مروری بر علف‌کش‌های زیستی
An Overview of Bioherbicides

رحمان خاکزاد[1*] و رسول لقمانپور زرینی[2]

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۷

چکیده

افزایش روز افزون جمعیت و مسئله جهانی امنیت غذایی، تولید محصولات کشاورزی را به استفاده از رویکردهای متعدد برای غلبه بر علف‌های هرز سوق داده است؛ عواملی که می‌توانند بهره‌وری محصول زراعی را تا ۷۰ درصد کاهش دهند. علف‌کش‌های شیمیایی و روش‌های مکانیکی و زیستی از یک سو بر مشکل علف‌های هرز غلبه کرده، اما از سوی دیگر محیط‌زیست را تخریب کرده و اثرات مخربی بر سلامت انسان گذاشته‌اند. علف‌کش‌های زیستی عوامل کنترل بیولوژیکی هستند که با روش‌های مشابه با علف‌کش‌های شیمیایی برای کنترل علف‌های هرز به‌کار می‌روند. از میان مجموعه‌ای از علف‌کش‌های زیستی موجود، به نظر می‌رسد موفق‌ترین محصولات علف‌کش‌های قارچی با حداقل ۱۶ محصول برای استفاده تجاری در سطح جهانی باشند. طی چند دهه گذشته، علف‌کش‌های زیستی حاصل از باکتری‌ها و عصاره‌های گیاهی (مانند آللوکمیکال‌ها و اسانس‌ها) همراه با ویروس‌ها، موفقیت چشمگیری در کنترل علف‌های هرز مختلف نشان داده‌اند. علی‌رغم این روند دلگرم کننده، همچنان نیاز به تحقیقات مداوم بر روی این ترکیبات است تا در دراز مدت نتایج مقرون به صرفه و موفقیت‌آمیزی حاصل شود. این بررسی اهمیت و تأثیرات علف‌کش‌های زیستی را با شرح محدودیت‌های آنها در تولید و کاربرد، توضیح خواهد داد.

واژگان کلیدی: اسانس‌ها، باکتری‌ها، عصاره‌های گیاهی، قارچ‌ها، ویروس‌ها

مقدمه

علف‌های هرز، طی رقابت با محصولات زراعی اصلی و گونه های بومی، خسارت اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی به بسیاری از بوم‌نظام‌های جهانی وارد می‌کنند (Llewellyn *et al*., 2016؛ Aneja *et al*., 2017). تخمین زده می‌شود که خسارت اقتصادی سالانه ناشی از هزینه‌های مدیریت علف‌های هرز و کاهش تولید به صنعت کشاورزی در استرالیا بیش از ۳/۳ میلیارد دلار (Llewellyn *et al*., 2016)، در هند ۱۱ میلیارد دلار (Gharde *et al*., 2018) و در ایالات متحده آمریکا ۲۶ میلیارد دلار باشد (Chauhan, 2020). مسئله‌ای که باعث تشدید این موضوع شده این است که طی چندین دهه، استفاده از علف‌کش‌های مصنوعی روش اصلی برای کنترل علف‌های هرز بوده است؛ این ترکیبات بیش از ۴۴ درصد از کل آفت‌کش‌های فروخته شده در سراسر جهان را تشکیل داده‌اند (Qu *et al*., 2021). علی‌رغم موفقیت‌های لحظه‌ای حاصل از کاربرد آنها، استفاده طولانی مدت و مکرر آن‌ها می‌تواند پیامدهای مخرب زیست‌محیطی در پی داشته باشد (Gaines *et al*., 2021؛ Cordeau *et al*., 2016). علف‌کش‌های مصنوعی نه تنها محیط را به‌شدت آلوده می‌کنند، بلکه کاربرد مکرر آن‌ها باعث بروز مقاومت ناشی از مقاومت تقاطعی علف‌های هرز به انواع علف‌کش‌ها خواهد شد (Heap, 2021؛ Korres *et al*., 2019). تا به امروز، بیش از ۵۰۰ مورد مقاومت به علف‌کش‌ها در ۲۶۰ گونه علف هرز، شامل ۱۶۷ علف‌کش و ۲۳ نحوه عمل در ۷۰ کشور، گزارش شده‌اند (Heap, 2021). به منظور غلبه بر توسعه مقاومت به علف‌کش، نیاز به کاربرد روش‌های جدید با نحوه‌های عملکرد متفاوت احساس می‌شود. با این حال، علی‌رغم کمک‌های قابل توجه به تحقیقات در این زمینه، پیشرفت و موفقیت کمی طی سه دهه گذشته حاصل شده است (Qu *et al*., 2021؛ Gaines *et al*., 2021).

۱ و ۲- به ترتیب مربی و دانشیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران
نویسنده مسئول مکاتبات: rahman.khakzad@yahoo.com

doi: 10.30495/PLANT.2023.709186

در این راستا راهبردهای جایگزین، سازگار با محیط زیست و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه مدیریت علف‌های هرز که جنبه‌های مختلف متابولیسم یک گیاه را هدف قرار می‌دهند، به فوریت مورد نیازند (Bordin *et al*., 2020).

یکی از راهبردهای جایگزین که هم از سوی تولیدکنندگان و هم محققان، بسیار مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از علف‌کش‌های زیستی است (Kumar *et al*., 2021؛ Rai *et al*., 2021؛ Radi and Banaei-Moghaddam, 2020؛ Bo *et al*., 2019). علف‌کش زیستی عبارتست از یک میکروارگانیسم بیماری‌زای گیاهی یا فیتوتوکسین میکروبی به منظور کاهش قدرت گیاه یا مرگ آن به‌کار رود (Pacanoski, 2015). این ترکیبات از موجودات زنده تهیه می‌شوند و حاوی آللوکمیکال‌های تخصصی، مواد ژنتیکی یا عصاره‌های گیاهی هستند که برای غلبه بر سیستم‌های دفاعی گیاهی هدفمند، مهندسی یا دستکاری شده‌اند (Ferrell *et al*., 2008؛ Pacanoski, 2015). به منظور تلفیق موفقیت‌آمیز روش‌های مدیریتی در یک برنامه مدیریت علف‌های هرز، علف‌کش‌های زیستی باید چند ویژگی مشخص داشته باشند که عبارتند از: (۱) فرمولاسیون تخصصی و مناسب داشته باشند، (۲) از لحاظ اقتصادی پایدار باشند، (۳) باعث مرگ و میر بالا در گیاه هدف شوند و (۴) دارای اثر بسیار محدود (یا بدون تأثیر) بر محیط طبیعی اطراف و سلامت انسان باشند (Kremer, 2019؛ Hershenhorn *et al*., 2016). در نتیجه، در این مقاله منابع بسیاری به منظور ارزیابی میزان تناسب علف‌کش‌های زیستی حاصل از باکتری‌ها، قارچ‌ها، گیاهان یا ویروس‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت. همچنین چالش‌های تحقیقاتی و زمینه‌هایی را که برای کاربرد موفق در شرایط زراعی به‌صورت طولانی مدت به شیوه‌ای پایدار نیاز به تحقیقات بیشتر دارند، شناسایی خواهد کرد.

علف‌کش‌های زیستی و مکانیسم عمل آن‌ها

برخلاف کنترل بیولوژیکی کلاسیک، علف‌کش‌های زیستی از فرمولاسیون‌های تغییر یافته عوامل بیماری‌زای گیاهی استفاده می‌کنند (Hershenhorn *et al*., 2016). این ماده معمولاً از طریق محلول‌پاشی یا گرانول جامد مستقیماً روی تنه گیاه اعمال شده، یا به ارگانیسم هدف، تلقیح (مایه‌کوبی) می‌شود (Caldwell *et al*., 2012)، که پس از آن برای مؤثر بودن باید به سیستم آن نفوذ کند (Harding and Raizada, 2015). تحقیقات نشان داده است که علف‌کش زیستی پس از ورود به گیاه، شروع به تولید چندین آنزیم از جمله آمیلازها، سلولازها، لیگنینازها، پکتینازها، پپتیدازها، فسفولیپازها یا پروتئازها می‌کند که هر کدام به تخریب دیواره‌های سلولی، غشاهای لیپیدی و پروتئین‌ها کمک می‌کنند (Xie *et al*., 2013). در نتیجه آنزیم‌های حاصل امکان دسترسی به تمام قسمت‌های علف‌هرز را خواهند داشت (Hoagland *et al*., 2007). همچنین گزارش شده است که متابولیت‌ها و پپتیدهای ثانویه گیاهی سمی می‌توانند با اصلاح بیان ژن و تداخل در متابولیسم گیاه و مکانیسم‌های دفاعی به کنترل علف‌های هرز کمک کنند (Vurro *et al*., 2009). علف‌کش‌های زیستی تلقیح شده می‌توانند تغییرات متابولیکی متعددی در موجود زنده هدف ایجاد کنند؛ مانند کاهش کارآیی فعالیت‌های سلولی، آنزیم‌ها و هورمون‌ها و در نهایت کاهش جذب مواد غذایی، بی‌نظمی در فتوسنتز و نفوذپذیری غشاء، پراکسیداسیون لیپیدی القاشده و مهار جوانه‌زنی و نمو بذر (Lee *et al*., 2015؛ Talukder *et al*., 2019). کاهش جذب مواد غذایی می‌تواند بر رشد کلروپلاست تأثیر بگذارد و باعث کلروز شود؛ در حالی که تغییرات در هورمون‌های گیاهی به تولید ترکیبات فنلی مهارکننده مسیر جیبرلین منتهی شده و لذا باعث افزایش تجمع اسید آبسیزیک، اسید جاسمونیک و اسید سالیسیلیک گردد (Lee *et al*., 2015؛ Talukder *et al*., 2019). تجمع این ترکیبات باعث کاهش سطح فتوسنتز گیاه، افزایش تنش اکسیداتیو و بسته شدن روزنه‌ها گردیده و در نهایت باعث کاهش رشد گیاه و افزایش پیری شوند (Lee *et al*., 2015). اگرچه این عمل برای بسیاری از علف‌کش‌های زیستی رایج است، تحقیقات اخیر نشان داده است که بیمارگرهای مختلف می‌توانند گیاه هدف را به روش‌های بسیار متنوعی تحت تأثیر قرار دهند (Harding and Raizada, 2015).

باکتری‌ها

در حالی که توسعه علف‌کش‌های زیستی مبتنی بر باکتری نتایج دلگرم‌کننده‌ای را در کنترل علف‌های هرز مختلف نشان داده است (جدول ۱)، یکی از بزرگترین موانع و چالش‌ها در توسعه آن‌ها، شناسایی و یافتن مواد مناسبی است که مستقیماً با کنترل علف‌های هرز هدف‌گذاری شده در تعامل باشد (Kremer, 2019). دستاوردها و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه چندین باکتری مناسب با توانایی مهار رشد گیاه را شناسایی کرده است و از این منابع شناخته شده *Xanthomonas campestris* pv. *poae* (سویه JT-P482) و *X. campestris* (سویه LVA-987) بیشترین موفقیت را در کنترل رشد علف‌های هرز باریک برگ مختلف چمن (جدول ۱) نشان داده‌اند (Imaizumi *et al*., 1997؛ Boyette and Hoagland, 2013, 2015).

جدول ۱- علف‌کش‌های زیستی باکتریایی و اثرات آنها بر علف‌های هرز هدف

Table 1. Bacterial bioherbicides and their impacts on targeted weeds

گونه باکتری	علف‌های هرز هدف Target Weed(s)	نحوه عمل Mode of Action	نام تجاری Commercial Name	منابع Reference
Curtobacterium sp. MA01	*Petunia* spp.	واکنش‌های آنزیمی و متابولیکی از جمله تخریب سنتز پروتئین و پراکسیداسیون لیپیدی را تغییر می‌دهد.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Papaianni *et al*., 2020
Pseudomonas fluorescens D7	*Aegilops cylindrica* (گندم نیای سه لایه)؛ *Bromus tectorum* (جارو علفی بامی)؛ *Taeniatherum caput-medusae* (ستاره دریایی رأسی)	ساختارهای ریشه را کلونیزه می‌کند و با آنزیم‌هایی که از پیریدوکسال فسفات به عنوان کوفاکتور استفاده می‌کنند تداخل ایجاد می‌کند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Gealy *et al*., 1996; Kennedy, 2018
Pseudomonas fluorescens D7	*Bromus tectorum* (پشمکی)		عدم دسترسی به صورت تجاری	Pyke *et al*., 2019
Pseudomonas fluorescens BRG100	*Setaria viridis* (چسبک)	با هورمون‌ها و متابولیسم گیاه تداخل ایجاد می‌کند و ریشه‌ها و ساقه‌ها را مهار می‌کند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Caldwell *et al*., 2012; Quail et al., 2002
Pseudomonas viridiflava $CDRT_C$ 14	*Lepidium draba* (ازمک)	هورمون‌ها و متابولیسم گیاه را تغییر می‌دهد.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Samad *et al*., 2017
Xanthomonas campestris pv. poae (JT-P482)	*Poa annua* (چمن یک‌ساله)؛ *Poa attenuate* (چمن پیازدار)	رشد را مهار می‌کند و باعث ایجاد بیماری پوسیدگی سیاه می‌شود.	Camperico™	Imaizumi *et al*., 1997; Papaianni *et al*., 2020
Xanthomonas campestris (LVA-987)	*Ambrosia artemisifolia* (آمبروژیای معمولی) *Ambrosia trifida* (آمبروژیای غول‌پیکر) *Conyza canadensis* (پیربهار) *Xanthomonas* spp. (توق معمولی)	رشد را مهار می‌کند و باعث ایجاد بیماری پوسیدگی سیاه می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Boyette, and Hoagland, 2013, 2015; Papaianni *et al*., 2020

از زمان شناسایی، این سویه‌ها به عنوان علف‌کش زیستی در ژاپن با نام Camperico™ فرموله شده‌اند (Imaizumi *et al*., 1997؛ Boyette and Hoagland, 2015). با این حال علی‌رغم موفقیت در کنترل علف‌های هرز منتخب (جدول ۱)، تحقیقات بیشتر نشان می‌دهد که این علف‌کش زیستی به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار داشته و برای حفظ سطح کشندگی بیش از ۶۰ درصد به یک دوره شبنم ۲۵ درجه سلسیوس نیاز دارد (Boyette and Hoagland, 2015). در این راستا، ارزیابی شرایط محیطی مختلف، مانند

اقلیم، رطوبت و دما مؤثر بر موفقیت علف‌کش‌های زیستی انتخاب شده برای تحقیقات آتی ارزشمند است (Boyette and Hoagland, 2015). این اطلاعات برای مدیران مزرعه با حصول اطمینان از اینکه می‌توانند بالاترین میزان موفقیت را در حین استفاده از این محصولات به‌دست آورند، دارای ارزش منحصر به فردی خواهد بود.

در چند منبع دیگر، باکتری‌هایی از جمله *Curtobacterium* sp. (MA01) (Pugazhendhi *et al*., 2019)، *Pseudomonas fluorescens* (سویه D7) (Gealy *et al*., 1996؛ Kennedy, 2018)، *P. fluorescens* (سویه WH6) (Banowetz *et al*., 2008؛ Halgren *et al*., 2013)، *P. fluorescens* (سویه BRG100) (Quail *et al*., 2002) و *P. viridiflava* (سویه CDRTC14) (Samad *et al*., 2017) نشانه‌های امیدوارکننده‌ای برای سرکوب علف‌های هرز مختلف نشان داده و لذا امکان استفاده از آنها به‌عنوان علف‌کش زیستی وجود دارد (جدول ۱).

علی‌رغم تمام این دستاوردها، توجه به این نکته مهم ضروری است که احتمالاً بسیاری از علف‌کش‌های زیستی مبتنی بر باکتری، در مقایسه با علف‌کش‌های مصنوعی به زمان بیشتری برای مهار علف‌های هرز نیاز داشته باشند (Kennedy, 2018). برای مثال، مشخص شده است که *P. fluorescens* به پنج تا هفت سال برای سرکوب علف‌های هرز مستقر در یک منطقه نیاز دارد، رویکردی که بسیار زمان‌بر و پرهزینه است؛ ضمن آنکه بر علف‌های هرز بومی مناطق پیرامونی نیز اثر منفی می‌گذارد (Banowetz *et al*., 2008)، بنابر این یافته‌ها باکتری مورد نظر از پتانسیل کافی به‌عنوان یک علف‌کش زیستی برخوردار نبوده و مستلزم رفع محدودیت‌های اقتصادی، زمان و اثرات زیست محیطی است.

همچنین به مطالعات بیشتری در زمینه استفاده تلفیقی از علف‌کش‌های زیستی باکتریایی با سایر اقدامات مدیریتی مانند شعله‌افکن، گیاه‌خواری یا کنترل مکانیکی نیاز است. با این حال علی‌رغم چشم‌انداز موفقیت‌آمیز استفاده از علف‌کش‌های باکتریایی، این احتمال وجود دارد که در مهار علف‌های هرز نتایج رضایت بخشی فراهم نگردد. در این رابطه، شواهد پایک و همکاران (Pyke *et al*., 2019) نشان داد که علف پشمکی (*Bromus tectorum* L) در کشت بومی پس از سوزاندن بقایای زراعی، با یک علف‌کش باکتریایی حاصل از *P. fluorescens* مهار نگردید. با وجود این پیچیدگی، به دلیل نتایج ناشناخته حاصل از برهمکنش علف‌کش‌های زیستی با سایر اقدامات مدیریتی، به تحقیقات آتی در این زمینه نیاز است. در عین حال، بسیاری از برنامه‌های مدیریت تلفیقی علف‌های هرز اطمینان بیشتری را در مدیریت طولانی‌مدت و پایدار علف‌های هرز فراهم می‌کنند (Hussain *et al*., 2021).

قارچ‌ها (علف‌کش‌های قارچی)

توسعه علف‌کش‌های زیستی مبتنی بر قارچ موفقیت فزاینده‌ای در کنترل علف‌های هرز مختلف نشان داده است (جدول ۲) (Charudattan *et al*., 1986؛ Dumas *et al*., 1997؛ Boyette *et al*., 2019؛ Nandhini *et al*., 2019؛ Galea, 2021). دستاوردها در این زمینه به دهه ۱۹۵۰ باز می‌گردند، زمانی که هاگ‌های قارچ *Alternaria cuscutacidae* به صورت انبوه تولید و به منظور مدیریت گونه انگل سس *Cuscuta* spp فرموله گردید (Pacanoski, 2015). پس از آن زمان، علف‌کش‌های قارچی (Mycoherbicides) متعددی در استرالیا، کانادا، چین، آفریقای جنوبی، هلند و ایالات متحده آمریکا تولید و به‌صورت تجاری در دسترس قرار گرفته‌اند (Charudattan *et al*., 1986؛ Dumas *et al*., 1997؛ Boyette *et al*., 2019؛ Nandhini *et al*., 2019؛ Galea, 2021). از میان این محصولات، BioChon™ (Dumas *et al*., 1997)، Chontrol™/Ecoclear™ (Charudattan, 2005)، Myco-Tech™ (Charudattan, 2005) و Stumpout® (Green, 2003) برای کنترل علف‌های هرز چوبی توسعه یافته‌اند (جدول ۲). این علف‌کش‌های قارچی که اغلب از طریق خمیر میسیلیوم روی کنده (ریشه) بریده علف‌های هرز مورد استفاده قرار می‌گیرند، در نهایت سیستم آوندی گیاه را با میسیلیوم‌هایی که به‌شدت در حال رشد هستند مسدود می‌کنند، سپس از جوانه‌زنی مجدد آن جلوگیری کرده و تجزیه آن را افزایش می‌دهند (Dumas *et al*., 1997؛ Charudattan, 2005).

از آنجایی که برش مکانیکی گیاه نزدیک به سطح زمین قبل از استفاده از علف‌کش‌های قارچی مورد نیاز است (Bailey, 2010 Bailey, 2014؛)، چنین رویکردی در مواجهه با آلودگی‌های وسیع بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. برای مبارزه با این مشکل، یک علف‌کش قارچی تزریقی ساقه اخیراً به شکل کپسول در دسترس قرار گرفته است که می‌تواند به صورت مکانیکی از طریق سوراخی در ساقه در گیاه مورد نظر منتشر شود (Galea, 2021). این علف‌کش زیستی که تحت نام Di-Bak Parkinsonia™ تجاری شده است، موفقیت بالایی در کنترل علف هرز پارکینسونیا (*Parkinsonia aculeata* L) از طریق فرمولاسیون قارچ‌های *Lasiodiplodia pseudotheobromae*، *Macrophomina phaseolina* و *Neoscytalidium novaehollandiae* به‌دست آورده است (Galea, 2021). این روش نه تنها استفاده از علف‌کش‌ها را در محیط محدود کرده و نیاز به قطع و حذف فیزیکی گیاه را کاهش می‌دهد، بلکه علف‌کش قارچی پس از استقرار، می‌تواند از طریق جمعیت علف هرز هدف انتشار یافته و از انتشار بذور علف هرز در بانک بذر گیاه زراعی جلوگیری نماید (Galea, 2021). بنابراین تحقیقات آتی برای بررسی طیف وسیعی از علف‌کش‌های قارچی که ممکن است به صورت کپسولی به سایر علف‌های هرز چوبی تزریق شوند، ارزشمند خواهد بود، با ذکر این نکته که بزرگترین چالش برای این رویکرد، شناسایی علف‌کش‌های قارچی مناسبی است که قادر به عمل به این روش بدون تأثیر بر گونه‌های بومی مجاور باشند.

منابع نشان می‌دهند که قارچ‌هایی از جنس Colletotrichum یکی از پرمصرف‌ترین گونه‌های مورد استفاده در فرمولاسیون‌های علف‌کش‌های قارچی هستند (Butt and Copping, 2000؛ Vieira *et al*., 2018؛ Andersen and Walker, 1985؛ Fernando *et al*., 1996). پیشرفت‌های تحقیقاتی اولیه با استفاده از این جنس منجر به تولید چندین علف‌کش قارچی (جدول ۲) از جمله BioMal® (منشأ گرفته از *C. gloeosporioides* f. sp. *malvae*) (Boyetchko *et al*., 2007)، Collego™/LockDown™ (منشأ گرفته از *C. gloeosporioides* f. sp. *aeschynomene*) (Boyette *et al*., 2019)، Lubao1 و Lubao2 (منشأ گرفته از *C. gloeosporioides*) (Nandhini *et al*., 2019)، Velgo® (منشأ گرفته از *C. coccodes*) (Andersen and Walker, 1985) و *C. truncatum* (هنوز به صورت تجاری توسعه نیافته است) (Vieira *et al*., 2018) شد. اگرچه این جنس از قارچ‌ها در کنترل علف‌های هرز مختلف در سراسر جهان موفقیت‌هایی نشان داده‌اند، اما بسیاری از این محصولات نتوانسته‌اند به دلایل مختلف به بازار عمومی راه پیدا کنند؛ علل مطرح شده عبارتند از (۱) اغلب گران‌تر از علف‌کش‌های مصنوعی هستند، (۲) موفقیت آن‌ها اغلب در مقایسه با علف‌کش‌های مصنوعی کمتر تضمین شده است و (۳) محدوده عملکرد کوچکی دارند (Zimdahl, 2018)؛ این محدودیت‌ها همچنین در چندین علف‌کش قارچی توسعه یافته دیگر مانند Casst™ (منشأ گرفته از *Alternaria cassiae*) (Charudattan *et al*., 1986)، DeVine® (منشأ گرفته از *Phytophthora palmivora*) (Ridings, 1986)، Dr. Biosedge® (منشأ گرفته از *Puccinia canaliculata*) (Phatak *et al*., 1983)، Sarritor™ (منشأ گرفته از *Sclerotinia minor*) (Abu-Dieyeh and Watson, 2007)، Smolder® (منشأ گرفته از *Alternaria destruens*) (Aneja and Mehrotra, 2011) و Woad Warrior® (منشأ گرفته از *Puccinia thalaspeos*) (Bailey, 2014) (جدول ۲) ذکر شده است. در این راستا، تحقیقات آتی باید به دنبال توسعه علف‌کش‌های قارچی با توانایی مدیریت طولانی مدت علف‌های هرز به‌طور پایدار و اقتصادی باشد. این امر می‌تواند با (۱) بهبود هزینه و تولید این محصولات برای استفاده در مقیاس وسیع، (۲) ترویج، تشویق و آموزش مدیران مزرعه برای استفاده از علف‌کش‌های قارچی، (۳) کاهش خطر آسیب محیطی به گونه‌های مجاور و (۴) بهبود کارایی برخی محصولات موجود حاصل شود (Hasan *et al*., 2021؛ Duke *et al*., 2022).

در این راستا، طی پیشرفت‌های اخیر، چند نوع قارچ دیگر با پتانسیل فرموله شدن به‌عنوان علف‌کش قارچی شناسایی شده‌اند که هنوز به بازار تجاری راه نیافته‌اند (جدول ۲). تعدادی از این قارچ‌ها عبارتند از: *Albifimbria verrucaria* (به‌طور رسمی *Myrothecium verrucaria*) (Weaver *et al*., 2021)، *Fusarium oxysporum* (Kakhaki *et al*., 2017)، *Gibbago trianthemae* (Félix-Gastélum *et al*., 2021)، *Phoma*

(Hynes, 2018) *Phoma macrostoma* Montagne 94–44B ،(Cimmino *et al*., 2013) *chenopodicola*، (Reichert *et al*., 2019) *Trichoderma koningiopsis* ،(Kotzé *et al*., 2015) *Pseudolagarobasidium acaciicola* و (Zhu *et al*., 2020) *Trichoderma polysporum*.

جدول ۲- علف‌کش‌های زیستی قارچی و اثرات آنها بر علف‌های هرز هدف

Table 2. Fungal bioherbicides and their impacts on targeted weeds

منابع Reference	نام تجاری Commercial Name	نحوه عمل Mode of Action	علف‌های هرز هدف Target Weed(s)	منبع قارچ
Charudattan *et al*., 1986	Casst™ (USA) عدم دسترسی مجدد در بازار	باعث سوختگی برگ انگل و خسارت به گیاه می‌شود.	*Cassia obtusifolia* (بند داسی), *Cassia occidentalis* (قهوه سنا), *Crotalaria spectablis* (کروتالاریای خوش نما)	*Alternaria cassiae*
Aneja *et al*., 2013; Aneja and Mehrotra, 2011	Smolder® (USA) عدم دسترسی مجدد در بازار	مانع رشد و نمو گیاه می‌شود.	*Cuscuta* spp. (سس)	*Alternaria destruens*
Hoagland *et al*., 2007; Weaver *et al*., 2021	عدم دسترسی به صورت تجاری	از جوانه‌زنی بذر و رشد اولیه گیاه جلوگیری می‌کند.	*Pueraria lobate* (کودزو)	*Albifimbria verrucaria*, formally *Myrothecium verrucaria*
Dumas *et al*., 1997	BioChon™ (The Netherlands) عدم دسترسی مجدد در بازار	از جوانه‌زنی کنده‌ها جلوگیری می‌کند و پوسیدگی چوب را افزایش می‌دهد.	*Prunus serotina* (گیلاس سیاه یا وحشی)	*Chondrostereum purpureum*
Bailey *et al*., 2010; Charudattan, 2005	Chontrol™/EcoClear™/ MycoTech™	باعث پوسیدگی کنده می‌شود و از جوانه‌زنی جلوگیری می‌کند.	چوب‌های سخت و درختان و درختچه‌های برگریز	*Chondrostereum purpureum*
Butt and Copping, 2000; Andersen and Walker, 1985	Velgo® (Canada) عدم دسترسی مجدد در بازار	باعث خسارت تلقیح شده و از رشد و تولید گیاه جلوگیری می‌کند.	*Abutilon theophrasti* Medicus (گاوپنبه)	*Colletotrichum coccodes*
Morris *et al*., 1999; Wan and Wang, 2001	Lubao 1 and Lubao 2 (China) دسترسی محدود	باعث سرایت شدید و بیماری لکه برگی در گیاه می‌شود.	*Echinochloa crus-galli* (سوروف) *Cuscuta chinensis* Lamarck (سس چینی) *Cuscuta australis* R. Brown (سس استرالیایی)	*Colletotrichum gloeosporioides*
Bailey, 2014; Cordeau *et al*., 2016	Collego™/LockDown™	باعث ایجاد زخم‌های آنتراکنوز روی ساقه گیاهان می‌شود.	*Aeschynomene virginica* (ماشک زانویی) *Aeschynomene indica* (ماشک زانویی هندی) *Sesbania exaltata* (کنف سبانیا)	*Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *aeschynomene*
Mortensen, 1988	BioMal® (Canada) عدم دسترسی مجدد در بازار	باعث ایجاد زخم‌هایی در گل‌ها، برگ‌ها و ساقه‌های گیاه می‌شود.	*Malva pusilla* (پنیرک)	*Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *malvae*
Vieira *et al*., 2018	عدم دسترسی به صورت تجاری	از رشد گیاه و جوانه‌زنی بذر جلوگیری می‌کند.	*Bidens pilosa* (علف گدا)	*Colletotrichum truncatum*
Green, 2003	Stumpout™	تجزیه کنده‌ها و ریشه‌ها را تسریع می‌کند.	*Acacia mearnsii* (جگن سیاه), *Acacia pycnantha* (جگن طلایی), *Poa annua* (چمن یک‌ساله)	*Cylindrobasidium laeve*
Kakhaki *et al*., 2017	عدم دسترسی به صورت تجاری	باعث ایجاد زخم‌هایی روی برگ‌ها می‌شود.	*Orobanche* spp. (گل جالیز)	*Fusarium oxysporum* f. sp. *orthoceras*

ادامه جدول ۲-

منابع Reference	نام تجاری Commercial Name	نحوه عمل Mode of Action	علف‌های هرز هدف Target Weed(s)	منبع قارچ
Daniel *et al*., 2018	عدم دسترسی به صورت تجاری	باعث کلروز و نکروز می‌شود.	*Cucumis sativus* L. (خیار) *Sorghum bicolour* L. (ارزن عالی)	*Fusarium fujikuroi* Sawada.
Félix-Gastélum *et al*., 2020	عدم دسترسی به صورت تجاری	باعث سوختگی ساقه و بیماری لکه برگی می‌شود.	*Trianthema portulacastrum* (خرفه اسبی)	*Gibbago trianthemae*
Galea, 2021	Di-Bak Parkinsonia™	سموم و آنزیم‌های مضر تولید می‌کند که مکانیسم‌های دفاعی گیاهان را خنثی می‌کند و منجر به تخریب سلول و بافت می‌شود.	*Parkinsonia aculeata* (پارکینسونیا)	*Lasiodiplodia pseudotheobromae*, *Macrophomina phaseolina* and *Neoscytalidium novaehollandiae*
Cimmino *et al*., 2013	عدم دسترسی به صورت تجاری	باعث ایجاد زخم‌های نکروزه گسترده می‌شود.	*Chenopodium album* (سلمه‌تره)	*Phoma chenopodicola*
Hynes, 2018	Phoma®	کلونیزه شده و به سیستم ریشه منتقل می‌گردد که باعث می‌شود میسلیوم مانع جذب مواد غذایی شود..	علف های هرز پهن برگ مانند *Taraxacum officinale* (گل قاصدک)	*Phoma macrostoma* Montagne 94–44B
Ridings, 1986	DeVine® (USA) عدم دسترسی مجدد در بازار	باعث عفونت ریشه در گیاه شده که منجر به مرگ آن می‌شود.	*Morrenia odorata* (انگور علف شیری)	*Phytophthora palmivora*
Kotzé *et al*., 2015	عدم دسترسی به صورت تجاری	باعث تلفات بذر و مرگ گیاه می‌شود.	*Acacia cyclops* (جگن ساحلی)	*Pseudolagarobasidium acaciicola*
Phatak *et al*., 1983	Dr. Biosedge® (USA) عدم دسترسی مجدد در بازار	از فرآیند تولیدمثل و جوانه‌زنی بذر در گونه جلوگیری می‌کند.	*Cyperus esculentus* (اویارسلام زرد)	*Puccinia canaliculata*
Bailey, 2014	Woad Warrior®	بوته‌های سال اول را آلوده می‌کند و گلدهی و تشکیل بذر را در سال بعد تحت تأثیر قرار می‌دهد.	*Isatis tinctoria* (ایساتیس)	*Puccinia thalaspeos*
Abu-Dieyeh and Watson, 2007	Sarritor™	جذب بافت گیاهی می‌شود.	*Araxacum officeinale* (قاصدک), پهن برگ	*Sclerotinia minor*
Reichert *et al*., 2019	عدم دسترسی به صورت تجاری	مواد آنزیمی (سلولاز و لیپاز) را افزایش می‌دهد که باعث افزایش خسارت به گیاه می‌شود.	*Euphorbia heterophylla* (فرفیون مکزیکی)	*Trichoderma koningiopsis*
Zhu *et al*., 2020	عدم دسترسی به صورت تجاری	چندین متابولیت ثانویه تولید می‌کند که دارای فعالیت ضد قارچی بوده و از رشد و جوانه‌زنی گیاه جلوگیری می‌کند.	*Avena fatua* (یولاف وحشی) *Chenopodium album* (سلمه‌تره) *Elsholtzia densa* (نعناع متراکم هیمالیا) *Lepyrodiclis holosteoides* (علف مرغ دندانه دار کاذب) *Polygonum aviculare* (علف هفت‌بند) *Polygonum lapathifolium* (هفت‌بند برگ بیدی)	*Trichoderma polysporum* (Louk: Fr.) Rifai.

فرآورده‌های گیاهی (پیام‌رسان‌های شیمیایی و اسانس‌ها)

فیتوتوکسین‌های حاصل شده از گیاهان که در دو گروه پیام‌رسان‌های شیمیایی Allelochemicals و اسانس‌ها Essential oils دسته‌بندی می‌شوند، پتانسیل و موفقیت بالایی در کنترل علف‌های هرز مختلف نشان داده‌اند (جدول ۳). مزایای گزارش شده برای این ترکیبات در مقایسه با علف‌کش‌های مصنوعی عبارتند از زیست تخریب‌پذیری، تنوع در نحوه عمل و بی‌خطر بودن برای سلامت انسان و گونه‌های غیرهدف (Anese *et al*., 2015). آللوکمیکال‌ها، متابولیت‌های ثانویه‌ای هستند که توسط یک گیاه تولید شده و در گیاه دیگر باعث بروز واکنش‌های شدیدی در ترکیب و نحوه عملکرد آنزیم‌ها، ژنتیک، هورمون‌ها و فرآیندهای متابولیکی می‌گردند. این اثرات در نهایت باعث تنش شدید گیاه و مرگ تدریجی خواهند شد (Anwar *et al*., 2021). طی آزمایش‌ها و پیشرفت‌ها در این زمینه چند گونه گیاهی با پتانسیل فرموله شدن به‌عنوان یک علف‌کش زیستی شناسایی شده‌اند (جدول ۳). این یافته‌ها عبارتند از مواد شیمیایی آللوپاتیک حاصل از باقلا هندی (*Canavalia ensiformis* de Candolle) (۵۰ گرم در لیتر) (Mendes and Rezende, 2014)، کنگر (*Cirsium setosum* L.) (ایزوله HL-1) (Cheng *et al*., 2021)، کنگر فرنگی خاردار (*Cynara cardunculus* L.) (اتانول + عصاره‌های برگی خشک شده به‌وسیله انجماد سخت) (Ben Kaab *et al*., 2020)، گردو سیاه (*Juglans nigra* L.) (غلظت بیش از ۴۲/۹ درصد) (Shrestha, 2009)، شاهپسند (*Lantana camara* L.) (Anwar *et al*., 2021)، ریحان شیرین (*Ocimum basilicum* L.) (Mekky *et al*., 2019) و ارزن عالی (*Sorghum bicolor* L.) (Jesudas *et al*., 2014). در حالی‌که کل این منابع در کنترل علف‌های هرز مختلف موفق بوده‌اند (جدول ۱-۳)، در اینجا ذکر این نکته ضروری است که به تحقیقات بیشتری زمینه استفاده طولانی مدت و مکرر آن‌ها در بوم‌نظام‌های کشاورزی و طبیعی نیاز است. به‌طور خاص، در تحقیق روی آللوکمیکال‌ها می‌بایست فعالیت سمی گیاهی (گیاه‌سوزی)، تأثیر بر گونه‌های اطراف، ساختار شیمیایی، نحوه عمل و توانایی تجاری‌سازی ایمن و پایدار آنها در نظر گرفته شود (Bhowmik and Inderjit, 2003؛ Soltys *et al*., 2013).

اسانس‌های استخراج شده از گیاهان نیز به‌عنوان علف‌کش زیستی برعلیه چند گونه علف هرز موفق بوده‌اند (جدول ۳) (Batish *et al*., 2007؛ Benchaa *et al*., 2018؛ Almarie, 2021؛ Travlos *et al*., 2020). اسانس‌ها را می‌توان از پوست گیاه، گل‌ها، میوه‌ها، برگ‌ها، ریشه‌ها یا از کل گیاه استخراج کرد (Zanellato *et al*., 2009). این ترکیبات می‌توانند خسارت شدیدی به DNA، فرآیندهای بیوشیمیایی و عملکردهای سلولی پوشش گیاهی مورد نظر وارد کرده و در نهایت باعث مرگ تدریجی گیاه گردند (Zanellato *et al*., 2009). تحقیقات نشان داده است که از سال ۲۰۲۰، علف‌کش‌های زیستی متعددی با تکیه بر اسانس‌ها به‌صورت تجاری در دسترس بوده‌اند که عبارتند از Avenger Weed Killer® (۷۰ درصد دی‌لیمونن)، GreenMatch® (۵۵ درصد دی‌لیمونن)، GreenMatchEX® (۵۰ درصد روغن علف‌لیمو)، Weed Slayer® (۶ درصد اوژنول)، WeedZap® (۴۵ درصد روغن میخک و ۴۵ درصد روغن دارچین) و Bioweed™ (۱۰ درصد روغن کاج + شکر) (McLaren *et al*., 2014). اخیراً علف‌کش زیستی دیگری به نام Weed Lock® نیز در مالزی به‌عنوان یک علف‌کش زیستی غیرانتخابی برای طیف وسیعی از گونه‌های علف‌هرز به‌کار گرفته شده است (Hasan *et al*., 2021). این علف‌کش زیستی توسعه یافته از طریق شاخ و برگ جذب شده و باعث کلروز و پژمرده شدن گیاه مورد نظر طی تنها چند ساعت پس از کاربرد می‌شود (Hasan *et al*., 2021). علیرغم موفقیت‌های اولیه، از این علف‌کش تنها می‌توان در مقیاس بسیار محدود استفاده کرد و هرگز برای کنترل علف‌های هرز در مقیاس وسیع از نظر اقتصادی پایدار نیست (Hasan *et al*., 2021).

اسانس‌های دیگر با نتایج امیدوارکننده به‌عنوان علف‌کش زیستی عبارتند از *Corymbia citriodora* Hooker، سابقاً *Eucalyptus citriodora* (صمغ معطر لیمو)، *E. globulus* Labillardière (صمغ آبی) (Almarie, 2021)، روغن مانوکا استخراج شده از *Leptospermum scoparium* Forster (درخت مانوکا) (Travlos *et al*., 2020) و روغن کاج (غلظت ۱۰ درصد + شکر) (McLaren *et al*., 2014). به‌علاوه، چندین ترکیب از اسانس‌های سیترونلا، میخک، علف لیمو، پرتقال، روغن کاج، آویشن و چندین گونه اکالیپتوس اثرات علف‌کش زیستی نسبی بر بسیاری از گونه‌های گیاهی نشان

داده‌اند (McLaren *et al.*, 2014). نیاز به بررسی فرمولاسیون این اسانس‌ها و شناسایی گونه‌های گیاهی آن‌ها به منظور استفاده به عنوان علف‌کش زیستی در مطالعات آتی احساس می‌شود.

جدول ۳- علف‌کش‌های زیستی گیاهی و اثر آنها بر علف‌های هرز هدف

Table 3. Plant-sourced bioherbicides and their impact on targeted weeds.

	منبع گیاهی	علف‌های هرز هدف Target Weed(s)	گیاه مورد آزمایش Tested plant	نحوه عمل Mode of Action	نام تجاری Commercial Name	منابع Reference
آللوکمیکال‌ها	عصاره *Canavalia ensiformis* (۵۰ گرم در لیتر)	*Commelina benghalensis* (گل روز بنگال) *Ipomoea grandifolia* (نیلوفرپیچ کوچک)	سویا	باعث ممانعت از رشد و نمو گیاه می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Mendes and Rezende, 2014
	Irsium setosum (ایزوله HL-1)	*Chenopodium album* (سلمه تره) *Galium aparine* (گالیوم) *Malva crispa* (گل خطمی چینی) *Polygonum lapathifolium* (هفت‌بند برگ بیدی)	گندم، باقلا، کلزا، نخود فرنگی، جو	سطوح بالایی از فیتوتوکسین‌ها را ایجاد می‌کند که از جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه جلوگیری می‌کنند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Cheng *et al*., 2021
	Cynara cardunculus (اتانول + عصاره برگ خشک شده به وسیله انجماد سخت)	*Amaranthus retroflexus* (تاج‌خروس ریشه‌قرمز) *Anagallis arvensis*،(آناغالیس دشتی) *Phalaris minor* (علف خونی) *Portulaca oleracea* (خرفه) *Stellaria media* (گندمک) *Sylibum marianum* (خار مریم) *Trifolrim incarnateum* (شبدر کربسمون)	گیاهان دارویی و معطر (بدون ذکر نام مشخصی از گیاه مورد آزمایش)	تنش اکسیداتیو را القا می‌کند و وظایف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی درون سلول‌های گیاهی را مختل می‌کند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Ben Kaab *et al*., 2020b; Scavo *et al*., 2019
	عصاره *Juglans nigra* (گردو سیاه) (غلظت بیش از ۴۲/۹ درصد)	*Convolvulus arvensis* (پیچک صحرایی) *Conyza bonariensis* (پیربهار آمریکایی) *Conyza canadensis* (پیربهار کانادایی) *Echinochloa crus-galli* (سوروف) *Ipomoea purpurea* (نیلوفرپیچ بلند) *Portulaca oleraceae* (خرفه) *Solanum nigrum* (تاج‌ریزی سیاه)	گیاهان باغی (بدون ذکر نام مشخصی از گیاه مورد آزمایش)	مهار فعالیت H^+-ATPase باعث کاهش فتوسنتز و کاهش تولید ریشه، برگ و لپه می‌شود.	NatureCur® (USA) دسترسی محدود	Shrestha, 2009
	عصاره‌های سرد و گرم *Lantana camara*	*Avena fatua* (یولاف وحشی) *Euphorbia helioscopia* (فرفیون) *Phalaris minor* (علف خونی) *Rumex dentatus* (ترشک دندانه‌دار)	گندم	ترکیبات آللوپاتیک (معطر) موجود در گیاه باعث جلوگیری از رشد و جوانه‌زنی گیاه می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Anwar *et al*., 2021
	عصاره‌های *Ocimum basilicum*	*Amaranthus* spp. (تاج خروس) *Portulaca* spp. (خرفه)	سویا	از جوانه‌زنی، رشد و ازدیاد طول ریشه و ساقه جلوگیری می‌کند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Mekky *et al*., 2019
	Sorghum bicolor (ارزن عالی)	*Amaranthus retroflexus* (تاج‌خروس ریشه‌قرمز) *Ambrosia artemisiifolia* (آمبروژیا) *Cassia obtusifolia* (پای داسی) *Coronopus didyum* (شاهی) *Cyperus rotundus* (اویارسلام ارغوانی)، *Phalaris minor* (علف خونی)	ذرت خوشه‌ای	با تغییر جذب املاح و مولکول‌های آب، دستگاه فتوسنتزی را مهار می‌کند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Jesudas *et al*., 2014

ادامه جدول ۳-

	منبع گیاهی	علف‌های هرز هدف Target Weed(s)	گیاه مورد آزمایش Tested plant	نحوه عمل Mode of Action	نام تجاری Commercial Name	منابع Reference
اسانس‌ها	*Corymbia citriodora*، قبلاً روغن *Eucalyptus citriodora* (غلظت ۰/۰۳ درصد)	*Avena fatua* (یولاف وحشی) *Sinapis arvensis*(خردل وحشی) *Sonchus oleraceus*(شیرتیغی)	گیاهان باغی (بدون ذکر نام مشخصی از گیاه مورد آزمایش)	بر کلروفیل II و غشاهای سلولی تأثیر می‌گذارد و باعث ایجاد اختلال در کلروفیل II و سلول می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Benchaa *et al*., 2018
	Corymbia citriodora قبلاً روغن *Eucalyptus citriodora* (غلظت ۰/۰۶ درصد)	*Amaranthus viridis* (تاج‌خروس باریک) *Bidens pilosa* (بلک جک) *Leucaena leucocephala* (درخت سرب) *Rumex nepalensis* (ترشک)	گندم	با تأثیر بر متابولیسم فتوسنتزی و تنفسی از جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه جلوگیری می‌کند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Batish *et al*., 2007
	Corymbia citriodora، قبلاً روغن *Eucalyptus citriodora* (غلظت ۵ نانولیتر میلی‌لیتر)	*Parthenium hysterophorus* (پارتنیوم)	گیاهان باغی	باعث نشت سریع الکترولیت می‌شود که بر یکپارچگی غشاء تأثیر می‌گذارد.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Singh *et al*., 2005
	روغن *Eucalyptus globulus* + روغن *Syzygium aromaticcum* (میخک) (غلظت ۱۰ درصد)	*Chenopodium album* (سلمه‌تره) *Melilotus indicus* (شبدر شیرین هندی) *Raphanus raphanistrum* (تربچه وحشی) *Sisymbrium irio* (خاکشیر تلخ)	شرایط مزرعه‌ای (بدون ذکر نام مشخصی از گیاه مورد آزمایش)	باعث نشت سریع الکترولیت و از هم‌گسیختگی غشای سلولی می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Almarie, 2021
	روغن *Eucalyptus citriodora* با رایحه لیمو (غلظت ۰/۰۷ درصد)	*Phalaris minor* (علف خونی)	گندم	بر توانایی فتوسنتزی و تنفسی گیاهان تیمار شده تأثیر می‌گذارد.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Batish *et al*., 2007
	مخلوط روغن مانوکا از *Leptospermum scoparium* (درخت مانوکا)	*Avena sterilis* (یولاف استریل) *Galium aparine* (بی‌تی‌راخ) *Lolium rigidum* (چچم سخت)	گندم	بی‌تریکتون‌های طبیعی از بیوسنتز توکوکرومانول‌ها و پرنیل‌کینون‌ها جلوگیری می‌کنند.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Dayan *et al*., 2011; Travlos *et al*., 2020
	روغن کاج (غلظت ۱۰ درصد) + شکر	*Nassella trichotoma* (چنار دندانه‌دار) و سایر علف‌های هرز علفی و باریک‌برگ	گیاهان گلخانه‌ای (بدون ذکر نام مشخصی از گیاه مورد آزمایش)	از جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه جلوگیری می‌کند.	Bioweed™	McLaren *et al*., 2014

ویروس‌ها

علف‌کش‌های زیستی مبتنی بر عامل بیماری‌زای ویروسی، موفقیت و سازگاری متفاوتی برای کنترل علف‌های هرز نشان داده‌اند (جدول ۴) و از بین فرمولاسیون‌های ذکر شده مناسب برای این کار، یکی از موفق‌ترین و امیدوارکننده‌ترین منابع، ویروس موزائیک سبز ملایم توتون (TMGMV) است (Diaz *et al*., 2014؛ Charudattan *et al*., 2020). این ویروس موفقیت بالایی در کنترل تاج‌ریزی (*Solanum viarum* Dunal) در فلوریدا (ایالات متحده آمریکا) نشان داده است، زیرا می‌تواند باعث ضایعات موضعی نکروزه و پاسخ حساسیت بیش از حد در

گونه و در نهایت مرگ گیاه طی ۲۰ تا ۵۰ روز گردد (Charudattan *et al*., 2020؛ Diaz *et al*., 2014). همچنین ذکر این نکته مهم است که مواد مسری (واگیردار) ویروسی حاوی اسید نوکلئیک (DNA یا RNA) هستند و باید از طریق صدمات ماکروسکوپی یا میکروسکوپی به سلول‌های زنده وارد شوند (Singh *et al*., 2005). در این راستا، TMGMV باید با یک مویان (افزودنی) کربوراندوم و ارگانوسیلیکون فرموله شود تا به نفوذ آن در گیاه کمک کند و همچنین باید از طریق کاربرد سایشی و پاششی، سمپاش‌های فشار بالا (بیش از ۸۰ پوند بر اینچ مربع) یا کاربرد مالشی استفاده شود (Charudattan *et al*., 2020؛ Charudattan and Hiebert, 2007). TMGMV می‌تواند در صورت ترکیب با چندین علف‌کش مصنوعی همچنان مسری باقی بماند، بنابراین در یک ترکیب مناسب با سایر علف‌کش‌ها ممکن است سطح بالاتری از مهار علف‌های هرز رافراهم کند (Ferrell *et al*., 2008). ویروس موزائیک آرائوجیا (AMV) نیز به‌عنوان یک علف‌کش زیستی بالقوه امیدوارکننده برای کنترل بید علفی (*Araujia hortorum* Brotero) در نیوزیلند گزارش شده است (Elliott *et al*., 2009). این ویروس باعث ایجاد علائم موزائیک و انحراف برگ شده که منجر به مرگ گیاه می‌شود (Elliott *et al*., 2009). علی‌رغم موفقیت AMV به‌عنوان علف‌کش زیستی امیدبخش، اما می‌تواند به گونه‌های غیرهدف و به‌خصوص گیاهان میزبان پروانه سلطان *Danaus plexippus* L. نیز آسیب برساند (Elliott *et al*., 2009). در این خصوص باید به این نکته توجه داشت که AMV در حال حاضر به‌عنوان علف‌کش زیستی مناسب در نظر گرفته نمی‌شود، مگر اینکه اصلاح ژنتیکی بیشتری برای محدود کردن انتقال به سایر گونه‌ها انجام شود؛ چنین کاری به‌طور گسترده پذیرفته نشده و احتمالاً بسیار پرهزینه است (Elliott *et al*., 2009). ویروس جغجغه مانند تنباکو، ویروس موزائیک فلفل (ویروس فلفل اوبودا) و ویروس موزائیک پپینو نیز پتانسیل کنترل علف‌های هرز مختلف را در صورت فرموله شدن به‌عنوان علف‌کش زیستی نشان داده‌اند (جدول ۴) (Forray *et al*., 2004؛ Kazinczi *et al*., 2006؛ Kollmann *et al*., 2007). برای کاربرد موفقیت‌آمیز و مطمئن این ویروس‌ها به‌عنوان علف‌کش زیستی، به تحقیقات بیشتری برای تعیین نحوه کاربرد، ویژگی میزبان و فرمولاسیون آن‌ها مورد نیاز است.

جدول ۴- علف‌کش‌های زیستی ویروسی و اثر آنها بر علف‌های هرز هدف

Table 4. Viral bioherbicides and their impact on targeted weeds.

منبع ویروس	علف‌های هرز هدف Target Weed(s)	نحوه عمل Mode of Action	نام تجاری Commercial Name	منابع Reference
ویروس موزائیک آرائوجیا	*Araujia hortorum* (علف بید)	باعث ایجاد علائم موزائیک و انحراف برگ در گیاه می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Elliott *et al*., 2009
ویروس موزائیک فلفل (ویروس فلفل اوبودا)	*Solanum nigrum* (تاج‌ریزی سیاه)	باعث کاهش زیست‌توده و افزایش خواب بذر می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Kazinczi *et al*., 2006
ویروس جغجغه مانند تنباکو	*Impatiens glandulifera* (حنای هیمالیا)	باعث ایجاد لکه‌های نکروز بر روی گیاه می‌شود.	عدم دسترسی به صورت تجاری	Kollmann *et al*., 2007
ویروس موزائیک سبز ملایم تنباکو	*Solanum viarum* (تاج‌ریزی)	پاسخ حساسیت بیش از حد را در تاج‌ریزی ایجاد می کند و باعث ایجاد زخم‌های موضعی نکروزه می‌شود.	SolviNix™ LC و WP (کنسانتره مایع و پودر وتابل)	Diaz *et al*., 2014; Charudattan *et al*., 2020

دستاوردها، پیشرفت‌ها و چالش‌های آینده

دستاوردها و پیشرفت‌های اخیر در زمینه علف‌کش‌های زیستی منجر به ثبت بیش از ۲۲ فرمولاسیون مختلف برای کنترل علف‌های هرز شده است (جدول ۵). با وجود موارد متعددی از گونه‌های به ثبت رسیده و گونه‌های تحت فرمولاسیون، به نظر می‌رسد تقاضای پایین و هزینه‌های بالای تولید فرمولاسیون‌ها، موفقیت بلندمدت آن‌ها را محدود می‌کند (جدول ۵). در سال ۲۰۱۶، گزارش شد که ارزش بازار جهانی علف‌کش‌های زیستی ۱/۲۸ میلیارد دلار بوده است و با ادامه توسعه در این زمینه، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۴ سهم بازار خود را به ۴/۱۴ میلیارد دلار افزایش دهد (Grand View Research Inc, 2018؛ Hasan *et al*., 2021). اگرچه پیشرفت‌ها در این زمینه به وضوح مشهود است، اما همچنان وجود چالش‌های متعددی در مسیر تجاری‌سازی می‌تواند مانع موفقیت گسترده آنها شود

(DiTomaso *et al*., 2017؛ Hasan *et al*., 2021). در صورت رفع چنین موانعی امکان استفاده از علف‌کش‌های زیستی در سطح گسترده در درازمدت با توجیه اقتصادی و تضمین بازار تجاری فراهم می‌گردد.

یکی از موانع متعددی که استفاده و موفقیت علف‌کش‌های زیستی را محدود می‌کند، تأثیر شرایط محیطی است (Auld *et al*., 2003؛ Harding and Raizada, 2015؛ Aneja *et al*., 2017). عواملی که به شدت بر موفقیت یک علف‌کش زیستی تأثیر می‌گذارند عبارتند از: رطوبت، نوع خاک، دما، تابش‌های UV و کمیتی و کیفیت آب در دسترس (Auld *et al*., 2003). این عوامل بر فرآیند فرمولاسیون و عملکرد علف‌کش تأثیر گذاشته و در نهایت می‌توانند کارایی آن را در صورت استفاده مستقیم بر روی گیاه کاهش دهند (Auld *et al*., 2003). همچنین گزارش شده است که افزایش دما و سطح دی‌اکسیدکربن (CO_2) در اتمسفر، به دلیل سناریوهای پیش‌بینی شده تغییر اقلیم، احتمالاً به‌طور قابل توجهی پویایی جمعیت علف‌های هرز را در آینده تغییر می‌دهد (Cheng *et al*., 2021؛ Chauhan *et al*., 2017). در این راستا، راهبردهای فعلی مدیریت علف‌های هرز ممکن است به کنترل کافی در بسیاری از علف‌های هرز منتهی نشود؛ شواهد نشان می‌دهد افزایش غلظت CO_2 و دما منجر به بروز مقاومت فزاینده در برابر علف‌کش‌ها شده است (Sun *et al*., 2021؛ Barros *et al*., 2021). این موضوع به‌شدت از کاربرد و نیاز به بهبود مدیریت علف‌های هرز با تکیه بر علف‌کش‌های زیستی پشتیبانی می‌کند. پیش‌بینی می‌شود که سؤالات زیادی در رابطه با اثرات کلی و نحوه عملکرد علف‌کش‌های زیستی به دلیل تغییرات ساختاری و فیزیولوژیکی و سازگاری‌های تکاملی که ناگزیر در علف‌های هرز به دلیل تغییرات پیش‌بینی‌شده در اقلیم رخ می‌دهند، پدیدار شوند (Sun *et al*., 2021؛ Barros *et al*., 2021). این امر به‌طور جمعی یک راهبرد تحقیقاتی چند رشته‌ای را برای ارزیابی کارایی علف‌کش‌های زیستی در آینده نشان می‌دهد. در این راستا می‌توان اثر تغییرات اقلیمی بر عملکرد علف‌کش‌های زیستی منتخب را در مطالعات آتی مورد بررسی قرار داد.

یکی دیگر از موانع موفقیت علف‌کش‌های زیستی، فرمولاسیون و فرایند تجاری‌سازی است (Kremer, 2019؛ Harding and Raizada, 2015؛ Kazinczi *et al*., 2006). از آنجایی که این ترکیبات حاوی یک عامل زیستی زنده هستند، زیستایی و پایداری بسیاری از آنها می‌بایست به‌طور پیوسته حفظ شود (Kremer, 2019؛ Ben Kaab *et al*., 2020a)؛ این امر مستلزم دریافت اطلاعاتی در ارتباط با نحوه زنده‌مانی و اثربخشی این ترکیبات از مرحله تولید تا کاربرد است. در این راستا می‌بایست شرایط بهینه نگهداری هر علف‌کش زیستی به‌طور اختصاصی شناسایی گردد. به‌علاوه، هزینه‌های فزاینده مربوط به فرمولاسیون و تجاری‌سازی بسیاری از علف‌کش‌های زیستی باید در جهت استمرار استفاده از آن‌ها در سطح گسترده مورد توجه قرار گیرد (Hasan *et al*., 2021). این امر می‌تواند تا حدی با افزایش آگاهی آموزشی در مورد مزایا و استفاده از علف‌کش‌های زیستی، همراه با پیشرفت‌های انجام شده در فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های سمپاشی هوشمند، محقق شود (Duke *et al*., 2022).

به علت لزوم ثبت ترکیبات زیستی در آژانس حفاظت از محیط زیستی، قوانین ملی و دولتی نیز استفاده گسترده از علف‌کش‌های زیستی را محدود می‌کنند (Osadebe *et al*., 2021؛ DiTomaso *et al*., 2017؛ Auld *et al*., 2003). با توجه به تنوع قوانین مصوب در کشورهای مختلف، این روش اغلب پرهزینه بوده و روند توسعه را طولانی‌تر می‌سازد. به‌طور خاص، استفاده و سرمایه‌گذاری در علف‌کش‌های زیستی در استرالیا، کانادا و ایالات متحده آمریکا به‌طور قابل توجهی در مقایسه با بسیاری از کشورهای اروپایی بیشتر است (Cordeau *et al*., 2016؛ DiTomaso *et al*., 2017). بنابراین سطح محدود کار توسعه را می‌توان تا حدی نتیجه عدم اطمینان و در نتیجه تردید در استفاده از عوامل فعال بیولوژیکی در یک محیط کشاورزی یا طبیعی دانست (Cordeau *et al*., 2016). برای مبارزه با این ابهامات پیشنهاد می‌شود که طی همکاری دولت‌ها و سازمان‌های غیردولتی مناطقی که بیشترین نیاز به کاربرد علف‌کش‌های زیستی در آنها احساس می‌شود، شناسایی شده و به‌عنوان بستر تحقیقات کاربردی مورد استفاده قرار گیرند (Aneja *et al*., 2017).

جدول ۵- علف‌کش‌های زیستی موجود در بازار برای کنترل علف‌های هرز در سراسر جهان

Table 5. Currently available bioherbicides on the market for weed control around the world

نام تجاری Commercial Name	اجزای فعال Active Constituents	کاربرد یا گیاهان هدف Use/Target Plant(s)	کشور مبنا Country Available
Avenger Organic Weed Killer®	دی لیمونن و روغن کرچک	علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ	ایالات متحده آمریکا
Barrier H°	۲۲/۹ درصد روغن سیترونلا	خار مریم	اروپا، ژاپن، ایالات متحده آمریکا
Beloukha®/Scythe®	روغن کلزا، اسید نونانوئیک و اسید پلارگونیک	کنترل غیرانتخابی گیاهچه‌ها و علف‌های هرز جوان	استرالیا، ایالات متحده آمریکا
Bialaphos®	*Streptomyces hygroscopicus*	علف‌کش زیستی با طیف وسیع و پس از سبز شدن	آسیای شرقی
Bioweed™	روغن کاج (غلظت ۱۰ درصد) + شکر	علف‌های هرز علفی و باریک‌برگ	استرالیا
Camperico™	*Xanthomonas campestris* pv. poae (JT-P482)	علف‌های هرز باریک‌برگ چمن	ژاپن
Di-Bak Parkinsonia™	*Lasiodiplodia pseudotheobromae*, *Macrophomina phaseolina* and *Neoscytalidium novaehollandiae*	پارکینسونیا (*Parkinsonia aculeata*)	استرالیا
GreenMatch®	روغن علف لیمو	علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ	ایالات متحده آمریکا
Katana®	اسید پلارگونیک	علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ	ایالات متحده آمریکا
Lockdown®/Collego™	فلومیوکسازین و *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. aeschynomene	کنترل باقیمانده انواع علف‌های هرز پهن‌برگ	ایالات متحده آمریکا
Matratec®	روغن میخک، اسید لاکتیک، لسیتین، ان بوتیل استر و روغن سبز زمستانه	طیف وسیع، غیرانتخابی	ایالات متحده آمریکا
MycoTech®/Chontrol®/EcoClear™	اسید استیک، اسید سیتریک و *Chondrostereum purpureum*	غیرانتخابی برای شاخ و برگ سبز و درختان و درختچه‌های برگ‌ریز	بلژیک، کانادا، هلند
Opportune™	*Streptomyces* strain RL-110 T	علف‌کش پیش و پس‌رویشی (پهن‌برگ‌ها و جگن‌ها)	ایالات متحده آمریکا
Organic Interceptor®	روغن کاج	علف‌کش پیش‌رویشی و مؤثر	نیوزلند
OrganoSol®/Kona™/Bioprotec™	اسید لاکتیک، اسید سیتریک *Lactobacillus rhamnosus* (LPT–21), L. casei (LPT–111), *L. lactis* ssp. cremoris (M11/CSL), *L. lactis* ssp. Lactis (LL64/CSL and LL102/CSL)	علف کش غیرانتخابی و پس‌رویشی	کانادا
Phoma®	*Phoma macrostoma* 94–44B (Macrocidins A, B)	طیف وسیعی از علف‌های هرز پهن‌برگ	کانادا، ایالات متحده آمریکا
Sarritor®	فلومتسولام و *Sclerotina minor*	علف‌های هرز پهن‌برگ	استرالیا، کانادا
SolviNix™ LC and WP	موزائیک سبز نرم تنباکو و *Tobamovirus cepa* U2	تاج‌ریزی (*Solanum viarum*)	ایالات متحده آمریکا
Stump out™	بی کربنات سدیم و *Cylindrobasidium laeve*	گونه‌های اقاقیا و پوآ	آفریقای جنوبی
Weed Slayer®	اوژنول، روغن میخک و ملاس	علف‌های هرز باریک‌برگ	ایالات متحده آمریکا
WeedZap®	روغن دارچین، روغن میخک، لاکتوز و آب	غیرانتخابی، علف‌های هرز پهن‌برگ کوچک و باریک‌برگ	ایالات متحده آمریکا
Woad Warrior®	*Puccinia thalaspeos*	ایساتیس (*Isatis tinctoria*)	ایالات متحده آمریکا

نتیجه‌گیری

استفاده از علف‌کش‌های زیستی برای کنترل علف‌های هرز می‌تواند مزایای بی‌شماری نسبت به کاربردهای سنتی علف‌کش‌های مصنوعی داشته باشد که عبارتند از: (۱) روی علف های هرز مقاوم به علف کش استفاده شوند (اگرچه تحقیقات آتی باید توسعه مقاومت بالقوه به علف‌کش‌های زیستی در علف‌های هرز حاصل از این علف‌کش‌های زیستی را در طول زمان در نظر بگیرد)، (۲) دارای میزبان اختصاصی در زیستگاه‌های انتخابی هستند و (۳) نسبت به علف‌کش‌های مصنوعی سازگارتر با محیط بوده و سمیت کمتری داشته باشند. با این حال علی‌رغم نشان دادن نشانه‌های امیدوارکننده به‌عنوان یک روش نوظهور کنترل علف‌های هرز، هنوز نیاز به تحقیقات مداوم برای تمرکز بر

فرایندهای بسیار پیچیده به شیوه‌ای هماهنگ وجود دارد: بهبود فرآیند تجاری‌سازی، یافتن منابع مناسب‌تر از باکتری‌ها، قارچ‌ها، عصاره‌های گیاهی یا ویروس‌ها (به منظور تولید محصولات جدید)، درک نحوه‌های عمل مختلف برای هر کلاس از علف‌کش زیستی و تعیین چگونگی تأثیر شرایط محیطی بر موفقیت آن‌ها.

References منابع

Abu-Dieyeh, M.H. and Watson, A.K. 2007. Grass over seeding and a fungus combine to control *Taraxacum officinale*. Journal of Applied Ecology 44: 115-124.

Andersen, R. and Walker, H. 1985. *Colletotrichum coccodes*: A pathogen of Eastern Black Nightshade (*Solanum ptycanthum*). Weed Science 33: 902-905.

Almarie, A. 2021. Bioherbicidal potential of Eucalyptus and clove oil and their combinations on four weedy species. Iraqi Journal of Science 62: 1494-1502.

Aneja, K.R. and Mehrotra, R.S. 2011. Textbook of Fungal Diversity and Biotechnology; New Age International Publishers: New Delhi, India, pp. 621–622.

Aneja, K.R., Kumar, V. and Jiloha, P. 2013. Potential Bioherbicides: Indian Perspectives. Pp. 197–215. In: Salar, R., Gahlawat, S., Siwach, P. and Duhan, J. (eds.). Biotechnology: Prospects and Applications; Springer, New Delhi, India.

Aneja, K.R., Khan, S.A. and Aneja, A. 2017. Bioherbicides: Strategies, Challenges and Prospects. Pp. 449-470. In: Satyanarayana, T., Deshmukh, S. and Johri, B. (eds.). Developments in Fungal Biology and Applied Mycology. Springer, Berlin, Germany.

Anese, S., Jatoba, L.J. and Grisi, P.U. 2015. Bioherbicidal activity of drimane sesquiterpenes from *Drimys brasiliensis* Miers roots. Industrial Crops and Products 74: 28–35.

Auld, B.A., Hetherington, S.D. and Smith, H.E. 2003. Advances in bioherbicide formulation. Weed Biology and Management 3: 61–67.

Anwar, T., Qureshi, H. and Mahnashi, M.H. 2021. Bioherbicidal ability and weed management of allelopathic methyl esters from *Lantana camara*. Saudi Journal of Biological Sciences 28: 4365-4374.

Bailey, K.L., Boyetchko, S.M. and Langle, T. 2010. Social and economic drivers shaping the future of biological control: A Canadian perspective on the factors affecting the development and use of microbial biopesticides. Biological Control 52: 221–229.

Bailey, K.L. 2014. The Bioherbicide Approach to Weed Control Using Plant Pathogens. Pp. 245–266. In: Abrol, D.P. (ed.). Integrated Pest Management: Current Concepts and Ecological Perspective, Integrated Pest Management. San Diego, CA, USA, Chapter 13.

Banowetz, G.M., Azevedo, M.D. and Armstrong, D.J. 2008. Germination-Arrest Factor (GAF): Biological properties of a novel, naturally-occurring herbicide produced by selected isolates of rhizosphere bacteria. Biological Control 4: 380-390.

Barros, S., Pedrosa, J.L.F. and Gonçalves, D.R. 2021. Herbicides of biological origin: A review. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 96: 1–9.

Batish, D.R., Singh, H.P. and Setia, N. 2007. Alternative control of littleseed canary grass using eucalypt oil. Agronomy for Sustainable Development 27: 171–177.

Ben Kaab, S., Lins, L. and Hanafi, M. 2020a. *Cynara cardunculus* crude extract as a powerful natural herbicide and insight into the mode of action of its bioactive molecules. Biomolecules 10: 209.

Ben Kaab, S. B., Rebey, I. B. and Hanafi, M. 2020b. Screening of Tunisian plant extracts for herbicidal activity and formulation of a bioherbicide based on *Cynara cardunculus*. South African Journal of Botany 128: 7–76.

Benchaa, S., Hazzit, M. and Abdelkrim, H. 2018. Allelopathic effect of *Eucalyptus citriodora* essential oil and its potential use as bioherbicide. Chemistry and Biodiversity 15: e1800202.

Bhowmik, P. and Inderjit, C. 2003. Challenges and opportunities in implementing allelopathy for natural weed management. Crop Protection 22: 661-671.

Bo, A.B., Khaitov, B. and Umurzokov, M. 2019. Biological control using plant pathogens in weed management. Weed and Turfgrass Science 9: 11–19.

Bordin, E., Frumi Camargo, A. and Stefanski, F. 2020. Current production of bioherbicides: Mechanisms of action and technical and scientific challenges to improve food and environmental security. Biocatalysis and Biotransformation 39: 346–359.

Boyetchko, S.M., Bailey, K.L. and Hynes, R.K. 2007. Development of the Mycoherbicide, BioMal (R). Pp. 274–283. In: Vincent, C., Goettel, M.S. and Lazarovits, G. (eds.). Biological Control: A Global Perspective. CABI Publishing, Wallingford, UK.

Boyette, C.D. and Hoagland, R.E. 2013. Bioherbicidal potential of a strain of *Xanthomonas* spp. for control of common cocklebur (*Xanthium strumarium*). Biocontrol Science and Technology 23: 183–196.

Boyette, C.D. and Hoagland, R.E. 2015. Bioherbicidal potential of *Xanthomonas campestris* for controlling *Conyza canadensis*. Biocontrol Science and Technology 25: 229–237.

Boyette, C.D., Hoagland, R.E. and Stetina, K.C. 2019. Extending the host range of the bioherbicidal fungus *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *aeschynomene*. Biocontrol Science and Technology 29: 1–7.

Butt, T.M. and Copping, L.G. 2000. Fungal biological control agents. Pesticide Outlook 11: 186–191.

Caldwell, C.J., Hynes, R.K., Boyetchko, S.M. and Korber, D.R. 2012. Colonization and bioherbicidal activity on green foxtail by *Pseudomonas fluorescens* BRG100 in a pesta formulation. Canadian Journal of Microbiology 58: 1–9.

Charudattan, R., Walker, H.L. and Boyette, C.D. 1986. Evaluation of *Alternaria cassiae* as a Mycoherbicide for Sicklepod (*Cassia obtusifolia*) in Regional Field Test. Southern Regional Cooperative Series Bulletin; Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University: Auburn, AL, USA, Volume 317.

Charudattan, R. 2005. Ecological, practical, and political inputs into selection of weed targets: What makes a good biological control target? Biological Control 35: 183–196.

Charudattan, R. and Hiebert, E. 2007. A Plant virus as a bioherbicide for Tropical Soda Apple. *Solanum viarum*. Outlooks on Pest Management 18: 167-171.

Charudattan, R., Hiebert, E. and Currey, W. 2020. Design and testing of field application tools for a bioherbicide with a plant virus as active ingredient. Asian Pacific Weed Science Society 2: 34–45.

Chauhan, B.S. Matloob, A. and Mahajan, G. 2017. Emerging challenges and opportunities for education and research in weed science. Frontiers in Plant Science 8: 1537–1550.

Chauhan, B.S. 2020. Grand challenges in weed management. Frontiers in Agronomy 1: 1–4.

Cheng, L., Zhu, H.X. and Wei, Y.H. 2021. Biological control of Qinghai plateau terrestrial weeds with the *A. alternata* HL-1. Journal of Plant Diseases and Protection 128: 1691–1704.

Cimmino, A., Andolfi, A. and Zonno, M.C.; 2013. Chenopodolin: A phytotoxic unrearranged entpimaradiene diterpene produced by *Phoma chenopodicola*, a fungal pathogen for *Chenopodium album* biocontrol. Journal of Natural Products 7: 1291–1297.

Cordeau, S., Triolet, M. and Wayman, S. 2016. Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. Crop Protection 87: 44–49.

Daniel, J.J., Zabot, G.L. and Tres, M.V. 2018. *Fusarium fujikuroi*: A novel source of metabolites with herbicidal activity. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 14: 314–320.

Dayan, F.E., Howell, J.L. and Marais, J.P. 2011. Manuka Oil, a natural herbicide with preemergence activity. Weed Science 59: 464–469.

Diaz, R., Manrique, V. and Hibbard, K. 2014. Successful biological control of tropical soda apple (Solanales: Solanaceae) in Florida: A review of key program components. Florida Entomologist 97: 179-190.

DiTomaso, J.M., van Steenwyk, R.A. and Nowierski, R.M. 2017. Addressing the needs for improving classical biological control programs in the USA. Biological Control 106: 35-39.

Duke, S.O., Pan, Z., Bajsa-Hirschel, J. and Boyette, C.D. 2022. The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops. Advances in Weed Science 40: 1–13.

Dumas, M.T., Wood, J.E., Mitchell, E.G. and Boyonoski, N.W. 1997. Control of stump sprouting of Populus tremuloides and P. grandidentataby inoculation with *Chondrostereum purpureum*. Biological Control 10: 37–41.

Elliott, M.S., Massey, B., Cui, X. and Hiebert, E. 2009. Supplemental host range of *Araujia mosaic virus*, a potential biological control agent of moth plant in New Zealand. Australasian Plant Pathology 38: 603–607.

Félix-Gastélum, R., Valdez-Leyva, A.B. and Fierro-Coronado, R.A. 2020. First report of stem blight and leaf spot in horse purslane caused by *Gibbago trianthemae* in Sinaloa, Mexico. Canadian Journal of Plant Pathology 43: 1–8.

Fernando, W.G.D., Watson, A.K. and Paulitz, T.C. 1996. Role of *Pseudomonas* spp. and competition for iron, carbon and nitrogen in the enhancement of appressorium formation by *Colletotrichum coccodes* on velvetleaf. European Journal of Plant Pathology 102: 1–7.

Ferrell, J., Charudattan, R. and Elliott, M. 2008. Effects of selected herbicides on the efficacy of *Tobacco mild* green mosaic virus to control tropical soda apple (*Solanum viarum*). Weed Science 56: 128–132.

Forray, A., Tüske, M. and Gáborjányi, R. 2004. First report on the occurrence of *Pepino mosaic virus* in Hungary. Növényvédelem 40: 471-474.

Gaines, T.A., Busi, R. and Küpper, A. 2021. Can new herbicide discovery allow weed management to outpace resistance evolution? Pest Management Science 77: 3036–3041.

Galea, V.J. 2021. Use of stem implanted bioherbicide capsules to manage an infestation of *Parkinsonia aculeata* in Northern Australia. Plants 10: 1909.

Gealy, D.R., Gurusiddaiah, S. and Ogg, A.G. 1996. Metabolites from *Pseudomonas fluorescens* strain D7 inhibit downy brome (*Bromus tectorum*) seedling growth. Weed Technology 10: 282–287.

Gharde, Y., Singh, P.K. and Dubey, R.P. 2018. Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India. Crop Protection 107: 12–18.

Grand View Research Inc. GVR. 2018. Bioherbicides Market Size Worth $4.14 Billion by 2024. Available at: https://www. grandviewresearch.com/press-release/global-bioherbicides-market (accessed on 1 January 1970).

Green, S. 2003. A review of the potential for the use of bioherbicides to control forest weeds in the UK. Forestry 76: 285–298.

Halgren, A., Maselko, M. and Azevedo, M. 2013. Genetics of germination-arrest factor (GAF) production by *Pseudomonas fluorescens* WH6: Identification of a gene cluster essential for GAF biosynthesis. Microbiolog, 159: 36–45.

Harding, D.P. and Raizada, M.N. 2015. Controlling weeds with fungi, bacteria and viruses: A review. Frontiers in Plant Science 6: 659–673.

Hasan, M., Mokhtar, A.S. and Rosli, A.M. 2021. Weed control efficacy and crop-weed selectivity of a new bioherbicide Weed Lock. Agronomy 11: 1488.

Heap, I.M. 2021. Current Status of the International Herbicide-Resistant Weed Database. International Herbicide-Resistant Weed Database. Available at: http://www.weedscience.org (accessed on 15 November 2021).

Hershenhorn, J., Casella, F. and Vurro, M. 2016. Weed biocontrol with fungi: Past, present and future. Biocontrol Science and Technology 26: 1313-1328.

Hoagland, R.E., Weaver, M.A. and Boyette, C.D. 2007. *Myrothecium verrucaria* fungus; A bioherbicide and strategies to reduce its non-target risks. Allelopathy Journal 9: 179–192.

Hussain, M.I., Abideen, Z. and Danish, S. 2021. Integrated weed management for sustainable agriculture. In: Lichtfouse, E. (ed.). Sustainable Agriculture Reviews. Springer, Cham, Switzerland.

Hynes, R.K. 2018. Phoma macrostoma: As a broad spectrum bioherbicide for turfgrass and agricultural applications. CABI Reviews 13: 1-9.

Imaizumi, S., Nishino, T. and Miyabe, K. 1997. Biological control of annual bluegrass (*Poa annua* L.) with a Japanese isolate of *Xanthomonas campestris* pv. *poae* (JT-P482). Biological Control 8: 7–14.

Jesudas, P.A., Kingsly, S.J. and Ignacimuthu, S. 2014. Sorgoleone from *Sorghum bicolor* as a potent bioherbicide. Research Journal of Recent Sciences 3: 32-36.

Kakhaki, S.H.N. and Montazeri, M. 2017. Biocontrol of broomrape using *Fusarium oxysporum* f. sp. *orthoceras* in tomato crops under field conditions. Biocontrol Science and Technology 27: 1435–1444.

Kazinczi, G., Lukacs, D. and Takacs, A. 2006. Biological decline of *Solanum nigrum* due to virus infections. Journal of Plant Diseases and Protection 32: 325–330.

Kennedy, A.C. 2018. Selective soil bacteria to manage downy brome, jointed goatgrass, and medusahead and do no harm to other biota. Biological Control 123: 18–27.

Kollmann, J., Banuelos, M.J. and Nielsen, S.L. 2007. Effects of virus infection on growth of the invasive alien Impatiens glandulifera. Preslia 79: 33-44.

Korres, N.E., Burgos, N.R. and Travlos, I. 2019. New directions for integrated weed management: Modern technologies, tools and knowledge discovery. Advances in Agronomy 55: 243-319.

Kotzé, L.J.D., Wood, A.R. and Lennox, C.L. 2015. Risk assessment of the *Acacia cyclops* dieback pathogen, *Pseudolagarobasidium acaciicola*, as a mycoherbicide in South African strandveld and limestone fynbos. Biological Control 82: 52–60.

Kremer, R.J. 2019. Bioherbicides and Nanotechnology: Current Status and Future Trends. Pp. 353–366. Nano-Biopesticides Today and Future Perspectives; Academic Press: Cambridge, MA, USA, Chapter 15.

Kumar, V., Singh, M. and Sehrawat, N. 2021. Mycoherbicide control strategy: Concept, constraints, and advancements. Biopesticides International 17: 29–40.

Lee, S.M., Radhakrishnan, R. and Kang, S.M. 2015. Phytotoxic mechanisms of bur cucumber seed extracts on lettuce with special reference to analysis of chloroplast proteins, phytohormones, and nutritional elements. Ecotoxicology and Environmental Safety 122: 230–237.

Llewellyn, R.S., Ronning, D. and Ouzman, J. 2016. Impact of Weeds on Australian Grain Production: The Cost of Weeds to Australian Grain Growers and the Adoption of Weed Management and Tillage Practices, Report for GRDC. CSIRO: Canberra, Australia, p. 112.

Mekky, M.S., Hassanien, A.M.A. and Kamel, E.M. 2019. Allelopathic effect of *Ocimum basilicum* L. extracts on weeds and some crops and its possible use as new crude bio-herbicide. Annals of Agricultural Sciences 64: 211–221.

Mendes, I.D.S. and Rezende, M.O.O. 2014. Assessment of the allelopathic effect of leaf and seed extracts of *Canavalia ensiformis* as post emergent bioherbicides: A green alternative for sustainable agriculture. Journal of Environmental Science and Health 49: 374–380.

McLaren, D.A., Butler, K.L. and Bonilla, J. 2014. Effects of Pine Oil, Sugar and Covers on Germination of Serrated Tussock and Kangaroo Grass in a Pot Trial. Proceedings of the Nineteenth Australasian Weeds

Conference-Science, Community and Food Security: The Weed Challenge, Hobart, Australia, 1-4 September 2014; Tasmanian Weed Society: Penguin, TAS, Australia, pp. 239-242.

Morris, M.J. and Wood, A.R. 1999. den Breeÿen, A. Plant pathogens and biological control of weeds in South Africa: A review of projects and progress during the last decade. African Entomology 1: 129–137.

Mortensen, K. 1988. The potential of an endemic fungus, *Colletotrichum gloeosporioides* for biological control of round-leaved mallow (*Malva pusilla*) and velvet leaf (*Abutilon theophrasti*). Weed Science 36: 473–478.

Nandhini, C., Ganesh, P. and Yoganathan, K. 2019. Efficacy of *Colletotrichum gloeosporioides*, potential fungi for biocontrol of *Echinochloa crus-galli* (Barnyard grass). Journal of Drug Delivery and Therapeutics 9: 72–75.

Osadebe, V.O., Dauda, N. and Ede, A.E. 2021. The use of bioherbicides in weed control: Constraints and prospects. African Journal of Agricultural Science and Technology 21: 37–54.

Pacanoski, Z. 2015. Bioherbicides. Pp. 245–276. Herbicides, Physiology of Action, and Safety; IntechOpen, London, UK, Chapter 11.

Papaianni, M., Paris, D. and Woo, S.L. 2020. Plant dynamic metabolic response to bacteriophage treatment after *Xanthomonas campestris* pv. campestris infection. Frontiers in Microbiology 11: 1–15.

Phatak, S.C., Sumner, D.R. and Wells, H.D. 1983. Biological control of Yellow nutsedge with the indigenous rust fungus *Puccinia canaliculata*. Science 219: 1446–1447.

Pugazhendhi, A., Radhakrishnan, R. and Duc, P.A. 2019. *Curtobacterium* sp. MA01 generates oxidative stress to inhibit the plant growth. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 20: 101274.

Pyke, D.A., Shaff, S.E. and Gregg, M.A. 2019. Weed-suppressive bacteria applied as a spray or seed mixture did not control *Bromus tectorum*. Rangeland Ecology and Management 73: 749–752.

Qu, R., He, B. and Yang, J. 2021. Where are the new herbicides? Pest Management Science 77: 2620-2625.

Quail, J.W., Ismail, N. and Pedras, M.S.C. 2002. Pseudophomins A and B, a class of cyclic lipodepsipeptides isolated from a *Pseudomonas* species. Acta Crystallographica 58: 268–271.

Rai, M., Zimowska, B. and Shinde, S. 2021. Bioherbicidal potential of different species of Phoma: Opportunities and challenges. Applied Microbiology and Biotechnology 105: 3009–3018.

Radi, H.C. and Banaei-Moghaddam, A.M. 2020. Biological control of weeds by fungi: Challenges and opportunities. Acta Scientific Microbiology 3: 62-70.

Reichert, F.W., Scariot, M.A. and Forte, C.T. 2019. New perspectives for weeds control using autochthonous fungi with selective bioherbicide potential. Heliyon 5: e01676.

Ridings, W.H. 1986. Biological control of strangler vine in citrus- A researcher's view. Weed Science 34: 31–32.

Samad, A., Antonielli, L. and Sessitsch, A. 2017. Comparative genome analysis of the vineyard weed endophyte *Pseudomonas viridiflava* CDRTc14 showing selective herbicidal activity. Scientific Reports 7: 765–781.

Scavo, A., Pandino, G. and Restuccia, A. 2019. Mauromicale, G. Leaf extracts of cultivated cardoon as potential bioherbicide. Scientia Horticulturae 26: 109024.

Shrestha, A. 2009. Potential of a Black walnut (*Juglans nigra*) extract product (NatureCur®) as a pre- and post-emergence bioherbicide. Journal of Sustainable Agriculture 33: 810–822.

Soltys, D., Krasuska, U. and Bogatek, R. 2013. Allelochemicals as Bioherbicides- Present and Perspectives. Pp. 517–542. In: Price, A.J. and Kelton, J.A., (eds.). Herbicides- Current Research and Case Studies in Use; IntechOpen, London, UK.

Singh, H.P., Batish, D.R. and Setia, N. 2005. Herbicidal activity of volatile oils from *Eucalyptus citriodora* against *Parthenium hysterophorus*. Annals of Applied Biology 146: 89–94.

Sun, Y., Kaleibar, B.P. and Oveisi, M. 2021. Addressing climate change: What can plant invasion science and weed science learn from each other? Frontiers in Agronomy 2: 1–7.

Talukder, M.R., Asaduzzaman, M. and Tanaka, H. 2019. Application of alternating current electro-degradation improves retarded growth and quality in lettuce under autotoxicity in successive cultivation. Scientia Horticulturae 252: 324–331.

Travlos, I., Rapti, E. and Gazoulis, I. 2020. The herbicidal potential of different pelargonic acid products and essential oils against several important weed species. Agronomy 10: 1687.

Vieira, B.S., Dias, L.V.S.A. and Langoni, V.D. 2018. Liquid fermentation of *Colletotrichum truncatum* UFU 280, a potential mycoherbicide for beggartick. Australas. Plant Pathology 47: 277–283.

Vurro, M., Boari, A. and Evidente, A. 2009. Natural metabolites for parasitic weed management. Pest Management Science 65: 566–571.

Wan, F.H. and Wang, R. 2001. Biological Weed Control in China: An Update Report on Alien Invasive Species. Pp. 8–19. Workshop on Alien Invasive Species; IUCN Regional Biodiversity Programme, Sri Jayawardenepura Kotte, Sri Lanka.

Weaver, M.A., Hoagland, R.E. and Boyette, C.D. 2021. Taxonomic evaluation of a bioherbicidal isolate of *Albifimbria verrucaria*, formerly *Myrothecium verrucaria*. Journal of Fungi 7: 694.

Xie, C.J., Wang, C.Y. and Wang, X.K. 2013. Proteomics-based analysis reveals that *Verticillium dahliae* toxin induces cell death by modifying the synthesis of host proteins. Journal of General Plant Pathology 79: 335–345.

Zanellato, M., Masciarelli, E. and Casorri, L. 2009. The essential oils in agriculture as an alternative strategy to herbicides: A case study. International Journal of Environmental Health Research 3: 198–213.

Zimdahl, R.L. 2018. Fundamentals of Weed Science. pp. 359–389. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, Chapter 12.

Zhu, H., Ma, Y. and Guo, Q. 2020. Biological weed control using *Trichoderma polysporum* strain HZ-31. Crop Protection 134: 1–8.

An Overview of Bioherbicides

R. Khakzad[1*] and R. Loghmanpour Zarini[2]

Received: 9 May, 2023 Accepted: 18 Jul., 2023

ABSTRACT

The ever increasing population and global issue for food security have led us to use multiple approaches to overcome the weed problems that can reduce the crop productivity up to 70%. Chemical herbicides and mechanical and other biological approaches have overcome weed problem on one hand but also destroy the environment and caused some human health impacts on the other hand. Bioherbicides are biological control agents applied in similar ways to chemical herbicides to control weeds. Of the array of bioherbicides currently available, the most successful products appear to be sourced from fungi (mycoherbicides), with at least 16 products being developed for commercial use globally. Over the last few decades, bioherbicides sourced from bacteria and plant extracts (such as allelochemicals and essential oils), together with viruses, have also shown marked success in controlling various weeds. Despite this encouraging trend, ongoing research is still required for these compounds to be economically viable and successful in the long term. This review will explain the importance and impacts of the bioherbicides by elaborating the constraints which this approach is facing in its production and application.

Key words: Essential oils, bacteria, fungi, plant extracts, viruses

1 and 2. Instructor and Associated Professor, respectively, Department of Agriculture Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

Corresponding author: rahman.khakzad@yahoo.com

doi: 10.30495/PLANT.2023.709186