر علف‌های هرز دارد. چنین توانایی رقابتی بالایی به توسعه سیستم ریشه‌ای گسترده عمیق در عرض ۳ هفته پس از کاشت نسبت داده شده است. گیاهان زراعی به دلیل تفاوت‌هایی در بنیه محصول از نظر توانایی رقابتی‌شان متفاوت هستند (Mohler, 2004). محصولات (یا واریته‌های) تشکیل‌دهنده تاج پوشش سریع معمولا "فشار علف هرز" کمتری نسبت به محصولات قد کوتاه با رشد آهسته دارند. محصولات (یا واریته‌های) قد کوتاه نسبت به انواع بلندتر معمولا به رقابت با علف هرز حساس‌تر هستند، بنابراین فقط در صورت استفاده از مدیریت شیمیایی علف هرز، واریته-های قد کوتاه و پر محصول عملکرد بهتری دارند (Saito *et al*., 2010).

شرایط اقلیمی خاکی

بافت خاک، pH، حاصل‌خیزی و رطوبت، رقابت گیاه زراعی-علف هرز را با اثر هم بر قدرت گیاهان زراعی و هم علف‌های هرز تحت تاثیر قرار می دهند. خاک‌های حاصل خیز معمولا برای رشد علف‌های هرز مناسب هستند، لذا عملکرد گیاه زراعی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال پوشش گیاهی (زیست توده) و تولید بذر در علف هرز گرومول مزرعه‌ای (*Buglossoides arvensis* L.) در خاک‌های غنی شده با ازت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (Bischoff & Mahn, 2000). لذا اقدامات کنترل علف‌های هرز برای به حداقل رساندن فشار علف‌های هرز باید بسیار کارآمد باشند. واکنش نوع خاک نیز عامل مهمی است که رقابت علف هرز-گیاه زراعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور کلی pH تقریبا ۷ برای رشد گیاه زراعی مناسب است، در حالی که خاک‌های اسیدی یا قلیایی بر گیاهان زراعی مستقر اثر منفی می‌گذارند، لذا فشار علف‌های هرز افزایش می‌یابد. برخی از گونه‌ها مانند ترشک (*Rumex acetosella* L.) مخصوص خاک‌های اسیدی هستند، در حالی که گونه‌های دیگر مانند گل قاصدک (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.) در خاک‌هایی با واکنش قلیایی به وفور یافت می‌شوند (Tominaga & Yamasue, 2004). روابط آب و خاک به ویژه مقدار بارندگی و توزیع آن، رقابت علف هرز-گیاه زراعی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. علف‌های هرز نسبت به گیاهان زراعی به تنش رطوبت (هم خشکی و هم آب گرفتگی) سازگارتر هستند. زمان آبیاری نیز ممکن است بر تعادل علف هرز-گیاه زراعی تاثیر بگذارد، زیرا هنگامی که یک "محصول پر از علف هرز" آبیاری می‌شود، علف‌های هرز بیشتر سود می‌برند. از آنجا که توانایی ذاتی گیاهان زراعی برای رقابت در برابر علف‌های هرز توسط تنش‌های اقلیمی و خاکی تضعیف می‌شود (Mohler, 2004)، می‌توان عملیات مختلف مزرعه را به گونه‌ای تنظیم کرد تا رشد علف‌های هرز سرکوب شود.

عملیات زراعی

زمان کاشت گیاه زراعی، میزان بذر، فاصله ردیف، کوددهی و مدیریت آب بر رقابت علف هرز-گیاه زراعی تاثیر می‌گذارند (Swanton *et al*., 2015). در مورد زمان کاشت، اگر گیاه زراعی قبل یا بعد از زمان توصیه شده برای رشد مطلوب کاشته شود، رقابت علف هرز-گیاه زراعی بالاتر خواهد بود (Walia, 2010). کاشت زود گندم به دلیل استقرار زودهنگام گیاه زراعی، رقابت کمتری را از هجوم علف

خونی متحمل می‌شود (Mehra & Gill, 1988). در زمان مناسب کاشت، گیاه زراعی قدرت کافی به دست می‌آورد، لذا نسبت به علف‌های هرز رقابتی‌تر می شود. به طور مشابه اگر استقرار اولیه خوب گیاه زراعی حاصل شود، توانایی رقابتی گیاه زراعی افزایش خواهد یافت.

زمان رویش علف هرز نسبت به گیاه زراعی مهم‌ترین متغیر برای تصمیم‌گیری در مورد اثر رقابت علف هرز-گیاه زراعی است (Kropff & Spitters, 1991). اگر اولین فلاش رویش علف هرز همراه با رویش گیاه زراعی رخ دهد، در آن هنگام رقابت شدید علف هرز-گیاه زراعی قابل انتظار است. سطوح آستانه تاج خروس ریشه قرمز (*Amaranthus retroflexus* L.) و سوروف در محصولات ذرت، سویا و لوبیا برای علف‌های هرزی که با گیاهان زراعی رویش می‌یابند دو تا ده برابر کمتر از علف‌های هرزی هستند که ۳ تا ۴ هفته پس از گیاه زراعی رویش می‌یابند (Dieleman *et al*., 1996). روش خاک‌ورزی، تکرار و عمق کشت می‌تواند استقرار و رشد علف‌های هرز را تحت تاثیر قرار دهند (Pekrun & Claupein, 2004; Chauhan & Johnson, 2009). برای مثال شخم با گاوآهن برگردان دار ممکن است بذور علف‌های هرز دفن شده را به سطح خاک بیاورد، لذا بر توزیع بانک بذر و ترکیب علف‌های هرز تاثیر می‌گذارد. شخم عمیق در ماه‌های تابستان نیز ممکن است برای کنترل چندساله‌هایی با ریشه عمیق مانند نیشکر وحشی (*Saccharum spontaneum* L.) و اویارسلام ارغوانی (*Cyperus rotundus* L.) مفید باشد (Barberi, 2002). در سیستم‌های بدون خاک‌ورزی از گیاهان پوششی برای کنترل علف‌های هرز استفاده می‌شود (Price & Norsworthy, 2013).

علاوه بر این تناوب‌های زراعی و همچنین محصولات متناوب ردیفی و پخش شونده می‌توانند در کاهش رقابت علف هرز-گیاه زراعی مفید باشند. با پیروی از یک تناوب زراعی می‌توان توانایی رقابتی گیاهان زراعی را افزایش و علف‌های هرز را کاهش داد. برای مثال هجوم علف خونی در گندم را می‌توان با تناوب برنج-گندم با برنج-شبدر برسیم (*Trifolium alexandrinum* L.) کاهش داد (Malik & Singh, 1995). به علاوه این روش با کاهش سایر علف‌های هرز در موفقیت سال بعد از محصول گندم کمک خواهد کرد.

انواع مختلفی از مدل‌ها برای پیش‌بینی رقابت گیاه زراعی-علف هرز استفاده شده است. روش مورد استفاده در برخی از مدل‌ها، تجربی است، در حالی که سایر مدل‌ها براساس فرایندهای مکانیستیکی هستند. مدل‌های تجربی ممکن است به پیش‌بینی افت عملکرد گیاه زراعی در پاسخ به تراکم (زیست توده) متغیر علف هرز در شرایط محیطی خاص کمک کنند. برعکس مدل‌های مکانیستیکی ممکن است برای درک فرایندهای زیست-اکوفیزیولوژیکی و همچنین اهداف پیش‌بینی مفید باشند.

اصول مدل‌سازی تجربی رقابت

مدل‌های تجربی رقابت گیاه زراعی-علف هرز از مطالعات زراعی شامل گونه‌های گیاهان زراعی و علف‌های هرز در طرح‌های مختلف آزمایشی مشتق می‌شوند. مهم‌ترین طرح‌های مورد استفاده برای مطالعه رقابت، مخلوطی از سری‌های افزایشی و جانشینی است (Gibson *et al*., 1999; Freckleton & Watkinson, 2000; Swanton *et al*., 2015). سری جانشینی شامل دو گونه است که در نسبت‌های مختلف رشد می‌کنند، در حالی که تراکم پایه ثابت کل را حفظ می‌کنند (De Wit, 1960). سری جانشینی به دلیل وابستگی آن به تراکم پایه کل (Connolly, 1986) و عدم موفقیت در تمایز اثرات رقابت درون و بین گونه‌ای (Watkinson & Freckleton, 1997) روش مطلوبی نیست. در سری افزایشی، هم جمعیت و هم نسبت گونه‌های گیاه زراعی و علف هرز در مخلوط‌ها متغیر است. در آزمایش های مزرعه‌ای، تراکم گونه‌های گیاه زراعی ثابت نگه داشته می‌شود، در حالی که تراکم علف هرز متغیر است. یک طرح افزایشی کامل هنگامی که با استفاده از یک مدل رگرسیون دو گونه‌ای تجزیه و تحلیل می‌شود ممکن است هم در برآورد رقابت درون و هم بین گونه‌ای کمک کند (Park *et al*., 2002).

مدل‌های تک گونه‌ای که به طور معمول استفاده شده است را می‌توان برای مطالعه دو یا چند گونه با استفاده از رابطه زیر (معادله ۱) گسترش داد:

معادله (۱) $$w_i w_{m,i}\left(1+\sum a_{ij}N_j\right)^{-b}$$

که در آن w واحد عملکرد گیاه، w_m عملکرد یک گیاه ایزوله (منفرد)، a نشان‌دهنده اثرات سرانه رقابت درون (a_{ii}) و بین گونه‌ای (a_{ij}) است (Watkinson, 1985)، b پارامتری است که رابطه عملکرد-تراکم را تعیین می‌کند (b>1 نشان‌دهنده چرخش فوقانی، b≈1 نشان-دهنده مجانب، b<1 نشان‌دهنده افزایش یکنواخت است) و i و j گونه‌ها هستند.

یکی از این مطالعات مقدماتی، افت عملکرد گیاه زراعی به دلیل رقابت علف هرز را با مدل هذلولی توصیف کرده است (Cousens, 1985).

یک روش جایگزین برای مطالعه رقابت، روش مجاورت است (Mack & Harper, 1977). این روش شامل ارزیابی عملکرد یک گونه هدف در رابطه با تراکم گونه مجاور در مجاورت است. روش مذکور فرض می‌کند که تولید گیاهان هدف به تعداد، زیست توده و مجاورت گیاهان مجاور مرتبط است. بنابراین چنین مدل‌هایی علاوه بر تراکم افراد (بوته‌های) گونه‌های علف هرز، یک آرایش فضایی را تشکیل می‌دهند، با این حال چنین طرح‌هایی ممکن است به دلیل نیازهای گسترده به داده‌ها، منابع فشرده‌ای باشند. این روش برای زمینه کمی‌سازی رقابت در مطالعات کشاورزی اندکی مورد استفاده قرار گرفته است.

اصول مدل‌سازی مکانیستیکی رقابت

مدل‌های موجود رشد گیاه زراعی شامل گونه‌های علف هرز تغییر یافتند. مدل‌ها برای شبیه‌سازی رشد گیاه زراعی و علف هرز در دو سناریوی تولیدی مجزا استفاده می‌شوند. اولین مورد سناریوی تولید بالقوه است که در آن یک گیاه زراعی در یک محیط عاری از تنش رشد می‌کند و رشد گیاه زراعی کاملا توسط عوامل خاکی، اقلیمی و زراعی با ورودی‌های عرضه شده در مقادیر وسیع تعیین می‌شود. سرعت جذب آنی CO_2 تاج پوشش اندازه‌گیری می‌شود و نرخ رشد روزانه پس از کسر هزینه‌های تنفس به دست می‌آید. در مورد دوم گیاه زراعی از تنش آبی رنج می‌برد. این اثر با استفاده از تعادل آب خاک در مدل شبیه‌سازی می‌شود. سرعت جذب بالقوه CO_2 در صورت کمبود آب کاهش خواهد یافت. توسعه سطح برگ تحت تاثیر دما با استفاده از نرخ رشد نسبی و سطح ویژه برگ شبیه‌سازی می‌شود. توزیع نسبی تابش بر روی گونه‌ها نیز شبیه‌سازی شده و تعرق بالقوه اندازه‌گیری می‌شود. کاهش رشد گیاه براساس تعرق بالقوه و ظرفیت رطوبت خاک برای هر دو گونه (گیاه زراعی و علف هرز) به طور جداگانه محاسبه می‌شود (Davis & Ainsworth, 2012).

مدل‌های رشد علف‌های هرز

یکی از جامع‌ترین مدل‌های رشد علف‌های هرز از رقابت گیاه زراعی-علف هرز، INTERCOM (Kropff & Spitters, 1992; Kropff & Van Laar, 1993) است که براساس کار قبلی انجام شده بر رو شبیه‌سازی مدل‌سازی رشد گیاه زراعی (Spitters *et al*., 1989) و رقابت (Spitters, 1989) می‌باشد. رشد هر گونه از روز ۱ اندازه گیری شده و در سطح جمعیت که به کیلوگرم در هکتار است بیان می‌شود و تا بلوغ اندازه گیری می‌گردد. رهگیری نور و توزیع منابع در میان گونه‌های رقیب روش اصلی مورد استفاده در این مدل است. INTERCOM بر روی مکان‌ها، محصولات مختلف، گونه‌های علف هرز، رقابت گیاه زراعی-علف هرز و شرایط متضاد اقلیمی به طور موفقیت‌آمیزی کالیبره و اعتبارسنجی شده است. هر چند Kropff *et al*. (1993) مشاهده کردند که در یک سال به شدت خشک، تلفات عملکرد در ذرت به دلیل سوروف کم اهمیت پنداشته شده بود. این مدل اثرات تنش آبی بر توسعه مورفولوژیکی گیاه زراعی، به ویژه طویل شدن ساقه را در نظر نگرفت.

مدل مکانیستیکی دیگر SOYWEED است که توسط Wilkerson et al. (1990) توسعه یافته است که از مدل رشد گیاه زراعی SOYGRO (Jones *et al*., 1987) مشتق شده است و رقابت سویا [*Glycine max* (L.) Merr.] و توق (*Xanthium strumarium* L.) را

برای نور و آب شبیه‌سازی می‌کند. ناهمگنی در توزیع سطح برگ در اولین نسخه از مدل SOYWEED در نظر گرفته شده بود و متغیرهای ارتفاع گیاه زراعی و علف هرز وجود نداشتند. SOYWEED همچنین تولید بذر علف هرز را شبیه‌سازی نمی‌کند. بعدها یک مدل فرعی دیگر (LTCOMP) توسط Wiles & Wilkerson (1991) درون مدل SOYWEED گنجانده شد که رقابت برای نور را در نظر می‌گیرد. شبیه‌سازی رهگیری نور به عنوان تابعی از ارتفاع، سطح برگ و ضریب انقراض گونه‌های زراعی و علف هرز انجام شد. این مدل (LTCOMP-SOYWEED)، رشد ترکیبی گیاهان زراعی و علف‌های هرز را با اثربخشی بهبود یافته شبیه‌سازی کرده است.

مدل دیگر ALMANAC است که رقابت برای نور، آب و مواد غذایی (N و P) بین دوگونه گیاهی را شبیه‌سازی می‌کند (Kiniry *et al*., 1992). این مدل برای دو گونه رقیب قیاق و دم روباهی غول آسا (*Setaria faberi* Herrm.) در سویا و گندم توسعه یافت، پارامتر شد و ارزیابی گردید. در عمل این مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی تداخل علف هرز-گیاه زراعی همراه با کاربردهای متنوع دیگرش از جمله مدل‌سازی هیدرولوژی، تغییر اقلیم، فرسایش، پویایی جامعه گیاهی، کربن خاک، سرنوشت آفت‌کش‌ها و مطالعات چرخه‌ای و فنولوژی مورد استفاده قرار گیرد.

مدل NTRM-MSC (نیتروژن، خاک‌ورزی، مدیریت بقایا-رقابت چند گونه‌ای) توسعه یافته توسط Bail & Shaffer (1993)، رقابت بین حداقل ده گونه گیاهی را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل رهگیری نور، آب خاک، پویایی نیتروژن و رقابت برای این منابع توسط گونه‌های رقیب را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل برای رقابت ذرت و تاج خروس ریشه قرمز پارامتر شده است و توسعه سطح برگ و زیست توده هر گونه در یک مخلوط را شبیه‌سازی می‌کند. با این حال مدل انعطاف‌پذیری مورفولوژیکی علف‌های هرز رشد یافته در تک کشتی و مخلوط را در نظر نگرفت و نیز رهگیری نور توسط علف‌های هرز در تک کشتی را کم اهمیت پنداشت.

یک مدل رشد گیاه زراعی برای برنج توسط Graf *et al*. (1990a) ایجاد شده بود و به منظور شبیه‌سازی رقابت گیاه زراعی-علف هرز برای نور و نیتروژن در حضور چندین گونه علف هرز توسعه یافت (Graf *et al*., 1990b). گونه‌های علف‌های هرز براساس ارتفاع، شکل برگ، فرم و فنولوژی رشد گروه‌بندی شدند. مدل رقابت توسعه یافته توسط Spitters & Aerts (1983) برای شبیه‌سازی رقابت برای نور استفاده شده بود. نسبت پروفیل خاک مورد بهره‌برداری قرار گرفته توسط گیاه زراعی و هر یک از گروه‌های علف‌های هرز برای شبیه‌سازی رقابت برای نیتروژن استفاده شد. این مدل بعدها توسط Graf & Hill (1992) برای رقابت بین سوروف و برنج پارامترسازی و اعتبارسنجی شد و اثر تراکم‌های گیاه زراعی و علف هرز بر عملکرد برنج شبیه.سازی شد. Lotz *et al*. (1990) از مدل مشابهی برای توصیف رقابت بین گندم و علف‌های هرز برای نور و آب استفاده کردند.

مدل های افت عملکرد

برای اقتصادی بودن تصمیم‌گیری در مدیریت علف‌های هرز، آگاهی از چگونگی اثر علف‌های هرز کنترل نشده بر عملکرد گیاه زراعی مورد نیاز است. بنابراین مدل‌های رقابت بخش جدایی‌ناپذیر در ارزیابی سودبخشی مدیریت علف‌های هرز هستند. بیشتر مدل‌های توسعه یافته ماهیتی تجربی دارند. مدل‌های رقابت علف هرز-گیاه زراعی بر اصول دقیق زیست شناختی توسعه یافته‌اند که نکات زیر را در نظر می‌گیرند:

۱- هنگامی که علف‌های هرز یک به یک به محصول استقرار یافته اضافه می‌شوند، هر بوته علف هرز ممکن است یک اثر رقابتی داشته باشد که می‌تواند با افت عملکرد محصول اندازه‌گیری شود. در تراکم پایین، اثر رقابت می‌تواند افزایشی باشد، زیرا رقابت درون گونه‌ای کم است یا وجود ندارد.

۲- افت عملکرد هرگز نمی‌تواند بیش از ۱۰۰ درصد باشد و می‌توان انتظار داشت که با افزایش تراکم علف هرز، افت عملکرد ممکن است به یک حد بالایی معین نزدیک شود.

۳- در تراکم‌های بالا، فاصله بین بوته‌های علف هرز کمتر خواهد بود و در نتیجه آنها به دلیل رقابت درون گونه‌ای شروع به تداخل با یکدیگر می‌کنند. این ممکن است منجر به کاهش در اثری شود که هر بوته علف هرز بر عملکرد گیاه زراعی ایجاد خواهد کرد.

در مدل‌سازی رقابت گیاه زراعی-علف هرز، مدل هذلولی راست گوشه (شکل ۱) رابطه بین افت عملکرد گیاه زراعی و تراکم علف هرز (یا زیست توده) را بدون در نظر گرفتن گونه‌های علف هرز، گیاه زراعی و مکان بهتر تعیین می‌کند (Cousens, 1985). چنین مدل‌هایی توضیح خوبی از داده‌ها برای انواع علف‌های هرز در محصولات مختلف ارائه می‌دهند و به راحتی می‌توان آنها را از نظر زراعی و زیست شناختی تفسیر کرد. از آنجا که ما فقط می‌توانیم عملکرد را اندازه‌گیری کنیم و افت عملکرد را نمی‌توان به طور مستقیم مشاهده کرد، چنین مدل‌های هذلولی باید طراحی شوند تا قادر باشند در مورد عملکرد توضیح دهند. حتی اگر طرح‌های آزمایشی حاوی کرت‌های عاری از علف هرز برای مشاهده تلفات عملکرد باشند، مشاهدات در این کرت‌ها نیز مانند هر مشاهده دیگر در معرض خطا هستند. مدل Cousens (1985) عملکرد محصول در واحد سطح (Y) را به عنوان تابعی منفی از تراکم علف هرز در واحد سطح (N_{weed}) توصیف می‌کند (معادله ۲):

$$Y = Y_{wf}[1 - (I.N_{weed})/(1 + I.N_{weed}/A)] \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن Y_{wf} نشان دهنده عملکرد گیاه زراعی تحت شرایط عاری از علف هرز، پارامتر A نشان دهنده حد بالای افت عملکرد گیاه زراعی متناسب با نزدیک شدن تراکم علف هرز به بی نهایت است، در حالی که پارامتر I می‌تواند به عنوان شیب اولیه منحنی یعنی مقدار نسبی افت عملکرد منتسب به یک علف هرز منفرد در واحد سطح به عنوان تراکم علف هرز نزدیک شونده به صفر در نظر گرفته شود.

معادلات مشابه دیگری برای هذلولی راست گوشه در منابع وجود دارند که ممکن است رابطه افزایش افت عملکرد گیاه زراعی را با افزایش تراکم علف هرز تعریف کنند. افت عملکرد گیاه زراعی به عنوان تابعی از جمعیت علف هرز را می‌توان با استفاده از فرمول ساده زیر که از یک هذلولی افزایشی (هایپربولیک فزاینده) پیروی می‌کند نشان داد (معادله ۳):

$$YL = UYL.N_{weed}/(N_{50}YL + N_{weed}) \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن YL افت مطلق عملکرد در تراکم علف هرز N_{weed} است و پارامترهای UYL حد بالای افت عملکرد با نزدیک شدن N_{weed} به بی نهایت است و $N_{50}YL$ تراکم علف هرزی است که در آن ۵۰ درصد از حد بالایی افت عملکرد رخ می‌دهد. Y با YL برابر می‌شود هنگامی که $Y = Y_{wf} - YL$، $UYL = Y_{wf}.A$ و $YL = A/I$ N_{50} است.

رقابت‌پذیری نسبی یک گونه علف هرز و شرایط محیطی از عوامل مهم تعیین کننده مقدار N_{50} برای یک گونه علف هرز هستند. جایی که افت عملکرد گیاه زراعی با افزایش در تراکم علف هرز به سرعت به مقدار حداکثر نزدیک می‌شود، مقادیر پایین N_{50} مشاهده می‌شوند، در حالی که مقادیر بالاتر N_{50} بیانگر این است که هر بوته علف هرز اضافی در واحد سطح اثر نسبتا کمتری بر افت عملکرد گیاه زراعی دارد. این بدان معنی است که گونه‌های علف هرز با مقادیر پایین N_{50} نسبت به گونه‌های دارای مقادیر بالاتر N_{50} نسبتا رقابتی‌تر خواهند بود (Lindquist *et al*., 1999).

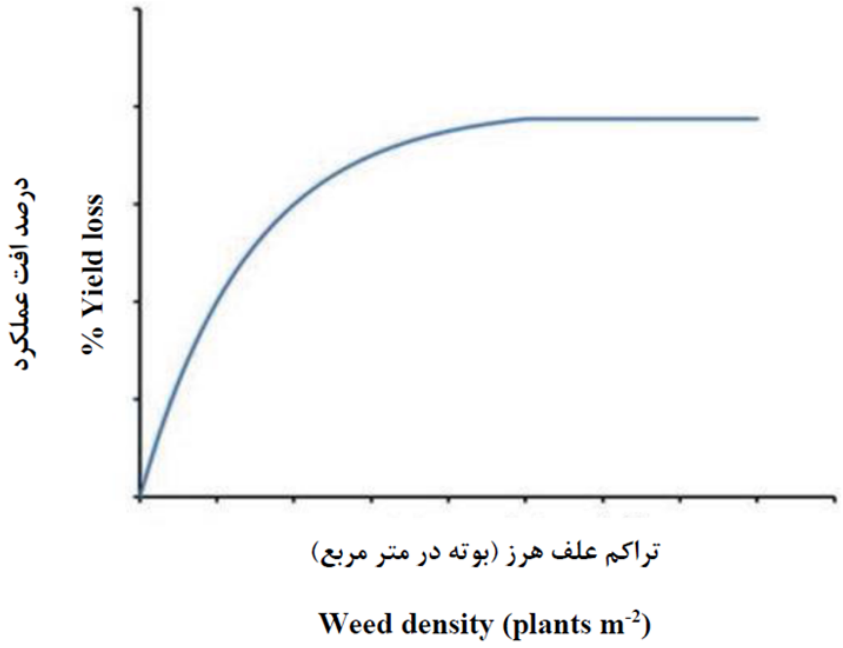
زمان‌بندی رویش علف هرز ممکن است این معادله هذلولی تراکم عملکرد را تحت تاثیر قرار دهد. Cousens *et al*. (1987) این مدل تجربی ساده را بازبینی کردند تا زمان‌بندی رویش علف هرز نسبت به گیاه زراعی همراه با تراکم علف هرز را محاسبه کنند. یک مدل دو پارامتره مشابه توسط Kropff *et al*. (1995) پیشنهاد شد که توصیف می‌کند افت عملکرد گیاه زراعی وابسته به سطح نسبی برگ علف هرز است. این مدل محاسبه زمان‌بندی رویش علف هرز را نسبت به گیاه زراعی در نظر می‌گیرد، لذا نسبت به مدل مبتنی بر

تراکم قابل قبول‌تر بود. Lotz *et al.* (1990) گزارش کردند که افت عملکرد پیش‌بینی شده عمدتا توسط زمان‌بندی رویش علف هرز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. اگرچه این مدل‌های پیش‌بینی پویا به توضیح تغییر در افت عملکرد به دلیل تراکم علف هرز و زمان رویش نسبی علف هرز کمک می‌کنند، اما آزمایش‌های تحقیقاتی اضافی ممکن است عملی بودن چنین مدل‌هایی را برای مطالعه تداخلات گیاه زراعی–علف هرز و استفاده در سیستم‌های مشاوره‌ای افزایش دهند. در برخی از مدل‌های شبیه‌سازی، فرض بر این است که کل بوته‌های علف هرز یک گونه خاص در یک تاریخ رویش می‌یابند، بنابراین این روش‌ها ممکن است رقابت‌پذیری علف هرز را بیش از حد برآورد کنند.

علاوه بر توابع هذلولی منظم، توابع غیرخطی دیگری برای مدل رقابت گیاه زراعی–علف هرز مانند مدل نمایی منفی (شکل ۲) توسعه پیدا کرده‌اند. Torner *et al.* (1991) برای نشان دادن رابطه عملکرد جو با یولاف وحشی زمستانه (*Avena sterilis* L.) از یک مدل نمایی استفاده کردند. این رابطه با استفاده از معادله ۴ توصیف شده بود.

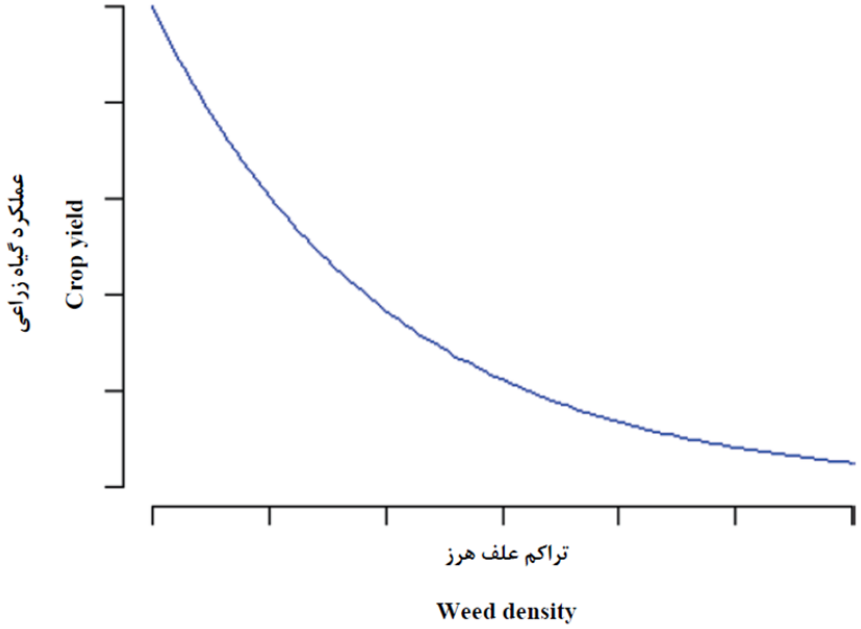
$$Y = a.\exp^{-bx} \qquad \text{معادله (۴)}$$

که در آن Y عملکرد جو، x تراکم یولاف وحشی زمستانه، a برآورد عملکرد جو در غیاب یولاف وحشی زمستانه و b برآورد میزان کاهش در عملکرد جو با افزایش در تراکم یولاف وحشی زمستانه است. تغییرات در پیش‌بینی‌های مدل‌های افت عملکرد به شرایط محیطی متفاوت نسبت داده شده است، لذا استفاده از آنها در طیف گسترده‌ای از شرایط محدود می‌شود.



شکل ۱- مدل هذلولی راست گوشه برای رابطه افت عملکرد گیاه زراعی با تراکم علف هرز

Figure 1. The rectangular hyperbolic model for the relation of crop yield loss with weed density



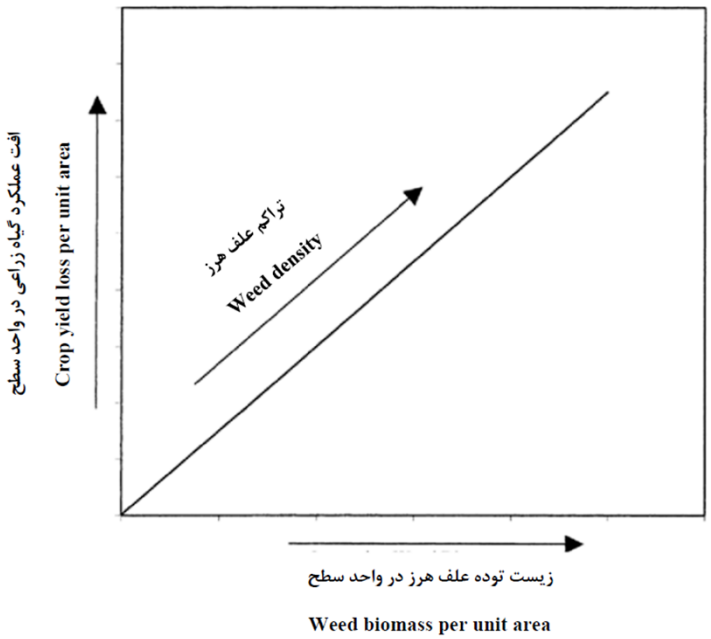
شکل ۲- رابطه نمایی منفی تعمیم یافته بین عملکرد گیاه زراعی و تراکم علف هرز

Figure 2. Generalized negative exponential relation between crop yield and weed density

توابع عملکرد گیاه زراعی و زیست توده علف هرز

معیار کیفی رقابت علف هرز، زیست توده علف هرز است و اعتقاد بر این است که افت عملکرد گیاه زراعی با افزایش زیست توده علف هرز (بیش از طیف وسیعی از تراکم علف هرز) رابطه خطی دارد. علف‌های هرز با استفاده از همان منابعی که به طریق دیگر توسط گیاهان زراعی استفاده می‌شوند، ماده خشک را اندوخته می کنند (Spitters & Aerts, 1983). در محدوده‌ای از تراکم‌های علف هرز، زیست توده علف هرز جایگزین نسبت ثابتی از عملکرد گیاه زراعی می‌شود (که می‌تواند با زیست توده تولید شده توسط علف هرز تقسیم بر افت زیست توده گیاه زراعی به واسطه علف‌های هرز نشان داده شود)، و این جایگزینی به طور کلی خطی است (شکل ۳).

بسیاری از مطالعات مربوط به عملکرد گیاه زراعی و زیست توده علف هرز یک تابع خطی منفی را نشان دادند. به عنوان مثال مدل‌های رگرسیون خطی حدود ۹۵ درصد از تغییر در عملکرد دانه برنج را به واسطه علف‌های هرز باریک برگ و جگن‌های مرتبط با گیاه زراعی هنگام رشد در یک سیستم خشک بذرپاشی شده توضیح دادند (*Singh et al., 2014*). در همان مطالعه، یک رابطه خطی عملکرد دانه با ماده خشک علف‌های هرز پهن برگ، ۹۱ تا ۹۳ درصد تغییر در عملکرد دانه را توصیف کرد.



شکل ۳- جایگزینی خطی افت عملکرد (یا زیست توده) گیاه زراعی با زیست توده علف هرز نسبت به افزایش دامنه تراکم علف هرز

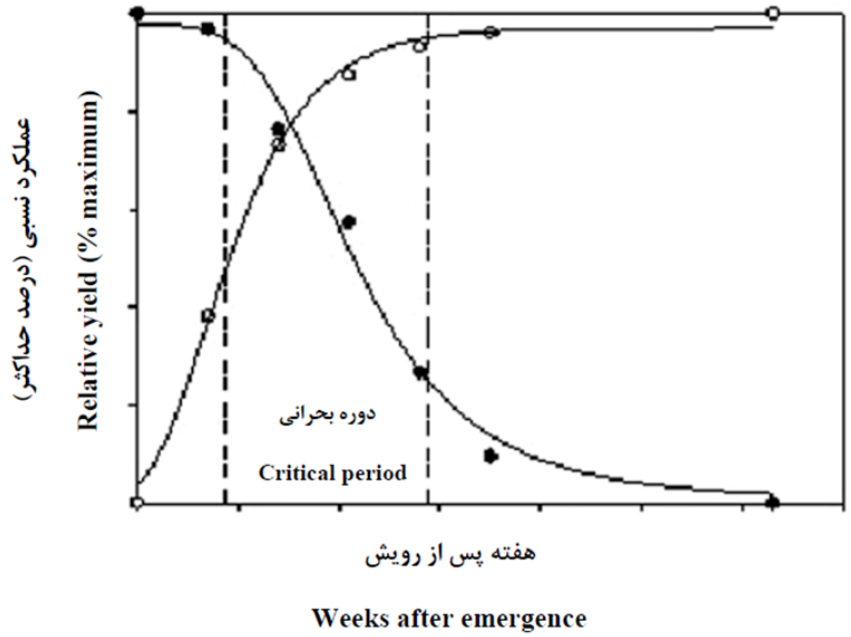
Figure 3. Linear replacement of crop yield (or biomass) loss with weed biomass over increasing weed density range

دوره بحرانی رقابت گیاه زراعی- علف هرز

برای مطالعه دوره بحرانی رقابت گیاه زراعی-علف هرز معمولا از دو مجموعه تیمار استفاده می‌شود (Weaver & Tan, 1987; Hall *et al.*, 1992). در اولین مجموعه تیمار، گیاه زراعی پس از کاشت برای مدت زمان زیادی عاری از علف هرز نگه داشته می‌شود تا دوره‌ای را گیاه زراعی باید به منظور جلوگیری از افت عملکرد عاری از علف هرز نگه داشته شود، مشخص شود. برای دستیابی به حداکثر تولید گیاه زراعی، هیچ اقدام کنترل علف هرزی خارج از این مرحله لازم نیست. در مجموعه تیمار دوم، گیاه زراعی برای مدت زمان زیادی پر از علف هرز نگه داشته می‌شود تا حداکثر دوره‌ای که یک گیاه زراعی می‌تواند علف‌های هرز را بدون هیچ گونه افت عملکرد معنی‌داری تحمل کند، مشخص شود. دوره بحرانی کنترل علف‌های هرز ترکیبی از این دو دوره است (شکل ۴) و وجود علف‌های هرز قبل و بعد از این دوره، عملکرد گیاه زراعی را کاهش نخواهد داد.

به طور کلی معادله گامپرتز برای مدل دوره عاری از علف هرز (مجموعه تیمار اول) بر عملکرد دانه استفاده می‌شود، در حالی که معادله لجستیک برای مدل اثر تداوم علف هرز (مجموعه تیمار دوم) بر عملکرد استفاده می‌شود. در بسیاری از گیاهان زراعی، این دوره می‌تواند به وضوح از مطالعات مشخص شود، جایی که ارتباط زودهنگام و دیرهنگام علف‌های هرز بر گیاه زراعی تاثیر نمی‌گذارد. برای مثال Singh *et al.* (2014) گزارش کردند که دوره بحرانی برای رقابت گیاه زراعی-علف هرز برای ارقام کوتاه مدت برنج در سیستم‌های خشک بذرپاشی شده برنج از ۱۷ تا ۲۰ روز شروع و در ۴۸ تا ۵۷ روز پایان می‌یابد. در سایر گیاهان زراعی یا موقعیت‌ها، ممکن است یک دوره مشخص وجود نداشته باشد که نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد دوره‌ای است که علف‌های هرز باید قبل از اینکه اجازه رویش یا رشد در گیاه زراعی یابند، کنترل شوند. برای مثال در مطالعه‌ای بر روی سویا، Almarie (2017) پیشنهاد حذف علف‌های هرز را برای ۵ هفته اول داد تا عملکردهای تحت تاثیر قرار نگرفته به دست آید. دوره‌های بحرانی و سطوح تراکم آستانه علف های هرز اطلاعات خوبی را به تولید کنندگان ارائه می‌دهند، اما باید بر کنترل تولید بذر علف هرز که شامل اقدامات کنترل علف هرز خارج از این دوره بحرانی است، تاکید شود. Weaver *et al.* (1992) استفاده از مدل‌های اکوفیزیولوژیکی (مکانیستیک) را

برای پیش‌بینی دوره بحرانی رقابت گیاه زراعی-علف هرز در چغندرقند و گوجه فرنگی نشایی نشان دادند. مدل شبیه‌سازی پیشنهاد کرد که تراکم علف هرز تعیین کننده شروع دوره بحرانی مانند رقابت اوایل فصل و همچنین کل طول دوره بحرانی برای جلوگیری از تلفات عملکرد گیاه زراعی است.



شکل ۴- تاثیر زمان رویش علف هرز یا حذف علف هرز بر درصد حداکثر عملکرد گیاه زراعی

Figure 4. The influence of time of weed emergence or weed removal on percent maximum crop yield

مدل‌های برهمکنش آللوپاتی گیاه زراعی- علف هرز

اگرچه آللوپاتی علف هرز-گیاه زراعی به عنوان بخشی از تداخل گیاه زراعی-علف هرز شناخته شده است، اما بیشتر مطالعات توسعه یافته مدل‌های تداخل گیاه زراعی-علف هرز فقط مربوط به رقابت گیاه زراعی-علف هرز است. دلیل این امر ممکن است در جداسازی این نوع تداخل شیمیایی از رقابت فیزیکی باشد. Liu *et al.* (2005) یک معادله ریاضی ساده برای جداسازی اثر آللوپاتی از رقابت پیشنهاد دادند که از معادله‌ای برای محاسبه عملکرد یک گونه در یک مخلوط دو گونه‌ای مشتق شده بود. این معادله ریاضی (معادله ۵) به صورت زیر ارائه شد:

$$y_m = y_i f(\delta_j) \qquad \text{معادله (۵)}$$

که در آن y_m عملکرد گونه اصلی در سناریوی گونه‌های مخلوط، y_i عملکرد گونه اصلی به صورت جدا (ایزوله) یعنی در غیاب گونه‌های دیگر و $f(\delta_j)$ تابع (اثر) گونه دیگر بر گونه اصلی است. $f(\delta j)$ ممکن است در صورت عدم تاثیر برابر با یک، در صورت تحریک بیشتر از یک و در صورت تداخل کمتر از یک باشد. از آنجا که تداخل به تراکم دو گونه وابسته است، $f(\delta_j)$ در معادله ۶ گنجانده شد:

$$y_m = y_i(y_m / y_i)^{m/n} \qquad \text{معادله (۶)}$$

که در آن m و n به ترتیب تراکم در واحد سطح گونه اصلی و گونه دیگر هستند.

این معادله $f(\delta_j)$ به دو معادله مجزا (معادلات ۷ و ۸) برای آللوپاتی و رقابت تغییر یافت:

$$Equation1(for\ allelopathy): R_a = (y_{m/a} - y_i)/y_i$$ معادله (۷)

$$\text{Equation2(for competition)}: R_c = (y_{m/c} - y_i)/y_i$$ معادله (۸)

که در آن R_a و R_c به ترتیب به میزان اثر آللوپاتی و رقابت در مخلوط دو گونه اشاره دارند.

روش‌های دیگری نیز برای جداسازی اثرات آللوپاتی از رقابت در منابع پیشنهاد شدند. Bertholdsson (2011) استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی[1] (PLSR) را پیشنهاد داد. با استفاده از مدل‌های PLSR پیش‌بینی شده بود که هم با بهبود در زیست توده گیاه زراعی و هم آللوپاتی در گندم (تا سطح تریتیکاله)، بیش از ۶۰ درصد کاهش در زیست توده علف‌های هرز را می‌توان مشاهده نمود، در حالی که بهبود آللوپاتی به تنهایی می‌تواند علف‌های هرز را فقط ۱۸ تا ۲۸ درصد سرکوب کند.

بسیاری از مطالعات پیشنهاد می‌کنند که آللوپاتی و رقابت می‌توانند از طریق هم‌افزایی عمل کنند (Reigosa *et al*., 1999)، زیرا داشتن حتی یک اثر آللوپاتیک جزئی می‌تواند تعادل رقابت بین گونه‌ها را تغییر دهد. به طور مشابهی اعتقاد بر این است که آللوکمیکال‌ها تحت شرایط استرس آزاد می‌شوند که ممکن است به دلیل رقابت برای منابع مهم رخ دهد. اندازه‌گیری این اثر مرکب از آللوپاتی و رقابت در مدل‌هایی که برآوردها براساس یک اثر افزایشی ساده ایجاد می‌گردند، دشوار است.

نتیجه گیری

مطالعات مدل‌سازی چارچوب پایه‌ای را ارائه می‌دهند که می توان در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری[2] (DSS) برای مدیریت موثر علف‌های هرز مورد استفاده قرار داد. بسیاری از مدل‌ها، سطوح آستانه گونه‌های خاص علف هرز را پیشنهاد می‌دهند، جایی که عملکرد گیاه زراعی می‌تواند به طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار گیرد. علاوه بر این مدل‌های مربوط به دوره بحرانی رقابت گیاه زراعی-علف هرز که اطلاعاتی در مورد زمان‌بندی دقیق کنترل علف‌های هرز ارائه می‌دهند، برای کاهش افت عملکرد در گیاهان زراعی مورد نیاز هستند. چنین مدل‌هایی را می‌توان در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری گنجانید تا در تنظیم روش‌های کنترل علف‌های هرز و زمان‌بندی آنها طبق نیازهای گیاه زراعی کمک کنند. چندین مدل وجود دارند که اطلاعات مربوط به رقابت گیاه زراعی-علف هرز را براساس صفات مورفولوژیکی علف‌های هرز و گیاهان زراعی ارائه می‌دهند. پرورش‌دهندگان ممکن است از چنین مدل‌هایی برای توسعه رقم‌های رقابتی گیاه زراعی بهره‌مند شوند. مدل‌های زیست-اقتصادی (که مدل‌های تراکم گیاه زراعی و علف هرز را با اقتصاد کنترل علف هرز پیوند می‌دهند) ممکن است نقشی را در ترویج و پذیرش فناوری‌های جدید مدیریت علف‌های هرز بازی کنند.

مدل‌های رقابت گیاه زراعی-علف هرز موفقیت قابل ملاحظه‌ای را در نشان دادن اثر رقابت بر عملکرد گیاه زراعی و سودبخشی استفاده از استراتژیهای مدیریت علف‌های هرز به دست آوردند. با این حال درک ما از پیش‌بینی تحت محیط‌های مختلف این است که تغییرپذیری مکانی و زمانی در پارامترهای مدل برای طیف وسیعی از علف‌های هرز و گیاهان زراعی افزایش یافته است. استراتژیهای مدیریت تلفیقی علف‌های هرز را می‌توان با استفاده از این مدل‌ها ابداع کرد و تنوع زیستی علف‌های هرز در محصولات فعلی و آینده ممکن است مورد مطالعه قرار گیرد. برخلاف پس زمینه تغییر اقلیم، مدل‌ها به ما کمک می‌کنند تا شبیه‌سازی و درک سناریوهای رقابت گیاه زراعی-علف هرز و اثراتشان را بر رشد و عملکرد گیاه زراعی و به طور کلی بر کشاورزی در سطوح منطقه‌ای، ملی و بین المللی ادامه دهیم.

1- Partial least square regression (PLSR)

2- Decision support systems (DSS)

منابع

Abouziena, H. F. and Haggag, W. M. 2016. Weed control in clean agriculture: A review. *Planta Daninha*, 2: 377-392.

Almarie, A. A. 2017. The critical period for weed competition in soybean (*Glycine max* L. Merr) under Iraqi irrigated areas. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science*, 4: 128–132.

Bail, D. A. & Shaffer, M. J. 1993. Simulating resource competition in multispecies agricultural plant communities. *Weed Research*, 33: 299–310.

Bàrberi, P. 2002. Weed management in organic agriculture: are we addressing the right issues? *Weed Research*, 42: 177–193.

Bertholdsson, N. O. 2010. Breeding spring wheat for improved allelopathic potential. *Weed Research*, 50: 49–57.

Bertholdsson, N. O. 2011. Use of multivariate statistics to separate allelopathic and competitive factors influencing weed suppression ability in winter wheat. *Weed Research*, 51: 273–283.

Bischoff, A. & Mahn, E. G. 2000. The effects of nitrogen and diaspore availability on the regeneration of weed communities following extensification. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 77: 237–246.

Bleasdale, J. K. A. & Nelder, J. A. 1960. Plant population and crop yield. Nature, 188: 342-354.

Chauhan, B. S. & Johnson, D. E. 2009. Influence of tillage systems on weed seedling emergence pattern in rainfed rice. *Soil and Tillage Research*, 106: 15–21.

Chauhan, B. S. & Johnson, D. E. 2010. Implications of narrow crop row spacing and delayed Echinochloa colona and Echinochloa crus-galli emergence for weed growth and crop yield loss in aerobic rice. *Field Crops Research*, 117: 177–182

Connolly, J. 1986. On difficulties with replacement-series methodology in mixture experiments. *Journal of Applied Ecology*, 23: 125–137.

Cousens, R. 1985. A simple model relating yield loss to weed density. *Annals of Applied Biology*, 107: 239–252.

Cousens, R., Brain, P., O'Donovan, J. T. & O'Sullivan, P. A. 1987. The use of biologically realistic equations to describe the effects of weed density and relative time of emergence on crop yield. *Weed Science*, 35: 720–725.

Davis, A. S. & Ainsworth, E. A. 2012. Weed interference with field-grown soyabean decreases under elevated [CO_2] in a FACE experiment. *Weed Research*, 52: 277–285.

De Wit, C. T. 1960. On competition. Verslagen van Land boukundigonder zoekingen. *Netherlands*, 66: 1–82.

Dieleman, A., Hamill, A. S., Fox, G. C. & Swanton, C. J. 1996. Decision rules for postemergence control of pigweed (*Amaranthus* spp.) in soybean (*Glycine max*). *Weed Science*, 44: 126–132.

Dunan, C. M., Westra, P., Schweizer, E. E., Lybecker, D. W. & Moore, F. D. 1995. The concept and application of early economic period threshold: the case of DCPA in onions (*Allium cepa*). *Weed Science*, 43: 634–639.

Freckleton, R. P. & Watkinson, A. R. 2000. Designs for greenhouse studies of interactions between plants: an analytical perspective. *Journal of Ecology*, 88: 386–391.

Gaba, S., Gabriel, E., Chadœuf, J., Bonneu, F. & Bretagnolle, V. 2016. Herbicides do not ensure for higher wheat yield, but eliminate rare plant species. *Scientific Reports*, 6: 1-10.

Gibson, J. D., Connoll, J., Hartnett, D. C. & Weidenhamer, J. D. 1999. Designs for greenhouse studies of interactions between plants. *Journal of Ecology*, 87: 1–16.

Graf, B. & Hill. J. E. 1992. Modelling the competition for light and nitrogen between rice and *Echinochloa crus-galli*. *Agricultural Systems*, 40: 345–359.

Graf, B., Rakotobe, O., Zahner, P., Delucchi, V. & Gutierrez. A. P. 1990a. A simulation model for the dynamics of rice growth and development: Part I-The carbon balance. *Agricultural Systems*, 32: 341–365.

Graf. B., Gutierrez, A. P., Rakotobe, O., Zahner, P. & Delucchi, V. 1990b. A simulation model for the dynamics of rice growth and development: Part II-The competition with weeds for nitrogen and light. *Agricultural Systems*, 32: 367–392.

Hall, M. R., Swanton, C.J. & Anderson, G. W. 1992. The critical period of weed control in grain corn (*Zea mays*). *Weed Science*, 40: 441–447.

Hashem, A., Radosevich, S. R. & Roush, M. L. 1998. Effect of proximity factors on competition between winter wheat (*Triticum aestivum*) and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*). *Weed Science*, 46: 181–190.

Hyvonen T. & Ramula, S. 2014. Crop–weed competition rather than temperature limits the population establishment of two annual C_4 weeds at the edge of their northern range. *Weed Research*, 54: 245–255.

Jones, J. W., Boote, K. J., Jagtap, S. S., Hoogenboom, G. & Wilkerson, G. G. 1987. *SOYGRO V5.4: Soybean crop growth simulation model user's guide*. Agric Eng Dep and Agron Dep, University of Florida, Gainesville, Florida Agric. Exp. Stn. J. No. 8304, Gainesville, FL.

Kansas State University. 2016. *Left uncontrolled, weeds would cost billions in economic losses every year*. Science Daily. www.sciencedaily.com/releases/2016/05/160516130720.htm. Accessed 21 Sept 2019.

Kiniry, J. R., Williams, J. R., Gassman, P. W. & Debaeke, P. 1992. A general, process-oriented model for two competing plant species. *Transactions - American Society of Agricultural Engineers*, 35: 801–810.

Kropff, M. J. & Spitters, C. J. T. 1991. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of weeds. *Weed Research*, 31: 97–105.

Kropff, M. J. & Spitters, C. J. T. 1992. An eco-physiological model for interspecific competition, applied to the influence of Chenopodium album L. on sugar beet. I. Model description and parameterization. *Weed Research*, 32: 437–450.

Kropff, M. J. & Van Laar, H. H. 1993. Modelling crop-weed interactions. CAB International in Association with the International Rice Research Institute, Wallingford, p 274.

Kropff, M. J., Weaver, S. E., Lotz, L. A. P., Lindquist, J. L. Joenje, W., Schnieders, B. J., van Keulen, N. C., Migo, T. R. & Fajardo, F. F. 1993. *Understanding crop-weed interactions in field situations*. In: Kropff MJ, van Laar HH (eds) Modelling crop-weed interactions. CAB International, Wallingford, pp 105–136.

Kropff, M. J., Lotz, L. A. P., Weaver, S. E., Bos, H. J., Wallinga, J. & Migo, T. 1995. A two parameter model for prediction of crop loss by weed competition from early observations of relative leaf area of the weeds. *Annals of Applied Biology*, 126: 329–346.

Liebman, M., Mohler, C. L. & Staver, C. P. 2004. *Ecological Management of Agricultural Weeds*. Cambridge University Press, Cambridge, p 525.

Lindquist, J. L., Mortensen, D. A. & Westra, P. 1999. Stability of corn (*Zea mays*)–foxtail (*Setaria* spp.) interference relationships. *Weed Science*, 47: 195–200.

Liu, D. L., An, M., Johnson, I. R. & Lovett, J. V. 2005. Mathematical modelling of allelopathy: IV. Assessment of contributions of competition and allelopathy to interference by barley. Nonlinearity in Biology. *Medical Toxicology*, 3: 213–224.

Lotz, L. A. P., Kropff, M. J. & Groeneveld, R. M. W. 1990. Modelling weed competition and yield losses to study the effect of omission of herbicides in winter wheat. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 38: 711–718.

Mack, R. & Harper, J. L. 1977. Interference in dune annuals: spatial patterns and neighbourhood effects. *Journal of Ecology*, 65: 345–363.

Malik, R. K. & Singh, S. 1995. Littleseed canarygrass (*Phalaris minor* Retz.) resistance to isoproturon in India. *Weed Technology*, 9: 419–425.

Mason, H. E. & Spaner, D. 2006. Competitive ability of wheat in conventional and organic management systems: a review of the literature. *Canadian Journal of Plant Science*, 86: 333–343.

Mehra, S. P. & Gill, H. S. 1988. Effect of temperature on germination of Phalaris minor Retz. and its competition in wheat. *Journal of Research Punjab Agricultural University*, 25: 529–533.

Mohler, C. L. 2004. *Enhancing the competitive ability of crops*. In: Liebman M, Mohler CL, Staver CP (eds) Ecological management of agricultural weeds. Cambridge University Press, Cambridge, pp 269–321.

Park, S. E., Benjamin, L. R. & Watkinson, A. R. 2002. Comparing biological productivity in cropping systems: a competition approach. *Journal of Applied Ecology*, 39: 416–426.

Pekrun, C. & Claupein, W. 2004. The effect of stubble tillage and primary tillage on population dynamics of Canada thistle (*Cirsium arvense*) in organic farming. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 19: 483–490.

Price, A. J. & Norsworthy, J. K. 2013. Cover crops for weed management in southern reduced-tillage vegetable cropping systems. *Weed Technology*, 27: 212–217.

Rasmussen, J. 1992. *Experimental approaches to mechanical weed control in field peas*. In: Proceedings of the 9th International Symposium on the Biology of Weeds, 16–18 September 1992, Dijon, France. European Weed Research Society, Paris, pp 129–138.

Reigosa, M. J., Sanchez-Moreiras, A. & Gonzalez, L. 1999. Ecophysiological approach in allelopathy. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18: 577–608.

Saito, K., Azoma, K. & Rodenburg, J. 2010. Plant characteristics associated with weed competitiveness of rice under upland and lowland conditions in West Africa. *Field Crops Research*, 16: 308–317.

Singh, M., Bhullar, M. S. & Chauhan, B. S. 2014. The critical period for weed control in dry-seeded rice. *Crop Protection*, 66: 80–85.

Snapp, S. S., Swinton, S. M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J. R., Leep, R., Nyiraneza, J. & O'Neil, K. 2005. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agronomy Journal*, 97: 322–332.

Spitters, C. J. T. 1989. *Weeds: population dynamics, germination and competition*. In: Rabbinge R, Ward SA, van Laar HH (eds) Simulation and systems management in crop protection. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen, pp 182–216.

Spitters, C. J. T. & Aerts, R. 1983. Simulation of competition for light and water in crop-weed associations. *Aspects of Applied Biology*, 4: 467–484.

Spitters, C. J. T., van Keulen, H. & Van Kraalingen, D. W. G. 1989. *A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87*. In: Rabbinge R, Ward SA, van Laar HH (eds) Simulation and systems management in crop protection. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen, pp 147–181.

Swanton, C. J., Nkoa, R. & Blackshaw, R. E. 2015. Experimental methods for crop–weed competition studies. *Weed Science*, 63: 2–11.

Tominaga, T. & Yamasue, Y. 2004. *Crop-associated weeds*. In: Inderjit (ed) Weed Biology and Management. Springer, Dordrecht, pp 47–63.

Torner, C., Gonzalez-Andujar, J.L. & Fernandez-Quintanilla, C. 1991. Wild oat (Avena sterilis L) competition with winter barley: plant density effects. *Weed Research*, 31: 301–307.

Walia, U. S. 2010. *Weed Management*, 3rd edn. Kalyani Publishers, Ludhiana. 373 pp.

Watkinson, A. R. 1985. *Plant responses to crowding*. In: White J (ed) Studies on plant demography. Academic Press, London, pp 275–289.

Watkinson, A. R. & Freckleton, RP. 1997. Quantifying the impact of arbuscular mycorrhiza on plant competition. *Journal of Ecology*, 85: 541–545.

Weaver, S. E. & Tan, C. S. 1987. Critical period of weed interference in field-seeded tomatoes and its relation to water stress and shading. *Canadian Journal of Animal Science*, 67: 573–581.

Weaver, S. E., Kropff, M. J. & Groeneveld, R. M. W. 1992. Use of ecophysiological models for crop-weed interference: the critical period of weed interference. *Weed Science*, 40: 302–307.

Wiles, L. J. & Wilkerson, G. G. 1991. Modeling competition for light between soybean and broadleaf weeds. *Agricultural Systems*, 35: 37–51.

Wilkerson, G. G., Jones, J. W., Coble, H. D. & Gunsolus, J. L. 1990. SOYWEED: a simulation model of soybean and cocklebur growth and competition. *Agronomy Journal*, 82: 1003–1010.

Journal of Novel Researches on Plant Protection
(Islamic Azad University, Shiraz Branch)
2021 – **10** (**2**): 105-121

A review of weed interference models

(Review Article)

Rahman Khakzad [1*], Mostafa Oviesi [2], Reza Deihimfard[3]

(1) Department of Agronomy, Agriculture College of Sari, Technical Vocational University, Mazandaran, Iran,
(*) rahman.khakzad@yahoo.com
(2) Agronomy and Plant Breeding Department, Agriculture and Natural Resource Campus, University of Tehran, Iran
(3) Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran

Abstract

Weeds represent a continuous problem in agricultural production due to their dynamic and resilient nature. Mathematical models offer a significant tool for understanding and predicting the crop yield losses incurred due to weed-crop interference. Weed-crop competition models help to inform weed management decisions, both on a short-term basis to tackle the present weed population and in the long term to plan sustainable weed management strategies. Most competition studies are based on empirical models. Empirical functions are the most commonly used models, which provide information for weed threshold values. The limitations of such models are that they are based on statistical functions and usually do not consider biological insights for crop-weed interference. Crop-weed competition is a complex phenomenon, and to understand this, a detailed mechanistic model offers better insights than an empirical model. Mechanistic or explanatory models take into account all underlying processes or mechanisms and their dependence on each other with respect to time and external drivers. Competition models can be integrated within the framework of a decision support system (DSS). In this review, we present empirical and mechanistic models that are currently in use for studying crop-weed interference.

Keywords: Competition, empirical models, mechanistic models, prediction, yield losses.