

شبیه‌سازی رقابت علف هرز یولاف وحشی (*Avena ludoviciana* L.) بر رشد و عملکرد گندم پاییزه (*Triticum aestivum*). ۱- تشریح و ارزیابی مدل

فرزاد مندنی^۱ - مهدی نصیری محلاتی^{۲*} - علیرضا کوچکی^۲ - محمد حاجیان شهری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۸/۱۰

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی رشد ابزارهای کمی هستند که بر پایه اصول علمی و روابط ریاضی استوار بوده و می‌توانند اثرات اقلیم، خاک، آب و مدیریت زراعی را روی رشد و نمو گیاهان زراعی مورد ارزیابی قرار دهند. براساس پیشرفت‌های به‌عمل آمده، امروزه استفاده از نرم افزارهای رایانه‌ای برای مدیریت نظام‌های زراعی به‌عنوان یک ابزار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه، به‌منظور شبیه‌سازی خسارت علف هرز یولاف وحشی بر رشد و عملکرد گندم پاییزه، یک مدل بوم‌شناختی فیزیولوژیک رشد و نمو ارائه گردید. ساختار اصلی این مدل برگرفته از مدل LINTUL 1 می‌باشد که به‌منظور شبیه‌سازی رقابت علف هرز یولاف وحشی با گندم پاییزه اصلاح گردید. مدل لینتول رشد و نمو گندم بهاره را برای شرایط پتانسیل شبیه‌سازی می‌کند. در این شبیه‌سازی ابتدا مراحل نمو فنولوژیک به مدل لینتول اضافه شد، سپس فرمان بهاره شدن برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم پاییزه وارد مدل گردید و مدل اصلاح شده برای شبیه‌سازی تولید ماده خشک و مراحل نمو در شرایط پتانسیل، تکمیل و واسنجی شد. در نهایت مدل با وارد کردن رقابت علف هرز یولاف وحشی برای شبیه‌سازی میزان خسارت این علف هرز کامل گردید. داده‌های هواشناسی استفاده شده به‌عنوان ورودی‌های مدل شامل: میانگین دراز مدت ۲۰ ساله درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه (درجه سانتی‌گراد) و میزان تشعشع روزانه (مگاژول بر متر مربع) دشت مشهد بود. پارامترهای لازم برای ساخت و واسنجی این مدل از نتایج تحقیقاتی که در زمینه ارزیابی خسارت علف هرز یولاف وحشی بر رشد و عملکرد گندم اجرا شده بود، استخراج شد. این مدل در محیط FST برنامه‌نویسی شد و سپس با داده‌های حاصل از یک آزمایش مزرعه‌ای ارزیابی گردید. این مدل توانایی شبیه‌سازی رشد و نمو گندم پاییزه و علف هرز یولاف وحشی را به‌صورت جداگانه دارد. به‌منظور ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، از جذر میانگین مربعات خطا و برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در تراکم‌های مختلف یولاف وحشی که به‌عنوان تیمارهای آزمایش در نظر گرفته شده بود، استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان داد که اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای مراحل نمو فنولوژیک گندم و یولاف وحشی به‌ترتیب، ۱۰/۴ و ۱۴/۵ درصد، متوسط عملکرد کل گندم و یولاف وحشی در تیمارهای مختلف به‌ترتیب ۵/۸ و ۷/۶ درصد و کاهش عملکرد دانه گندم به علت رقابت یولاف وحشی ۷/۵ درصد بود. بر این اساس مدل دقت قابل قبولی در پیش‌بینی خسارت یولاف وحشی بر عملکرد گندم داشت. همچنین این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که می‌توان با تغییر پارامترهای مورد نیاز در آن، برای ارزیابی رقابت سایر علف‌های هرز گندم و یا رقابت علف‌های هرز با محصولات زراعی دیگر نیز به‌کار برده شود.

واژه‌های کلیدی: کاهش عملکرد، مدل‌های رشد گیاهان زراعی، مدل‌سازی رقابت علف‌های هرز، نمو فنولوژیک

مقدمه

در بین گیاهان زراعی، گندم (*Triticum aestivum*) سهم

عمده‌ای در برنامه غذایی انسان ایفا می‌کند. در ایران گندم از نظر تولید و سطح زیر کشت، مهمترین محصول کشاورزی بوده و دارای سطح زیر کشتی در حدود شش میلیون هکتار (حدود ۵۳ درصد از اراضی زراعی ایران) و میزان تولید سالانه‌ای در حدود ۱۱ میلیون تن می‌باشد (۷). از جمله عوامل کاهنده محصول گندم، علف هرز یولاف وحشی می‌باشد. یولاف وحشی (*Avena ludoviciana* L.) از مهم‌ترین علف‌های هرز مزارع گندم است که باعث کاهش قابل توجهی در عملکرد در اکثر نقاط دنیا (۳۰) و ایران (۱، ۳ و ۴) می‌شود، زیرا علاوه بر پتانسیل تولید بذر بالا، بیوتیپ‌های مقاوم به

۱- دانشجوی سابق دکتری اکولوژی گیاهان زراعی دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار فعلی گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: mnassiri@um.ac.ir)
۳- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، مشهد، ایران

علمی و همچنین پیچیدگی برهمکنش‌هایی که بین آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز با گیاهان زراعی وجود دارد (۱۸، ۲۰، ۲۱، ۳۱ و ۳۳)، در ارتباط با شبه‌سازی خسارت این عوامل ناخواسته، مدل‌های کمتری ارائه شده است.

از دیگر مدل‌هایی که امروزه کاربرد فراوانی در پیش‌بینی رشد و عملکرد محصولات زراعی در محیط‌های مختلف دارد، مدل LINTUL می‌باشد (۲۳). در این مدل شبه‌سازی تولید بیوماس از طریق ضرب کردن ضریب کارایی مصرف نور^۳ (RUE) در میزان نور جذب شده توسط کانوپی محصولات زراعی در حالت تک کشتی انجام می‌شود. بنابراین این امکان وجود دارد که با استفاده از کاربرد اصول ریاضی رقابت برای نور بین محصولات زراعی و علف‌های هرز، مدل لیتول برای شبه‌سازی ویژگی‌های بوم‌شناختی فیزیولوژیک رقابت، اصلاح و تکمیل گردد (۲۹). بر این اساس و با توجه به اهمیت و میزان خسارت علف هرز یولاف وحشی در اکثر مزارع گندم کشور و برای سرعت بخشیدن به انجام آزمایشات علمی و جلوگیری از آزمایشات تکراری، این بررسی با هدف ارائه یک مدل رشد بوم‌شناختی فیزیولوژیک رقابت این علف هرز با گندم پاییزه در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد.

مواد و روش‌ها

ساختار کلی مدل

ساختار اصلی این مدل برگرفته از مدل لیتول یک^۴ (LINTUL 1) می‌باشد (۲۳). مدل لیتول یک رشد گندم بهاره را برای تولید در شرایط پتانسیل (بدون عوامل محدودکننده و کاهنده تولید)، متناسب با اطلاعات هواشناسی (میزان تشعشع روزانه، درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه) براساس کارایی مصرف نور شبه‌سازی می‌کند. این مدل تجمع ماده خشک را در شرایطی که هیچ‌گونه عامل محدودکننده (نظیر کمبود آب، عناصر غذایی و انواع تنش‌های غیر زیستی) و کاهنده رشد (نظیر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز) وجود نداشته باشد، متناسب با درجه حرارت تجمعی شبه‌سازی می‌کند.

در این مطالعه، ابتدا مراحل نمو فنولوژیک گیاه به مدل لیتول یک اضافه شد، سپس فرمان بهاره شدن^۵ برای شبه‌سازی رشد و نمو گندم پاییزه متناسب با شرایط آب و هوایی مشهد وارد مدل شد (شکل ۱). در مرحله بعد این مدل اصلاح شده برای شبه‌سازی تولید ماده خشک و مراحل نموی در شرایط پتانسیل، تکمیل و واسنجی گردید.

علف‌کش‌های متعددی از این علف هرز در بررسی‌های مختلف گزارش شده است که این موضوع خود باعث افزایش خسارت این علف هرز می‌شود (۱۴).

سلیمی و انگجی (۱۲) کاهش عملکرد ۲۲ درصدی رقم قدس را در تراکم ۱۰ بوته در متر مربع یولاف وحشی گزارش کردند و زمانی که تراکم به ۲۰۰ بوته در متر مربع رسید، عملکرد گندم حدود ۴۳ درصد کاهش یافت. عطاریان و راشد محصل (۱۳) نیز گزارش کرده‌اند که تراکم ۵۲ بوته در متر مربع یولاف وحشی نسبت به شرایط عاری از علف هرز سبب کاهش ۳۹ درصدی عملکرد گندم رقم الموت می‌شود. خان و همکاران (۲۶) نیز دریافتند که تراکم ۴۰ بوته یولاف وحشی در متر مربع منجر به بیش از ۵۰ درصد کاهش عملکرد گندم شد. به‌طور کلی تعیین تجربی و عملی میزان خسارت یولاف وحشی بر رشد و عملکرد گندم نیاز به انجام آزمایشات متعددی دارد که به‌دلیل تنوع آب و هوایی کشور، ایجاد بیوتیپ‌های مقاوم به علف‌کش‌ها و تغییرات اقلیمی پیش رو، انجام این چنین تحقیقاتی هزینه‌های زیادی را در بر دارد. از طرفی در طی دهه‌های گذشته پیشرفت‌های زیادی نیز در زمینه حفاظت از محصولات زراعی در برابر عوامل کاهنده محیطی حاصل شده است (۴۱) که عمدتاً به‌صورت رهیافت‌های تجربی بوده و تعیین‌کننده وضعیت تولید، انواع مختلفی از آفات و برهمکنش‌های بین آنها می‌باشد. با این حال، این رهیافت‌های تجربی دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد و از طریق آنها نمی‌توان میزان کاهش عملکرد محصولات زراعی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف تخمین زد. از دیگر رهیافت‌های جایگزین استفاده از مدل‌های مکانیزم‌گرای شبه‌سازی رشد است که امکان شبه‌سازی اساس فیزیولوژیکی خسارت عوامل کاهنده تولید را فراهم می‌سازد (۲۸). مدل‌های شبه‌سازی رشد براساس اصول علمی و روابط ریاضی استوار بوده و می‌تواند اثرات اقلیم، خاک، آب و مدیریت زراعی را روی رشد و نمو گیاهان زراعی مورد ارزیابی قرار دهند و امروزه کاربرد آنها در مدیریت سیستم‌های زراعی افزایش یافته است (۹، ۱۵، ۱۷ و ۱۹). برای مثال روهریگ و استوتزل (۳۶) در یک بررسی، رقابت بین علف هرز سلمه تره^۱ و گل کلم^۲ را شبه‌سازی کردند. در این شبه‌سازی خسارت ناشی از علف هرز سلمه تره به عملکرد گل کلم از طریق رقابت برای نور در مدل لحاظ گردید. جونز و کینیری (۲۵) نیز با در نظر گرفتن اثر آب و عناصر غذایی بر رشد گیاه، مدل CERES را ارائه کردند. یانگ و همکاران (۴۴) مدل CERES را با مدل‌های INTERCOM (۳۰) و WOFOST (۴۳) ترکیب کرده و مدل Hybrid-Maize را ارائه کردند. این مدل‌ها در مدیریت کشاورزی نوین، نقش غیر قابل انکاری بر عهده دارند. ولی به‌علت کمبود منابع

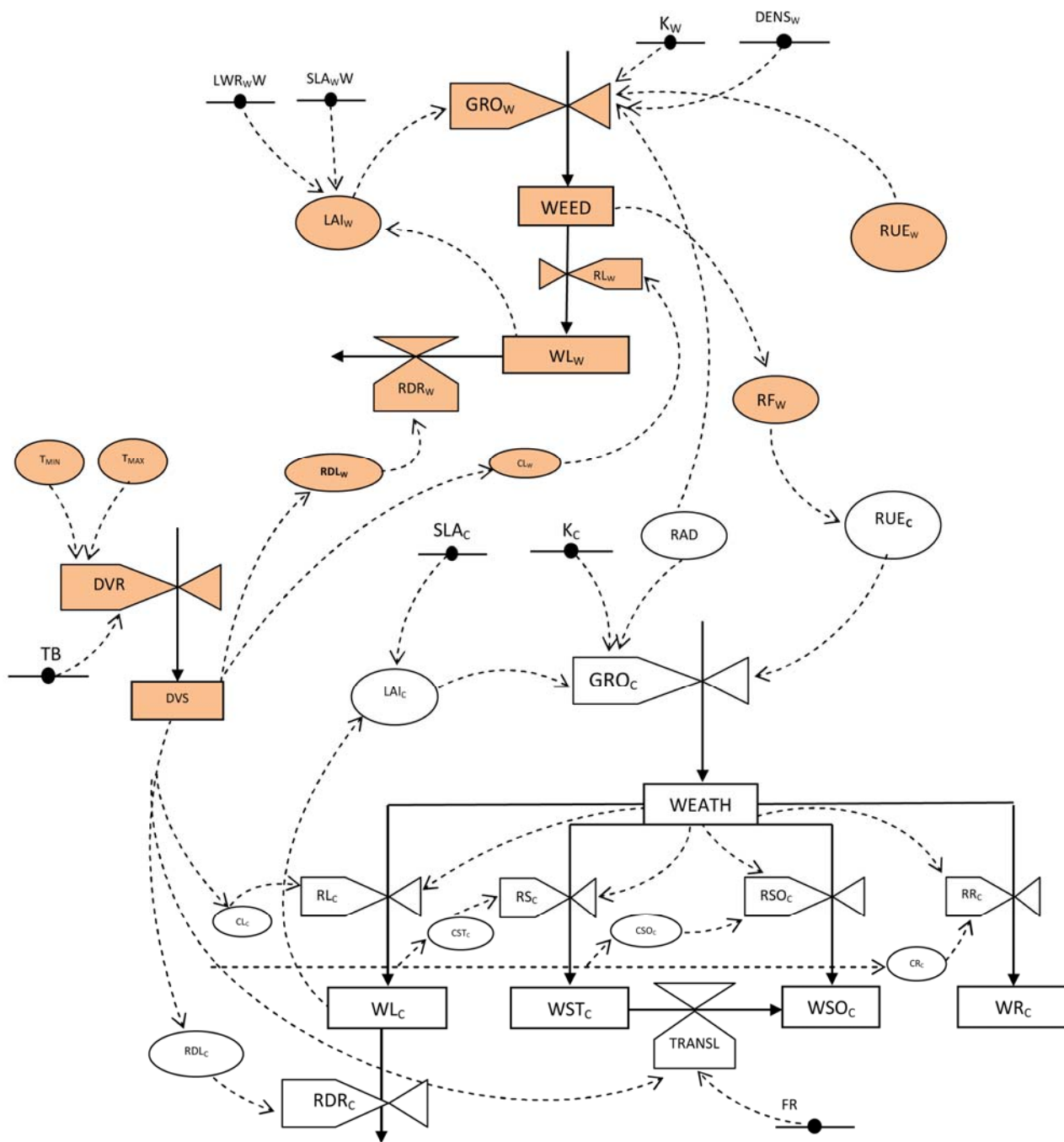
3- Radiation use efficiency

4- Light interception and utilization: A simple general crop growth model for optimal growing conditions

5- Vernalization

1- *Chenopodium album*

2- *Brassica oleracea* L.



شکل ۱- نمایی از ساختار کلی مدل. مستطیل‌ها نشان‌دهنده متغیرهای وضعیت، دایره‌ها نشان‌دهنده متغیرهای حدواسط، شیره‌ها نشان‌دهنده متغیرهای سرعت، خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده انتقال اطلاعات، خطوط ممتد نشان‌دهنده انتقال مواد و خطوط ساده نشان‌دهنده پارامترهای مدل می‌باشند (علامت‌گذاری برگرفته از فروستر (۱۹۶۱)). قسمت‌های رنگی نشان‌دهنده اجزای اضافه شده به ساختار مدل LINTUL1 می‌باشند. اصطلاحات به کار رفته در این شکل، در جدول ۱ شرح داده شده است.

جدول ۱- مخفف‌ها، واحدها و تعریف متغیرهای اصلی به کار رفته در مدل

مخفف	واحد	توضیح
CL _C	-	ضریب تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت برگ گندم (تابعی از مراحل نموی)
CL _W	-	ضریب تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت برگ یولاف وحشی (تابعی از مراحل نموی)
CR _C	-	ضریب تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت ریشه گندم (تابعی از مراحل نموی)
CSO _C	-	ضریب تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت اندام ذخیره‌ای گندم (تابعی از مراحل نموی)
CST _C	-	ضریب تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت ساقه گندم (تابعی از مراحل نموی)
DENS	Plant m ⁻²	تراکم بوته یولاف وحشی
DVR	d ⁻¹	سرعت نمو فنولوژیک
DVS	-	نمو فنولوژیک
FR _C	-	ضریب انتقال مواد فتوسنتزی از ساقه به اندام ذخیره‌ای گندم
GRO _C	d ⁻¹ g m ⁻²	سرعت افزایش روزانه وزن خشک کل گندم
GRO _W	d ⁻¹ g m ⁻²	سرعت افزایش روزانه وزن خشک کل یولاف وحشی
K _C	-	ضریب خاموشی نور گندم
K _W	-	ضریب خاموشی نور یولاف وحشی
LAI _C	m ² m ⁻²	شاخص سطح برگ گندم
LAI _W	m ² m ⁻²	شاخص سطح برگ یولاف وحشی
LWR _W	g g ⁻¹	نسبت وزن برگ یولاف وحشی
RAD	Mg m ⁻¹ d ⁻¹	تشنج روزانه خورشید
RF _W	-	عامل کاهش کارایی مصرف نور از طریق رقابت برای آب و عناصر غذایی توسط یولاف وحشی
RDR _C	d ⁻¹	سرعت نسبی مرگ برگ‌های گندم
RDL _C	-	میزان مرگ برگ‌های گندم به علت مسن شدن (تابعی از درجه حرارت)
RDL _W	-	میزان مرگ برگ‌های یولاف وحشی به علت مسن شدن (تابعی از درجه حرارت)
RDR _W	d ⁻¹	سرعت نسبی مرگ برگ‌های یولاف وحشی
RL _C	g m ⁻² d ⁻¹	سرعت روزانه افزایش وزن خشک برگ گندم
RR _C	g m ⁻² d ⁻¹	سرعت روزانه افزایش وزن خشک ریشه گندم
RL _W	g m ⁻² d ⁻¹	سرعت روزانه افزایش وزن خشک برگ یولاف وحشی
RS _C	g m ⁻² d ⁻¹	سرعت روزانه افزایش وزن خشک ساقه گندم
RSO _C	g m ⁻² d ⁻¹	سرعت روزانه افزایش وزن خشک اندام ذخیره‌ای گندم
RUE _C	g Mg ⁻¹	کارایی مصرف نور گندم
RUE _W	g Mg ⁻¹	کارایی مصرف نور یولاف وحشی
SLA _C	M ² g ⁻¹	سطح ویژه برگ گندم
SLA _W	M ² g ⁻¹	سطح ویژه برگ یولاف وحشی
T _A	°C	متوسط درجه حرارت روزانه
TB	°C	صفر فیزیولوژیک
T _{MAX}	°C	حداکثر درجه حرارت روزانه
T _{MIN}	°C	حداقل درجه حرارت مؤثر روزانه
TRANSL	g m ⁻² d ⁻¹	سرعت روزانه انتقال مواد فتوسنتزی از ساقه به اندام ذخیره‌ای
TSUM	°C d	درجه حرارت تجمعی
WL _C	g m ⁻²	وزن خشک برگ گندم
WL _W	g m ⁻²	وزن خشک برگ یولاف وحشی
WR _C	g m ⁻²	وزن خشک ریشه گندم
WSO _C	g m ⁻²	وزن خشک اندام ذخیره‌ای گندم
WST _C	g m ⁻²	وزن خشک ساقه گندم
WEATH	g m ⁻²	وزن خشک کل گندم
WEED	g m ⁻²	وزن خشک کل یولاف وحشی

در نهایت با وارد کردن اثرات رقابت علف هرز یولاف وحشی، برای شبیه‌سازی میزان خسارت این علف هرز تکمیل شد. این مدل در محیط FST^۱ برنامه‌نویسی شد و با داده‌های حاصل از یک آزمایش مزرعه‌ای ارزیابی گردید.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی استفاده شده به‌عنوان ورودی‌های مدل شامل: میانگین دراز مدت ۲۰ ساله (از سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۸۹) درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه (بر حسب درجه سانتی‌گراد) و میزان تشعشع روزانه (بر حسب مگاژول بر متر مربع) بود که از ایستگاه هواشناسی شهرستان مشهد (عرض جغرافیایی، ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی، ۵۶ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۹۸۵ متر) تهیه گردید.

مشخصات سیستم و مقادیر اولیه متغیرها

در این مدل، شبیه‌سازی‌ها در فواصل یک روزه و برای یک متر مربع از مزرعه گندم پاییزه انجام شد. در این بررسی تاریخ کاشت گندم و یولاف وحشی، ۲۰ مهر ماه (تاریخ کاشت توصیه شده برای گندم پاییزه در دشت مشهد) و زمان سبز شدن، ۳۰ مهر ماه (زمان رویش گیاه) در نظر گرفته شد و تا مرحله رسیدگی کامل ادامه یافت. درجه حرارت پایه برای گندم پاییزه و علف هرز یولاف وحشی ۲ درجه سانتی‌گراد بود. مقادیر اولیه برای شبیه‌سازی بیوماس کل، برگ، ساقه، ریشه و اندام ذخیره‌ای گندم پاییزه به‌ترتیب ۱۰، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۳ و ۰/۸ و صفر گرم در متر مربع در نظر گرفته شد (۴۲). همچنین مقادیر اولیه برای شبیه‌سازی بیوماس کل (IW_w) و شاخص سطح برگ ($ILAI_w$) علف هرز یولاف وحشی نیز از طریق معادلات ۱ و ۲ در مدل لحاظ شد. علاوه بر این مقادیر اولیه برای شبیه‌سازی بیوماس ساقه، ریشه و اندام ذخیره‌ای یولاف وحشی نیز مطابق با مقادیر اولیه گندم پاییزه در نظر گرفته شد.

$$IW_w = WS \times DENS \quad (1)$$

$$ILAI_w = IW_w \times LWR_w \times SLA_w \quad (2)$$

در اینجا WS ، متوسط وزن خشک گیاهچه علف هرز یولاف وحشی در زمان رویش که از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم، ۰/۰۰۰۲ گرم به‌دست آمد، $DENS$ ، تراکم بوته یولاف وحشی در متر مربع، LWR_w و SLA_w ، به‌ترتیب نسبت وزن برگ (گرم برگ بر گرم بوته) و سطح ویژه برگ (متر مربع برگ بر گرم برگ) می‌باشد که از طریق واسنجی به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۰۱۹ در نظر گرفته شد (۲).

شبیه‌سازی مراحل نمو

الگوی توزیع مواد فتوسنتزی به هر یک از اندام‌های مختلف در گیاهان، به‌طور مستقیم به مرحله نمو فنولوژیکی آنها وابسته است. در مدل‌های رشد معمولاً مراحل نمو گیاه (DVS) به‌عنوان یک متغیر بدون بعد، که دارای مقادیر صفر در مرحله سبز شدن ($DVS = 0$)، یک در مرحله گلدهی ($DVS = 1$) و ۲ در مرحله بلوغ ($DVS = 2$) است، در نظر گرفته می‌شود (۳۸). نمو فنولوژیک گیاه به‌طور خطی با افزایش درجه حرارت، در ۲ مرحله قبل و بعد از گلدهی افزایش می‌یابد. بنابراین لازم است در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک گیاه، سرعت نمو در این ۲ مرحله به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شود. در این شبیه‌سازی مراحل نمو از طریق انتگرال‌گیری از سرعت نمو (DVR ، بر حسب d^{-1}) در طی زمان محاسبه شد. سرعت نمو نیز به‌عنوان یک توابع میان‌یابی در درجه حرارت‌های مختلف برای قبل و بعد از مرحله گلدهی گندم به‌طور جداگانه در نظر گرفته شد (۳۹). همچنین سرعت نمو علف هرز یولاف وحشی نیز به‌عنوان یک توابع میان‌یابی با مقادیر ۱۰-، ۰، ۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت نمو، صفر، صفر و ۰/۲۱ برای شبیه‌سازی مرحله رویشی و ۱۰-، ۰، ۳۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت نمو، صفر، صفر و ۰/۰۶ برای شبیه‌سازی مرحله زایشی، در مدل لحاظ شد. این مقادیر از کرت‌هایی که به‌طور جداگانه برای ارزیابی رفتار علف‌هرز یولاف وحشی در نظر گرفته شده بود، استخراج گردید. درجه حرارت تجمعی ($TSUM$)، بر حسب درجه روز (رشد) نیز با در نظر گرفتن دمای پایه (T_B) و درجه حرارت مؤثر ($DTEFF$) بین مرحله سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا بلوغ از طریق انتگرال‌گیری از معادله زیر برای گندم و علف هرز یولاف وحشی به‌طور جداگانه از طریق معادلات زیر شبیه‌سازی شد:

$$\left(\frac{dT_{SUM_i}}{dt}\right) = DTEFF_i \times EMERG_i \quad (3)$$

$$DTEFF_i = \text{MAX}(0, T_A - T_{B_i}) \quad (4)$$

$$T_A = \frac{(T_{MAX} + T_{MIN})}{2} \quad (5)$$

در این معادلات $EMERG$ ، زمان سبز شدن بر حسب روز که برای گندم و یولاف وحشی ۱۰ روز پس از کاشت در نظر گرفته شد و T_A ، T_{MAX} و T_{MIN} ، به‌ترتیب متوسط درجه حرارت روزانه، درجه حرارت حداکثر روزانه و درجه حرارت حداقل روزانه و t ، گونه مورد بررسی (گندم یا علف هرز یولاف وحشی) می‌باشد.

شبیه‌سازی تولید بیوماس

بیوماس گیاه در طی فرآیند فتوسنتز متناسب با میزان تشعشع جذب شده توسط برگ‌ها براساس قانون لامبرت-بیر (۳۴) و میزان ماده خشک تولید شده به میزان تشعشع جذب شده (کارایی مصرف

در اینجا RDR، سرعت نسبی مرگ و میر برگ بر حسب گرم در متر مربع در روز، RDL، میزان مرگ و میر برگ بر حسب گرم در متر مربع در روز که به‌عنوان یک توابع میانه‌یابی طی درجه حرارت‌های مختلف در نظر گرفته شد می‌باشد (۲۳).

شبییه‌سازی تخصیص مواد فتوسنتزی به اندام‌های گیاهی

مواد فتوسنتزی تولید شده طی فرآیند فتوسنتز در ادامه به اندام‌های مختلف گیاه (ریشه، برگ، ساقه و اندام‌های ذخیره‌ای) اختصاص می‌یابد. میزان تخصیص مواد بین اندام‌های مختلف، بسته به نوع اندام و مرحله نمو متفاوت می‌باشد. در این شبیه‌سازی تخصیص مواد فتوسنتزی بین اندام‌های مختلف گندم و یولاف وحشی از طریق انتگرال‌گیری از معادله زیر صورت گرفت:

$$\left(\frac{dO_i}{dt}\right) = \left(\frac{dW_i}{dt}\right) \times C_{ij} \quad (11)$$

در اینجا $\frac{dO_i}{dt}$ سرعت افزایش وزن اندام‌های گیاهی به‌صورت روزانه و C، ضریب تخصیص ترکیبات فتوسنتزی بین اندام‌های مختلف گیاهی که وابسته به مرحله نمو گیاه است، i، گونه مورد بررسی و j، اندام‌های گیاهی که شامل: R، ریشه، L، برگ، ST، ساقه و SO، اندام ذخیره‌ای می‌باشد.

انتقال مجدد ترکیبات فتوسنتزی

ترکیبات فتوسنتزی به‌طور موقت قبل از گلدهی ($DVS < 1$) در اندام‌های رویشی گیاه ذخیره شده و سپس بعد از گلدهی ($DVS > 1$) به سمت اندام‌های ذخیره‌ای انتقال می‌یابند (۳۵). در گندم به‌طور متوسط حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد از وزن خشک اندام‌های ذخیره‌ای، ناشی از انتقال مجدد ترکیبات فتوسنتزی ذخیره شده در اندام‌های رویشی می‌باشد (۲۴). میزان انتقال مجدد ترکیبات فتوسنتزی (TRANSL) تنها برای گندم و توسط روابط زیر شبیه‌سازی شد:

$$TRANSL = \begin{cases} 0, & \text{if } DVS < 1 \\ WST_C \times DVR_i \times FR_C & \text{if } DVS \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

در اینجا WST_C ، وزن خشک ساقه گندم بر حسب گرم در متر مربع و FR_C ، ضریب انتقال مواد فتوسنتزی از ساقه به اندام ذخیره‌ای گندم می‌باشد که در این شبیه‌سازی ۳۰ درصد در نظر گرفته شد.

شبییه‌سازی خسارت علف هرز یولاف وحشی

علف هرز یولاف وحشی از طریق رقابت برای جذب نور، آب و عناصر غذایی منجر به ایجاد خسارت بر رشد و عملکرد گندم می‌شود (۲۰، ۲۱، ۲۹). میزان این خسارت بسته به تراکم بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع متفاوت بوده و تا بیش از ۸۰ درصد نیز گزارش شده است (۵، ۶، ۹، ۱۰، ۱۴ و ۱۶). در این مدل خسارت این

نور) تولید می‌شود. در این مدل تولید بیوماس گندم و یولاف وحشی از طریق انتگرال‌گیری از معادله زیر شبیه‌سازی شد:

$$\left(\frac{dW_i}{dt}\right) = RUE_i \times FABS_i \quad (6)$$

در این معادله $\frac{dW_i}{dt}$ ، سرعت افزایش وزن خشک کل بر حسب گرم در متر مربع در روز، FABS، میزان تشعشع جذب شده توسط کانوبی گیاه (مگاژول بر متر مربع) و RUE، کارایی مصرف تشعشع کل، که به‌ترتیب برای گندم و یولاف وحشی ۱/۴ و ۱/۵ گرم بر مگاژول، در نظر گرفته شد (۲). کارایی مصرف نور متناسب با مراحل نمو گیاه تغییر می‌کند و معمولاً در مرحله بعد از گلدهی در مقایسه با مرحله قبل از آن پایین‌تر می‌باشد (۳۷)، اما در این شبیه‌سازی از تغییرات آن صرف‌نظر شد. همچنین کارایی مصرف نور بسته به عملیات زراعی، زمانی که گیاه در شرایط نامساعدی همچون حمله آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز قرار می‌گیرد نیز کاهش می‌یابد (۴۳).

شبییه‌سازی شاخص سطح برگ

افزایش شاخص سطح برگ گیاه $\left(\frac{dLAI_i}{dt}\right)$ به‌طور مستقیم تابعی از میزان تولید سطح برگ سبز $\left(\frac{dGLAI_i}{dt}\right)$ بر حسب گرم در متر مربع در روز و میزان مرگ و میر یا پیری برگ‌ها $\left(\frac{dDLAI_i}{dt}\right)$ بر حسب گرم در متر مربع در روز می‌باشد. شبیه‌سازی شاخص سطح برگ گندم و یولاف وحشی از طریق انتگرال‌گیری از معادله زیر صورت گرفت:

$$\left(\frac{dLAI_i}{dt}\right) = \left(\frac{dGLAI_i}{dt}\right) - \left(\frac{dDLAI_i}{dt}\right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{dGLAI_i}{dt}\right) = \left(\frac{dW_i}{dt}\right) \times SLA_i \times CL_i \quad (8)$$

در اینجا SLA، سطح ویژه برگ که در این شبیه‌سازی برای گندم و یولاف وحشی از طریق واسنجی ۰/۰۱۹ در نظر گرفته شد (۲) و (۲۳)، CL، ضریب تخصیص مواد فتوسنتزی به سمت برگ‌ها (تابعی از مراحل نمو) می‌باشد.

شبییه‌سازی پیری برگ‌ها

پیری برگ، به کاهش فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه که منجر به کاهش بیوماس آن می‌شود، اشاره دارد. از طرفی بعد از بسته شدن کانوبی، سایه‌اندازی برگ‌ها روی یکدیگر نیز منجر به کاهش کارایی آنها می‌شود. پیری برگ‌ها به‌طور مستقیم وابسته به مراحل نمو می‌باشد و عموماً بعد از مرحله گلدهی رخ می‌دهد (۳۵). در این مدل پیری برگ‌های گندم و یولاف وحشی به‌عنوان تابعی از مرحله نمو و درجه حرارت و از طریق معادلات زیر در طی زمان شبیه‌سازی شد:

$$\left(\frac{dDLAI_i}{dt}\right) = LAI_i \times RDR_i \quad (9)$$

$$RDR_i = \begin{cases} 0 & \text{if } DVS < 1 \\ f(RDL_i, T_A) & \text{if } DVS \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

علف هرز بر رشد و عملکرد گندم برآیند ۲ عامل زیر می‌باشد:

الف) رقابت برای جذب نور که براساس معادلات زیر شبیه‌سازی شد (۲۹):

$$FABS_C = FABS_T - FABS_W \quad (13)$$

$$FABS_W = FABS_T \times \left(\frac{(LAI_W \times K_W)}{((LAI_C \times K_C) + (LAI_W \times K_W))} \right) \quad (14)$$

$$FABS_T = RAD \times (1 - e^{((-K_C \times LAI_C) + (-K_W \times LAI_W))}) \quad (15)$$

در این معادلات $FABS_T$ ، $FABS_C$ و $FABS_W$ به ترتیب میزان تشعشع جذب شده توسط کانوپی مخلوط، کانوپی گندم و کانوپی یولاف وحشی، LAI_C و LAI_W ، به ترتیب شاخص سطح برگ گندم و یولاف وحشی، K_C و K_W ، به ترتیب ضریب خاموشی نور توسط کانوپی گندم و یولاف وحشی و RAD ، میزان تشعشع کل روزانه در بالای کانوپی است. ضریب خاموشی نور برای گندم و یولاف وحشی به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۵۵ بود (۲ و ۲۳).

ب) رقابت برای آب و عناصر غذایی که در این مدل برای ساده‌سازی شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان عامل کاهش از کارایی مصرف نور گندم (RF_W) در نظر گرفته شد. این عامل کاهش به‌طور مستقیم با بیوماس کل علف هرز یولاف وحشی در ارتباط است (۴۲).

$$RF_W = e^{(-0.003 \times W_W)} + (1 - e^{(-0.003 \times W_W)}) \times e^{(-0.003 \times W_W \times (T-1) \times 0.0277)} \quad (16)$$

در این معادله W_W ، میزان بیوماس علف هرز یولاف وحشی بر حسب گرم در متر مربع می‌باشد که از طریق انتگرال‌گیری از سرعت رشد یولاف وحشی در طی دوره رشد شبیه‌سازی شد (معادله ۶) و T ، روز پس از سبز شدن است.

ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی این مدل، یک آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، واقع در ۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر مشهد انجام شد. متوسط بارندگی سالیانه ۲۸۶ میلی‌متر و حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه در این منطقه به ترتیب ۴۲ و ۲۷/۸- درجه سانتی‌گراد است. آماده‌سازی مزرعه شامل شخم نیمه‌عمیق، سپس دیسک و کود پاشی، قبل از کاشت انجام شد. براساس نتایج آزمایشگاه خاکشناسی میزان ۴۰ تن در هکتار کود دامی کاملاً پوسیده، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم، قبل از کاشت به خاک اضافه شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار و ۵ تیمار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل تراکم‌های صفر، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع بود. واحدهای آزمایش به ابعاد ۳ × ۳ متر مربع بود. آبیاری بر حسب نیاز و به روشی غرقابی صورت گرفت. در تمام طول فصل رشد، از هجوم سایر علف‌های هرز، آفات و

بیماری‌های گیاهی به کورت‌های آزمایش جلوگیری شد و به این صورت شرایط کاملاً مطلوبی برای رشد و نمو گندم فراهم شد. رقم گندم پاییزه مورد بررسی، فلات بود. بذر گندم به‌صورت دستی و با فواصل ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف‌ها و در عمق ۳ تا ۵ سانتی‌متری کاشت شد. تراکم نهایی گندم ۴۰۰ بوته در متر مربع بود. بذر گندم و علف هرز یولاف وحشی در تاریخ ۲۰ مهرماه ۱۳۸۹ کشت گردید. بذر علف هرز یولاف وحشی از مزارع اطراف جمع‌آوری شد و سپس برای شکستن خواب بذر از پیش تیمار سرما و رطوبت به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد استفاده شد (۴۰). در تمامی تیمارهای مورد بررسی بذر علف هرز یولاف وحشی با تراکم بالاتر در بین ردیف‌های گندم کشت شد و در مرحله چهار تا پنج برگی، برای رسیدن به تراکم‌های مورد نظر، اقدام به عمل تنک کردن بوته‌ها شد.

اندازه‌گیری‌ها

اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت مراحل نمو بر حسب روز پس از سبز شدن و نمونه‌برداری‌های تخریبی از بوته‌های گندم و علف هرز یولاف وحشی بود. برای نمونه‌برداری‌های تخریبی از مرحله نمو ساقه رفتن تا مرحله رسیدگی کامل، نمونه‌های تصادفی (در هر کرت، برای گندم و یولاف وحشی به‌طور جداگانه ۲۰ سانتی‌متر مربع) جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و وزن خشک گیاه، برداشت و سپس شاخص سطح برگ و ماده خشک آنها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه Leaf Area Meter (مدل لای-کو، Li-cor) استفاده شد و جهت اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند. برای ثبت عملکرد نهایی گندم نیز در انتهای دوره رشد، نیم متر مربع از هر کرت برداشت شد و سپس عملکرد کل و دانه اندازه‌گیری شد.

به‌منظور ارزیابی مدل از برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده (O_i) و داده‌های شبیه‌سازی شده (S_i) و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ و برای اندازه‌گیری دقت مدل از روش درصد جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، که اختلاف نسبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد، استفاده شد (۱۹):

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{O} \quad (17)$$

در این ارزیابی اگر نتایج حاصل از درصد جذر میانگین مربعات خطا کمتر از ۱۰ باشد، نشان می‌دهد که شبیه‌سازی با درجه عالی، بین ۱۰ تا ۲۰، با درجه خوب، بین ۲۰ تا ۳۰، با درجه متوسط و بالاتر از ۳۰، از دقت قابل قبولی برخوردار نخواهد بود.

نتایج و بحث

مراحل نمو فنولوژیک گندم و علف هرز یولاف وحشی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که گندم پاییزه و علف هرز یولاف وحشی با کسب به‌ترتیب ۱۱۷۰/۸ و ۱۳۱۱/۴ درجه روز رشد، در ۱۹۸ و ۲۰۶ روز پس از سبز کاشت به مرحله گلدهی ($DVS = 1$) رسیده و سپس به علت افزایش سرعت نمو ناشی از بالا رفتن متوسط درجه حرارت روزانه، با اکتساب به‌ترتیب ۸۳۵/۱ و ۴۷۱/۱ درجه روز رشد، در ۲۴۰ و ۲۳۰ روز پس از سبز کاشت به مرحله رسیدگی کامل ($DVS = 2$) رسید. بنابراین میزان کل درجه حرارت تجمعی از زمان سبز شدن تا رسیدگی کامل گندم و یولاف وحشی به‌ترتیب، ۲۰۰۵/۹ و ۱۷۸۳/۵ درجه روز رشد بود. نتایج حاصل از آزمایش مزرعه نیز رسیدن تا مرحله گلدهی و برداشت را برای گندم و علف هرز یولاف وحشی به‌ترتیب، ۱۹۲ و ۲۰۲ روز تا گلدهی و ۲۳۹ و ۲۲۵ روز تا مرحله رسیدگی کامل نشان داد. اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای گندم در مرحله قبل از گلدهی و بعد از آن به‌ترتیب، شش و یک روز بود، در حالی که برای یولاف وحشی در مرحله قبل و بعد از گلدهی به‌ترتیب، چهار و پنج روز بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مراحل نمو و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، نشان داد که بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مرحله نمو

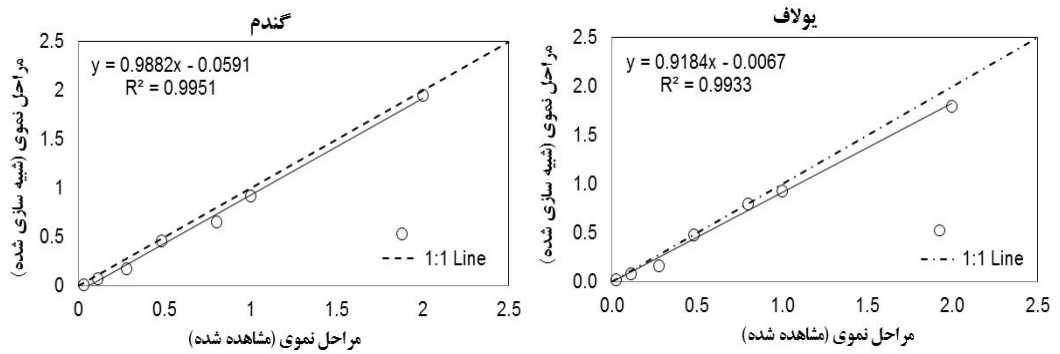
گندم، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و مدل قادر بود تا ۹۹ درصد از نتایج را پیش‌بینی کند، در حالی که برای مرحله نمو یولاف وحشی اختلاف معنی‌دار بود، با این حال مدل توانست تا ۹۹ درصد از نتایج مشاهده شده در مزرعه را پیش‌بینی کند (جدول ۲ و شکل ۲). علاوه بر این، مقدار جذر میانگین مربعات خطا نیز که نشان‌دهنده میزان دقت مدل برای شبیه‌سازی مراحل نمو گندم و علف هرز یولاف وحشی و مقایسه آن با داده‌های مشاهده‌ای است، به‌ترتیب ۱۰/۳۸ و ۱۴/۵ درصد بود (جدول ۲). بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که در مجموع مدل قابلیت قابل قبولی در شبیه‌سازی مراحل نمو گندم و علف هرز یولاف وحشی داشت.

فری و همکاران (۲۷) نیز در یک بررسی مراحل نمو ذرت را توسط مدل LINTUL 2 برای شرایط رطوبتی مختلف در اسپانیا شبیه‌سازی کردند و گزارش کردند که این مدل قابلیت قابل قبولی در پیش‌بینی مراحل نمو فنولوژیک گیاه داشت. هم‌چنین کوچکی و نصیری محلاتی (۱۵) نتایج حاصل از ارزیابی مدل SUCROS را برای مراحل نمو گندم در محدوده قابل قبولی گزارش کردند. نامبردگان اظهار داشتند با وجودی که داده‌های آزمایشی محدودی در مورد زمان گلدهی گندم در اختیار بود، ولی پیش‌بینی مدل در محدوده ۱۵ درصد نسبت به مشاهدات قرار داشت.

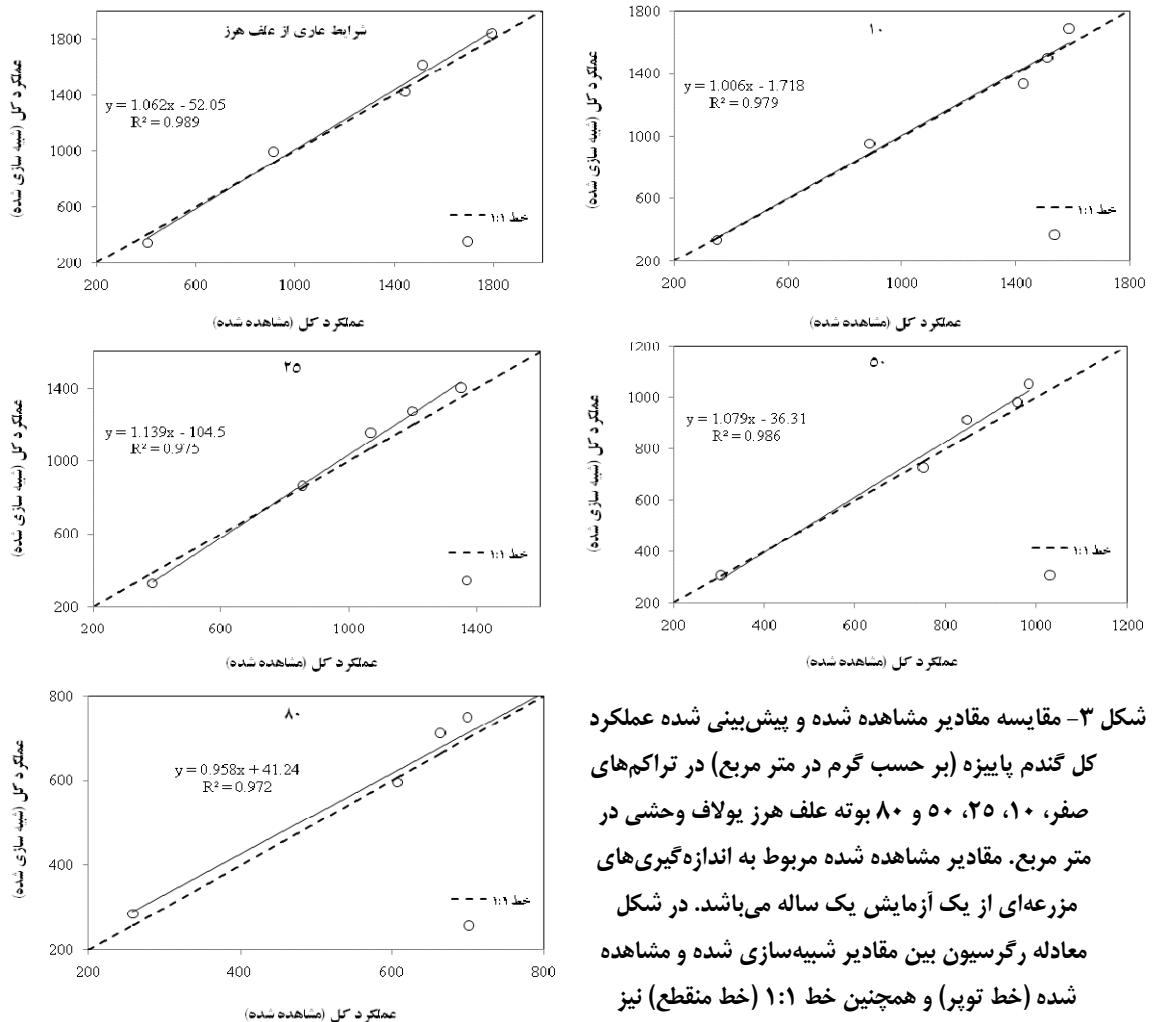
جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل برای مقادیر مراحل نمو، عملکرد کل گندم پاییزه و علف هرز یولاف وحشی و درصد کاهش عملکرد کل و دانه گندم به علت خسارت یولاف وحشی

متغییر	n	RMSE (%)	ضریب رگرسیون	شیب	t
مراحل نمو					
گندم پاییزه	۷	۱۰/۴	۰/۹۹	۰/۹۸۸	۰/۳۹ ns
یولاف وحشی	۷	۱۴/۵	۰/۹۹	۰/۹۱۸	۲/۷*
عملکرد کل گندم در تراکم‌های مختلف یولاف وحشی					
صفر (شرایط پتانسیل)	۵	۵/۴	۰/۹۸	۱/۰۶۲	۱/۰۲ ns
۱۰	۵	۵/۸	۰/۹۸	۰/۹۹۸	۰/۷۸ ns
۲۵	۵	۶/۱	۰/۹۹	۱/۱۳۹	۳/۲۰*
۵۰	۵	۵/۸	۰/۹۹	۱/۰۷۱	۱/۱۰ ns
۸۰	۵	۶/۰	۰/۹۷	۱/۰۵۳	۰/۸۵ ns
عملکرد کل یولاف وحشی در تراکم‌های مختلف کاشت					
۱۰	۵	۱۱/۰	۰/۹۵	۱/۰۹۱	۰/۷۴ ns
۲۵	۵	۶/۸	۰/۹۹	۱/۰۲۲	۱/۴۰ ns
۵۰	۵	۷/۷	۰/۹۷	۱/۰۵۲	۱/۴۷ ns
۸۰	۵	۴/۹	۰/۹۸	۰/۹۴۹	۱/۳۳ ns
درصد کاهش عملکرد کل گندم					
درصد کاهش عملکرد دانه گندم	۴	۱۳/۹	۰/۹۹	۰/۹۸۱	۱/۴۴ ns
درصد کاهش عملکرد کل گندم					
	۴	۷/۶	۰/۹۹	۰/۹۹۲	۱/۳۵ ns

RMSE، جذر میانگین مربعات خطا، ns، عدم معنی‌داری و *، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد.



شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده مراحل نمودی گندم و علف هرز یولاف وحشی. مقادیر مشاهده شده مربوط به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای از یک آزمایش یک ساله می‌باشد. در شکل معادله رگرسیون بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات (خط توپر) و خط ۱:۱ (خط منقطع) نیز نشان داده شده است.



شکل ۳- مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد کل گندم پایبزه (بر حسب گرم در متر مربع) در تراکم‌های صفر، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع. مقادیر مشاهده شده مربوط به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای از یک آزمایش یک ساله می‌باشد. در شکل معادله رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (خط توپر) و همچنین خط ۱:۱ (خط منقطع) نیز نشان داده شده است.

۸۰ بوته در متر مربع به‌ترتیب، ۳/۰، ۴/۸، ۱۰/۰ و ۱۰/۴ گرم در متر مربع، در مقایسه با میانگین‌هایی به‌ترتیب، ۲۷/۸، ۶۷/۹، ۱۳۱/۸ و ۲۰۴/۶ گرم در متر مربع بود. بنابراین در تمام تیمارهای مورد بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده شده اختلاف بسیار ناچیزی داشت و میزان دقت مدل برای عملکرد کل علف هرز یولاف وحشی در تراکم‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته در متر مربع به‌ترتیب، ۱۱/۰، ۶/۸، ۷/۷ و ۴/۹ درصد بود (جدول ۲). همچنین نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که در هیچ یک از تراکم‌های مورد ارزیابی نتایج برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد کل یولاف وحشی و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، اختلاف معنی‌داری نداشت و مدل توانست بیش از ۹۷ درصد از داده‌های مشاهده شده در آزمایش مزرعه را شبیه‌سازی کند (جدول ۲ و شکل ۴). بر این اساس این مدل قابلیت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد کل یولاف وحشی داشت.

اگرول و همکاران (۲۰ و ۲۱) نیز در بررسی خود، مدلی به نام اینفو کراپ (InfoCrop) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان زراعی در شرایط رقابت با آفات و بیماری‌ها برای شرایط هندوستان ارائه دادند. نامبردگان مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد کل گندم و برنج (*Oryza Sativa*) را به‌ترتیب، ۰/۵۵ و ۰/۲۱ تن در هکتار و برای عملکرد دانه به‌ترتیب، ۰/۸۱ و ۰/۴۴ تن در هکتار در شرایط مطلوب رشد گزارش کردند و بر این اساس قابلیت قابل قبولی از اجرای مدل اینفو کراپ نشان دادند. همچنین فری و همکاران (۲۷) در یک بررسی رشد و عملکرد ذرت را توسط مدل LINTUL2 برای شرایط رطوبتی مختلف در اسپانیا شبیه‌سازی کردند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش میزان آب مصرفی عملکرد از ۶/۵ تا ۱۲/۲ تن در هکتار افزایش یافت، در حالی که عملکرد مشاهده شده در شرایط مزرعه از ۶/۴ تا ۱۳/۶ تن در هکتار متغیر بود. بر این اساس نامبردگان اظهار داشتند که مدل لینتول ۲، قابلیت قابل قبولی در شبیه‌سازی رشد و عملکرد ذرت داشت. در بررسی دیگر، نصیری محلاتی و کوچکی (۱۹) در اجرای مدل WOFOST برای شبیه‌سازی تولید گندم در استان خراسان رضوی، مقدار جذر میانگین مربعات خطا را برای عملکرد دانه و روز تا خوشه‌دهی به‌ترتیب ۱۱/۳ و ۱۳/۱ درصد گزارش کردند. بنایان و کروت (۲۲) نیز، مقدار جذر میانگین مربعات خطا را در ارزیابی عملکرد کل و دانه گندم توسط مدل SUCROS، کمتر از ۱۰ درصد به‌دست آورده و عدم اختلاف معنی‌داری از مقایسه داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده گزارش کردند. کوچکی و نصیری محلاتی (۱۵) نیز در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم ایران توسط مدل SUCROS، مقدار جذر میانگین مربعات خطا را ۱۶/۸ درصد گزارش کردند.

بنایان و کروت (۲۲) نیز در ارزیابی مراحل نمو شبیه‌سازی شده گندم توسط مدل SUCROS و مقایسه آن با داده‌های مشاهده شده در ۴ منطقه مختلف انگلستان، مقدار جذر میانگین مربعات خطا را ۰/۹۹ درصد به‌دست آوردند و بر این اساس قابلیت قابل قبولی از پیش‌بینی مراحل نمو گندم توسط این مدل را گزارش کردند.

عملکرد کل

عملکرد کل گندم

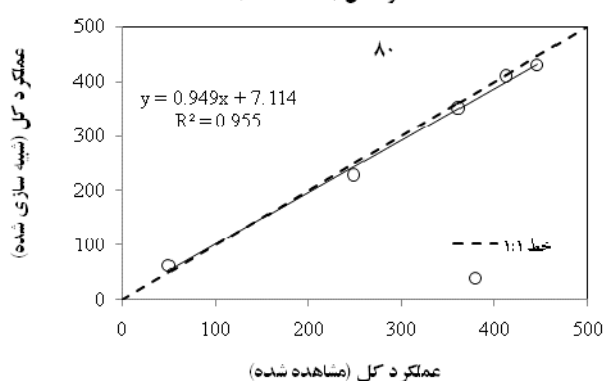
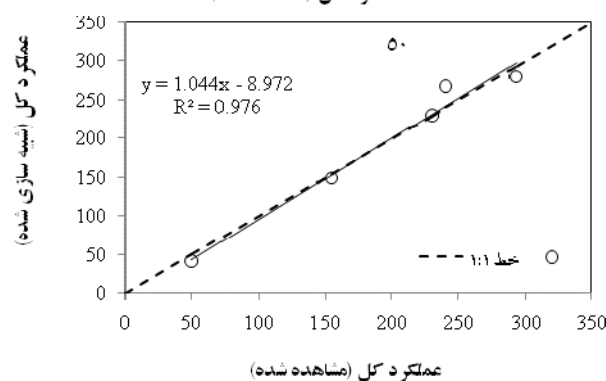
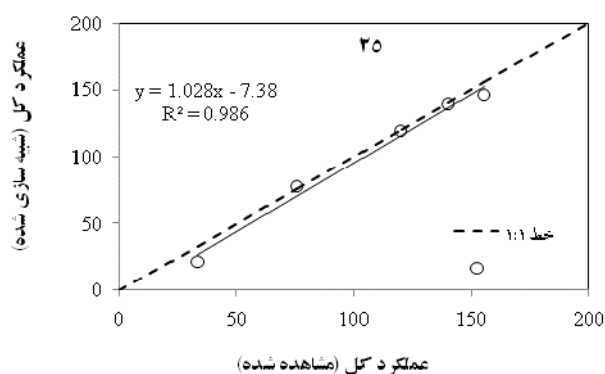
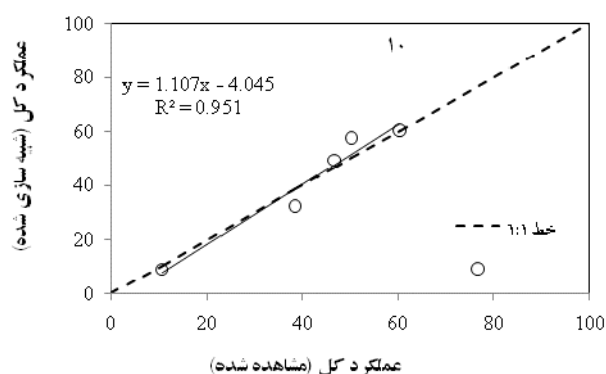
عملکرد کل اندازه‌گیری شده در زمان برداشت محصول برای تیمارهای صفر (شرایط عاری از علف هرز)، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع به‌ترتیب، ۱۷۹۶/۳، ۱۶۴۵/۱، ۱۴۸۴/۱، ۱۱۶۰/۳ و ۹۹۸/۱ گرم در متر مربع بود، در حالی که نتایج شبیه‌سازی‌ها میزان عملکرد کل را به‌ترتیب، ۱۸۳۷/۶، ۱۷۴۹/۷، ۱۵۵۷/۹، ۱۲۷۲/۴ و ۱۰۲۰/۲ گرم در متر مربع پیش‌بینی کرد. بنابراین در تمام تیمارهای مورد بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده شده اختلاف ناچیزی داشت، به‌طوری‌که میزان جذر میانگین مربعات خطا برای تیمارهای صفر، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع به‌ترتیب، ۶۸/۵، ۶۶/۲، ۶۲/۹، ۵۲/۳ و ۴۴/۴ گرم در متر مربع، در مقایسه با میانگین عملکرد کل‌هایی به‌ترتیب، ۱۲۴۱/۱، ۱۱۹۱/۳، ۱۰۹۰/۹، ۹۲۸/۲ و ۷۷۴/۳ بود. میزان دقت مدل نیز برای عملکرد کل گندم در تیمارهای صفر، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع به‌ترتیب، ۵/۴، ۵/۸، ۶/۱، ۵/۸ و ۵/۹ درصد بود (جدول ۲). همچنین نتایج برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نشان داد، به جز تیمار تراکم ۲۵ بوته یولاف وحشی در متر مربع، در سایر تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل قادر بود برای تیمارهای مختلف علف هرز یولاف وحشی بیش از ۹۸ درصد از داده‌های مشاهده شده در آزمایش مزرعه را پیش‌بینی کند (جدول ۲ و شکل ۳). بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که مدل قابلیت قابل قبولی برای پیش‌بینی تغییرات عملکرد کل گندم پاییزه در شرایط رقابت با علف هرز یولاف وحشی داشت.

عملکرد کل علف هرز یولاف وحشی

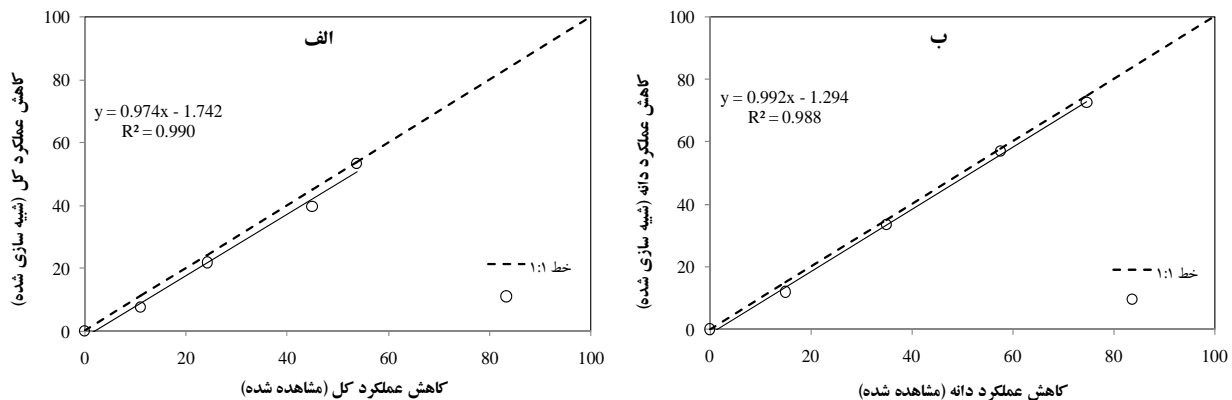
عملکرد کل مشاهده شده در زمان برداشت برای تراکم‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته در متر مربع به‌ترتیب، ۳۹/۳، ۱۰۵/۴، ۲۰۰/۴ و ۳۰۹/۴ گرم در متر مربع بود و نتایج شبیه‌سازی‌ها میزان عملکرد کل را به‌ترتیب، ۴۰/۵، ۹۸/۸، ۱۹۱/۷ و ۲۹۷/۸ گرم در متر مربع پیش‌بینی کرد. میزان جذر میانگین مربعات خطا برای تراکم‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰ و

ناچیزی داشت و میزان دقت مدل در پیش‌بینی میزان کاهش عملکرد کل و دانه گندم به علت خسارت علف هرز یولاف وحشی به ترتیب، ۱۳/۹ و ۷/۵ درصد بود (جدول ۲). همچنین نتایج برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، اختلاف معنی‌داری نداشت و مدل توانست ۹۹ درصد از کاهش عملکرد کل و دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند (جدول ۲ و شکل ۵). بر این اساس می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که مدل قابلیت قابل قبولی برای پیش‌بینی درصد کاهش عملکرد گندم پاییزه در شرایط رقابت با علف هرز یولاف وحشی داشت. اگر اول و همکاران (۲۰ و ۲۱) نیز میزان جذر میانگین خطا برای درصد کاهش عملکرد کل و دانه گندم در شرایط رقابت با آفات را به ترتیب ۳/۷ و ۴/۷ درصد گزارش کردند.

کاهش عملکرد گندم به علت رقابت علف هرز یولاف وحشی
با افزایش تراکم علف هرز یولاف وحشی در متر مربع، عملکرد کل و دانه مشاهده شده کاهش یافت. درصد کاهش عملکرد کل و دانه گندم پاییزه در تراکم‌های مختلف علف هرز یولاف وحشی به ترتیب، از ۵/۷ تا ۴۰/۱ و از ۸/۲ و ۵۹/۳ درصد متغیر بود. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نیز میزان کاهش عملکرد را به ترتیب از ۴/۴ تا ۴۱/۳ درصد برای عملکرد کل و از ۶/۹ تا ۵۹/۱ درصد برای عملکرد دانه گندم پیش‌بینی کرد. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای درصد کاهش عملکرد کل و دانه گندم در تراکم‌های مختلف یولاف وحشی به ترتیب، ۲/۷ و ۲/۱ درصد، در مقایسه با میانگین‌های به ترتیب ۱۷/۶ و ۲۶/۱ درصدی آنها بود. بنابراین در تمام تیمارهای مورد بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده شده اختلاف بسیار



شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد کل علف هرز یولاف وحشی (بر حسب گرم در متر مربع) در تراکم‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته در متر مربع. مقادیر مشاهده شده مربوط به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای از یک آزمایش یک ساله می‌باشد. در شکل معادله رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (خط توپر) و همچنین خط ۱:۱ (خط منقطع) نیز نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده درصد کاهش عملکرد کل (الف) و کاهش عملکرد دانه (ب) گندم پاییزه تراکم‌های صفر، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۸۰ بوته علف هرز یولاف وحشی در متر مربع. مقادیر مشاهده شده مربوط به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای از یک آزمایش یک ساله می‌باشد. در شکل معادله رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (خط توپر) و همچنین خط ۱:۱ (خط منقطع) نیز نشان داده شده است.

که شبیه‌سازی بیشتر شاخص‌های مورد بررسی از دقت بالای برخوردار بود، اینگونه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در مجموع این مدل قابلیت قابل قبولی برای پیش‌بینی تغییرات عملکرد گندم پاییزه در شرایط رقابت با علف هرز یولاف وحشی داشت. همچنین این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که می‌توان با تغییر پارامترهای مورد نیاز در آن، رقابت سایر علف‌های هرز محصول گندم و یا محصولات زراعی دیگر را نیز شبیه‌سازی کرد، از این رو پیشنهاد می‌شود برای ارزیابی رقابت علف‌های هرز با محصولات زراعی دیگر و در سایر نقاط کشور نیز به کار برده شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که میزان جذر میانگین مربعات خطا و دقت مدل در پیش‌بینی شاخص‌های مورد ارزیابی و مقایسه آنها با داده‌های مشاهده شده در تمام تراکم‌های علف هرز یولاف وحشی از قابلیت قابل قبولی برخوردار بود، در حالی که نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، به استثنای عملکرد کل گندم در تیمار ۲۵ بوته یولاف وحشی در متر مربع و مراحل نمو فنولوژیکی علف هرز یولاف وحشی، اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۳). بنابراین از آنجا

منابع

- ۱- ابراهیم پور نورآبادی، ف.، ا. آینه‌بند، ق. نورمحمدی، ح. موسوی نیا، و م. مسگرباشی. ۱۳۸۵. بررسی برخی ویژگی‌های اکوفیزیولوژیک گندم در رقابت با یولاف وحشی. مجله پژوهش و سازندگی ۷۳: ۱۲۵-۱۱۷.
- ۲- احمدوند، گ.، ع. کوچکی، م. نصیری محلاتی، و ح. رحیمیان مشهدی. ۱۳۸۱. بررسی ساختار کانوپی و کارایی جذب و مصرف نور و نیتروژن در رقابت درون و برون گونه‌ای گندم و یولاف وحشی. پایان نامه دکترای زراعت گرایش فیزیولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۲۱ ص.
- ۳- باغستانی میبیدی، م. و ا. زند. ۱۳۸۴. بررسی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک موثر در رقابت گندم زمستانه (*Triticum aestivum*) در مقابل یولاف وحشی (*Avena ludoviciana* L.). مجله پژوهش و سازندگی ۶۸: ۵۶-۴۱.
- ۴- بهرامی، ن.، غ. رجبی، م. رضاییگی، و ک. کمالی. ۱۳۸۱. بررسی سطح زیان اقتصادی سن گندم در مزارع گندم استان کرمانشاه. مجله آفات و بیماری‌های گیاهی ۷۰: ۴۴-۲۹.
- ۵- پرچی، پ. و پ. بهداروند. ۱۳۸۸. رقابت تراکم‌های مختلف یولاف وحشی با گندم بهاره در مقادیر مختلف نیتروژن. فصلنامه علمی تخصصی فیزیولوژی گیاهان زراعی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز ۱: ۸۸-۸۱.
- ۶- جعفرنژاد، ح. و ح. رحیمیان مشهدی. ۱۳۸۲. مطالعه رقابت بین ارقام گندم با یولاف وحشی و منداب. فصلنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

۱۰: ۵۴-۳۹.

- ۷- حسن زاده دلویی، م.، ح. رحیمیان مشهدی، م. نصیری محلاتی، و ق. نور محمدی. ۱۳۸۱. بررسی رقابت یولاف وحشی (*Avena ludoviciana* L.) با گندم زمستانه (*Triticum aestivum*) در تراکم‌های مختلف. مجله علوم زراعی ایران ۴: ۱۲۷-۱۱۶.
- ۸- خانجانی، م. ۱۳۸۳. آفات گیاهان زراعی ایران. انتشارات دانشگاه بو علی سینا همدان. ۷۳۱ ص.
- ۹- زند، ا.، ع. کوچکی، ح. حیمیان مشهدی، ر. دیهیم فرد، س. صوفی زاده، و م. نصیری محلاتی. ۱۳۸۲. مطالعه برخی خصوصیات اکوفیزیولوژیکی مؤثر در افزایش توانایی رقابت ارقام گندم (*Triticum aestivum*) ایرانی قدیم و جدید با علف هرز یولاف وحشی (*Avena ludoviciana*). مجله پژوهش‌های زراعی ایران ۱: ۱-۱۰.
- ۱۰- سرخی‌لله لو، ف.، ع. دباغ محمدی نسب، و ع. جوانشیر. ۱۳۸۷. بررسی ویژگی‌های برگ و نسبت ساقه در تداخل اندام‌های زیرزمینی و هوایی گندم زراعی (*Triticum aestivum*) و تراکم‌های مختلف یولاف وحشی (*Avena fatua*). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۲: ۴۴۶-۴۳۵.
- ۱۱- سلطانی، ا.، و م. قلی‌پور. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رشد، عملکرد و مصرف آب نخود. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۳: ۷۹-۶۹.
- ۱۲- سلیمی، ح.، و س. ج. انگجی. ۱۳۸۱. بررسی میزان رقابت و خسارت تراکم‌های متفاوت یولاف وحشی در زراعت گندم زمستانه. مجله بیماری‌های گیاهی ۳۸: ۲۶۲-۲۵۱.
- ۱۳- عطاریان، ا.، و م. ح. راشد محصل. ۱۳۸۱. اثر رقابت یولاف وحشی بر عملکرد و اجزا عملکرد سه رقم گندم زمستانه. مجله علوم و صنایع کشاورزی ۱۶: ۳۲-۲۵.
- ۱۴- قرخلو، ج.، د. مظاهری، ع. قنبری، و م. قنادها. ۱۳۸۴. ارزیابی آستانه خسارت اقتصادی علف‌های هرز در گندم در منطقه مشهد. مجله علوم کشاورزی ایران ۳۶: ۱۴۳۵-۱۴۲۹.
- ۱۵- کوچکی، ع.، و م. نصیری محلاتی. ۱۳۸۷. تاثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری. مجله پژوهش‌های زراعی ایران ۶: ۱۵۳-۱۳۹.
- ۱۶- منتظری، م. ۱۳۸۶. تاثیر یولاف وحشی (*Avena ludoviciana*) فالاریس (*Phalaris minor*) و خردل وحشی (*Sinapis arvensis*) بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم. مجله پژوهش و سازندگی ۷۴: ۷۸-۷۱.
- ۱۷- نصیری محلاتی، م. (اکولوژی تولید محصولات زراعی، فصل ۱۴). در کوچکی، ع.، و م. خواجه حسینی. ۱۳۸۷. زراعت نوین. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۷۱۲ ص.
- ۱۸- نصیری محلاتی، م. (مدلسازی، فصل ۱۶). در کوچکی، ع.، و م. خواجه حسینی. ۱۳۸۷. زراعت نوین. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۷۱۲ ص.
- ۱۹- نصیری محلاتی، م.، و ع. کوچکی. ۱۳۸۸. پهنه بندی آگرواکولوژیکی گندم در استان خراسان: برآورد پتانسیل و خلاء عملکرد. مجله پژوهش‌های زراعی ایران ۷: ۷۰۹-۶۹۵.
- 20- Aggarwal, P. K., N. Kalra, S. Chander, and H. Pathak. 2006. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *Agricultural Systems* 89: 1-25.
- 21- Aggarwal, P. K., B. Banerjee, M. G. Daryaei, A. Bhatia, A. Bala, S. Rani, S. Chander, H. Pathak, and N. Kalra. 2006. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. II. Performance of the model. *Agricultural Systems* 89: 47-67.
- 22- Bannayan, M., and N. M. J. Crout. 1999. A stochastic modelling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Research* 62: 85-95.
- 23- De Wit, C. T. 1997. LINTUL1: A simple general crop growth model for optimal growing conditions (example: spring wheat). Graduate School for Production Ecology. Dept of Theoretical Production Ecology of the Wageningen Agricultural University, and DLO-Research Centre for Agrobiology and Soil Fertility.
- 24- Groot, J. J. R. 1987. Simulation of nitrogen balance in a system of winter wheat and soil. Simulation Report CABO-TT nr. 13, Wageningen. 21, 22 and 23. Find new references.
- 25- Jones, C. A., and J. R. Kiniry. 1986. Ceres-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, Texas, USA.
- 26- Khan, I., H. Gul, M. I. Khan, and M. Gul. 2007. Effect of Wild Oat (*Avena fatua* L.) Population and Nitrogen Levels on Some Agronomic Traits of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Turkish Journal of Agriculture & Forestry* 31:91-101.
- 27- Farre, I., M. van Oijen, P. A. Leffelaar, and J. M. Faci. 2000. Analysis of maize growth for different irrigation

- strategies in northeastern Spain. *European Journal of Agronomy* 12: 225-238.
- 28- Kropff, M. J., and C. J. T. Spitters. 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.
- 29- Kropff, M. J., and H. H. Van Laar. 1993. Modeling Crop-Weed Interactions. International Rice Research Institute, PO Box 933, 1099 Manila, The Philippines.
- 30- Kropff, M. J., P. S. Teng, P. K. Aggarwal, B. Bouman, J. Bouma, and H. H. van Laar. 1996. Applications of Systems Approaches at the Field Level, vol. 2. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. p. 465.
- 31- Maiorano, A., A. Reyneri, D. Sacco, A. Magni, and C. Ramponi. 2009. A dynamic risk assessment model (FUMAgain) of fumonisin synthesis by *Fusarium verticillioides* in maize grain in Italy. *Crop Protection* 28: 243-256.
- 32- Martin, M. P., L. D. Field, and R. J. Field. 1987. Competition between plants of wild oat (*Avena fatua*) and wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Research* 27: 119-124.
- 33- Matthews, R. B., and W. Stephens. 2002. Crop-Soil Simulation Models, Application in Developing Countries, CABI Publishing. 277 pp.
- 34- Monsi, M., and T. Saeki. 1953. Uber den Lichtfaktor in den. Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die. Stoffproduktion. *The Journal of Japanese Botany* 14: 22-52.
- 35- Penning de Vries, F. W. T., D. M. Jansen, H. F. M. Berge, and A. Bakema. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. IIRI, Los Banos, and Pudoc, Wageningen.
- 36- Rohrig, M., and H. Stutzel. 2001. A model for light competition between vegetable crops and weeds. *European Journal of Agronomy* 14: 13-29.
- 37- Sinclair, T. R., and R. C. Muchow. 1999. Radiation-use efficiency. *Advances in Agronomy* 65: 215-265.
- 38- Spitters, C. J. T. 1989. Weeds: population dynamics, germination and competition. In: Rabbinge, R., S. A. Ward, and H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and Systems Management in Crop Protection*. Pudoc, Wageningen, the Netherlands. 182-217.
- 39- Spitters, C. J. T., H. van Keulen, and D. W. G. Kraalingen. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbinge, R., S. A. Ward, and H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and Systems Management in Crop Protection*. Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 147-181.
- 40- Stephen, W. A., and J. D. Ross. 1981. Studies in Wild Oat Seed Dormancy II. ACTIVITIES OF PENTOSE PHOSPHATE PATHWAY DEHYDROGENASES. *Plant Physiology* 68:15-17.
- 41- Willocquet, L., S. Savary, L. Fernandez, F. Elazegui, and P. Teng. 2000. Development and evaluation of a multiple-pest, production situation specific model to simulate yield losses of rice in tropical Asia. *Ecological Modelling* 131: 133-159.
- 42- Willocquet, L., J. N. Aubertot, S. Lebard, C. Robert, C. Lannou, and S. Savary. 2008. Simulating multiple pest damage in varying winter wheat production situations. *Field Crops Research* 107: 12-28.
- 43- Van Diepen, C. A., J. Wolf, H. Van Keulen, and C. Rappoldt. 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management* 5: 16-24.
- 44- Yang, H. S., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer, and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-maize-a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research* 87: 131-154.