

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی کلزا (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری)

مهران حیدری بنی - دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
حجت‌الله یزدان‌پناه* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
عبدالمحمد محنت‌کش - استادیار بخش آب و خاک، مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی شهر کرد

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱۶

چکیده

برای مطالعه اثرات اقلیم و تغییرات آن بر تولید محصولات کشاورزی، از تلفیق مدل‌های گردش عمومی جو و مدل‌های آب و هوا-محصول استفاده می‌شود. در این پژوهش ضرایب مدل APSIM برای شبیه‌سازی عملکرد و مراحل فنولوژی کلزا واسنجی شد و به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم از فراسنج‌های اقلیمی ریزمقیاس شده مدل دینامیکی NOAA-GFDL استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که با سناریوی RCP8.5 مدت زمان مراحل فنولوژیکی سبز کردن، گل‌دهی، غلاف‌بندی، و رسیدن و با سناریوی RCP4.5 مراحل گل‌دهی و غلاف‌بندی کاهش خواهد داشت و بیشترین میزان کاهش در دوره گل‌دهی با سناریوی RCP8.5 دیده می‌شود. با این سناریو دوره رزت ۱۰ روز و با سناریوی RCP4.5 این دوره ۹ روز طولانی‌تر خواهد شد. پیش‌بینی می‌شود میانگین عملکرد کلزا با هر دو سناریوی مورد مطالعه تا ۱۸٫۶ درصد افزایش یابد. چشم‌انداز افزایش عملکرد کلزا در استان چهارمحال و بختیاری بیانگر آن است که این منطقه تا افق ۲۰۳۰ از استعداد مطلوبی در کشت و توسعه این محصول برخوردار خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: آپسیم، تغییر اقلیم، چهارمحال و بختیاری، عملکرد، فنولوژی، کلزا.

مقدمه

اقلیم نقشی کلیدی در رشد و تولید گیاهان دارد و تغییرات آن به طور مستقیم بر کاشت و گستره زیر کشت محصولات کشاورزی اثرگذار است (آنتل، ۲۰۱۰؛ فانو، ۲۰۱۳). پیامدهای تغییر اقلیم و بحران آب در سال‌های اخیر در زاگرس مرکزی ایران، به‌عنوان تأمین‌کننده آب رودخانه‌های فلات مرکزی و جلگه خوزستان، نیز آشکار شده است؛ با وجود این، درباره پیامدهای تغییر اقلیم بر کشاورزی منطقه پژوهش‌های اندکی انجام شده است. بدون وجود و بهره‌گیری از مدل‌های واسنجی شده آب و هوا محصول، شناخت پیامدهای تغییر اقلیم بر کشاورزی امکان‌پذیر نیست. با وجود این، محدودیت‌ها و چالش‌هایی در بهره‌گیری از این گونه مدل‌ها وجود دارد. مثلاً، ارقام قابل انتخاب ویژه منطقه یا کشور توسعه‌دهنده مدل بوده و از این رو معرفی ارقام جدید و واسنجی ضرایب مرحله‌ای مهم در این زمینه به‌شمار می‌رود. آپسیم^۱ از جمله مدل‌های پویا در شبیه‌سازی عملکرد و مراحل رشد محصولات مختلف کشاورزی است؛ در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری با این مدل در زمینه شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصول انجام شده یا در حال اجراست. بهینه‌سازی و واسنجی مراحل فنولوژیکی چهار وارثه سویا در مدل آپسیم توسط آرکانتولیس و همکاران (۲۰۱۴) توانسته است زمان

آغاز گل‌دهی را با ریشه دوم خطای ۳/۱ روز و زمان بلوغ فیزیولوژیکی را با ریشه دوم خطای ۵/۵ روز پیش‌بینی کند. زلکی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از این مدل و داده‌های بلندمدت اقلیمی اثرات تاریخ کاشت و آب در دسترس در زمان کاشت را بر عملکرد دانه چند وارینه کلزا آزمایش کردند. نتایج نشان داده است که تغییرات سالانه عملکرد محصول بیشتر به دلیل تغییرات میزان بارش بوده و تاریخ کاشت نیز بر روی طول دوره رشد و عملکرد مؤثر است. زنگ و همکاران (۲۰۱۶) از آپسیم، به عنوان ابزاری برای شناسایی شیوه‌های مدیریت مناسب در چالش‌های تولید آفتابگردان، در خاک‌های شور در چین استفاده کردند. کاربرد این مدل نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد این محصول در تیمارهایی با شوری خاک مختلف داشته است. شبیه‌سازی تعداد روز گل‌دهی و رسیدگی، شاخص سطح برگ، زیست‌توده، و عملکرد دانه پنج رقم گندم بهاره در پاکستان (احمد و همکاران، ۲۰۱۶) نشان داد که کارایی این مدل در شبیه‌سازی بیش از ۸۰ درصد بوده است. نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی، زیست‌توده، و عملکرد دانه ذرت با استفاده از مدل واسنجی شده آپسیم در شمال کشور چین (سان و همکاران، ۲۰۱۶) نشان داد که عوامل اقلیمی، از جمله ساعت آفتابی و دمای روزانه، در مرحله پُرشدن دانه تأثیر مثبتی در عملکرد ذرت دارد. ضمن آنکه شیوه‌های مختلف مدیریت از جمله تراکم بوته مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر عملکرد ذرت است. مطالعه گروهی از محققان آسیایی با توسعه‌دهندگان مدل آپسیم نشان‌دهنده آن است که آپسیم توانسته مراحل فنولوژی و عملکرد محصول برنج و محصولات مهم دیگر نظیر ذرت، گندم، و پنبه را در شرق آسیا به‌خوبی شبیه‌سازی کند (گایدون و همکاران، ۲۰۱۷). در ایران، عباسپور و عباسپور (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای با بررسی کارایی مدل آپسیم در مدیریت مصرف کود نیتروژن و آبیاری ذرت نشان دادند که این مدل توانسته است عملکرد این محصول را با خطای نسبی در حدود ۵/۹۱- درصد شبیه‌سازی و میزان نیتروژن خاک را در اعماق مختلف خاک به‌خوبی برآورد کند. در مطالعه‌ای دیگر (پرتووش، ۱۳۹۴)، با استفاده از آپسیم و تیمارهای مختلف کودی، میزان شست‌وشوی نیترات از ناحیه ریشه نیشکر در خوزستان بررسی شد. نتایج بیانگر آن است که متناسب با مقادیر تیمارها این مدل توانسته میزان نیترات را در عمق‌های مختلف شبیه‌سازی کند.

از دو دهه آخر قرن بیستم تاکنون، مسئله تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین چالش‌های بشر تبدیل شده است. نگرانی از کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و امنیت غذایی از جمله مواردی است که این موضوع را در جهان مطرح ساخته است (آنتل، ۲۰۱۰). در پنجمین گزارش ارزیابی مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم (آی پی سی سی، ۲۰۱۴) سناریوهای جدیدی به نام RCP^۱ ارائه شد که ساختار آن‌ها با سناریوهای قبلی، SRES^۲، تفاوت دارد. واداشت تابشی گازهای گلخانه‌ای عامل ایجاد گرمایش در نظر گرفته شده است. مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی نیازمند برآورد وضعیت اقلیمی در آینده است؛ این برآوردها به وسیله مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)^۳ و بر اساس سناریوهای مختلف انتشار انجام می‌شود. تلفیق این نتایج با مدل‌های شبیه‌سازی رشد امکان پیش‌بینی عملکرد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ بائو و همکاران، ۲۰۱۵؛ کاسی و همکاران، ۲۰۱۵؛ سینگلز و همکاران، ۲۰۱۴؛ انور و همکاران، ۲۰۱۵) و مراحل فنولوژی (انور و همکاران، ۲۰۱۵؛ سامر و همکاران، ۲۰۱۳؛ قربانی و سلطانی، ۱۳۹۳) را در شرایط اقلیمی آینده فراهم می‌کند. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژی محصولات کشاورزی نتایج متفاوتی را در مناطق مختلف نشان می‌دهد. کریم و همکاران (۱۹۹۶)، با استفاده از مدل سرس^۴، اثر تغییر اقلیم را بر عملکرد گندم و برنج در غلظت‌های مختلف دی اکسید کربن و افزایش دما در بنگلادش بررسی کردند. به نظر باساک و همکاران (۲۰۱۰)، ممکن است تغییرات در سطح دی اکسید کربن

1. Representative Concentration Pathways (RCP)
2. Special Report on Emissions Scenarios (SRES)
3. General Circulation Model (GCM)
4. Crop Environment Resource Synthesis (CERS)

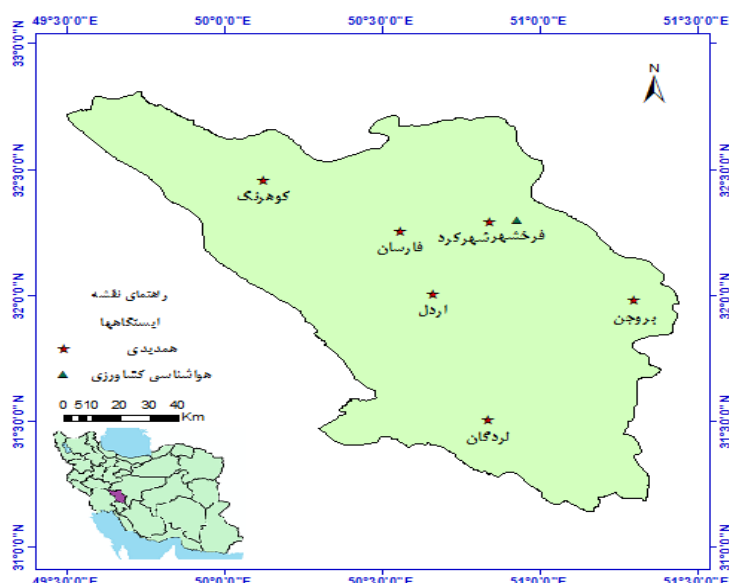
جو و تابش خورشیدی تا حدودی تأثیر افزایش دما را در کاهش عملکرد برنج جبران کند. نتایج پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده است که تغییر اقلیم در استرالیا کاهش عملکرد گندم را در پی خواهد داشت. با وجود این، مطالعات سینگلز و همکاران (۲۰۱۴) بیانگر آن است که عملکرد نیشکر در استرالیا، برزیل، و افریقای جنوبی در اثر تغییرات اقلیمی بین ۴ تا ۲۰ درصد افزایش خواهد داشت. البته، در این میان باید به حساسیت محصولات مختلف به تغییر اقلیم نیز توجه کرد. مثلاً، حساسیت لوبیا نسبت به تغییرات اقلیمی در مقایسه با غلات و کلزا بیشتر بوده و تا ۴۵ درصد کاهش عملکرد برای این محصول پیش‌بینی شده است. برآوردها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۳۰ کاهش عملکرد در حد متوسط خواهد بود؛ ولیکن پیامدهای تغییر اقلیم تا سال ۲۰۹۰ به طور فزاینده‌ای زیان‌بار خواهد بود. بنابراین، لازم است راهبردهای لازم با هدف سازگاری با پیامدهای تغییرات اقلیمی، با توجه به نوع محصول و ارزیابی اثرات، به کار گرفته شود (انوار و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج تحقیقات انجام‌شده در ایران نشان داده است که اگرچه غلظت‌های بالاتر دی‌اکسید کربن موجب افزایش عملکرد می‌شود، افزایش دما می‌تواند اثر این عامل را تحت تأثیر قرار دهد. افزایش میانگین دمای روزانه در محدوده ۰/۵ تا ۲ درجه سانتی‌گراد کاهش سرعت نمو و طولانی‌تر شدن دوره گل‌دهی زعفران در خراسان را در پی داشته است (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۸: ۵۸۳). افزایش دما با اثر بر دوره پُرشدن دانه اثر منفی بر روغن تولیدی کلزا داشته است (فرجی، ۱۳۸۴: ۱۹۸).

سامانه شبیه‌ساز تولید کشاورزی (آپسیم)، به‌عنوان شبیه‌سازی بسیار پیشرفته، از سیستم‌های کشاورزی در جهان شناخته می‌شود. آپسیم، با استفاده از ترکیب شرایط بیوفیزیکی و مدیریتی، فرایند رشد را به صورت پویا شبیه‌سازی می‌کند (کیتینگ و همکاران، ۲۰۰۳). لذا، با توجه به نتایج حاصل از مدل آپسیم در مطالعات مشابه دیگر کشورها، کاربرپسندی و امکان اجرای این مدل با داده‌های موجود، و ضرورت بهره‌گیری از این ابزار در ایران، آپسیم از بین دیگر مدل‌های آب و هوا محصول انتخاب شد. بدین منظور، ویژگی‌های رقم اکاپی به عنوان یکی از ارقام زمستانه، که در منطقه مورد مطالعه کاشته می‌شود، به مدل معرفی شد و پس از مراحل صحت‌سنجی و واسنجی ضرایب با نتایج حاصل از ریزمقیاس‌سازی مدل NOAA-GFDL تلفیق شد. می‌توان بیان کرد که واسنجی ضرایب و صحت‌سنجی مدل آپسیم و آشکارسازی اثرات گرمایش جهانی ناشی از تغییرات اقلیمی بر روی یکی از محصولات مهم زراعی کشور- که با توجه به پیش‌بینی وزارت جهاد کشاورزی سطح زیر کاشت آن تا ده سال آینده به یک میلیون هکتار خواهد رسید - مهم‌ترین ضرورت و ارزش این تحقیق است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

استان چهارمحال و بختیاری، با مساحت ۱۶۵۳۲ کیلومتر مربع، بین ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این استان در بخش مرکزی کوه‌های زاگرس واقع شده و به دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی و توپوگرافی اقلیم‌های متفاوتی دارد که شامل اقلیم‌های ارتفاعات، مرطوب معتدل بسیار سرد، نیمه‌مرطوب معتدل سرد، نیمه‌مرطوب کمی سرد، نیمه‌مرطوب بسیار گرم، و زمستان کمی سرد می‌شود. در این میان اقلیم نیمه‌مرطوب معتدل سرد بیشترین مساحت استان را دربر دارد (پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۳). برای اجرای این مطالعه، از داده‌های شش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و یک ایستگاه هواشناسی کشاورزی وابسته به سازمان هواشناسی کشور واقع در منطقه استفاده شد. شکل ۱ موقعیت استان و ایستگاه‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه استان چهارمحال و بختیاری و ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌های ایستگاهی و دیدبانی شده

برای واسنجی ضرایب و اجرای اولیه مدل، داده‌های مرتبط با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از مرکز تحقیقات کشاورزی شهرکرد دریافت شد (محنت‌کش، ۱۳۹۱). داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل بارندگی، تابش کلی خورشید، بیشینه و کمینه دما در مقیاس روزانه از ایستگاه هواشناسی فرخشهر واقع در منطقه مورد مطالعه دریافت شد. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژی کز، از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک استان چهارمحال و بختیاری، که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده، استفاده شد. داده‌ها پس از اجرای مراحل کنترل کیفی و با استفاده از نرم‌افزار اکسل به قالب متنی سازگار با مدل آپسیم تبدیل شد.

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

| نام ایستگاه | ارتفاع از سطح متوسط دریا به (متر) | عرض جغرافیایی (شمالی) | طول جغرافیایی (شرقی) | سال تأسیس میلادی | اقلیم |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------|-------------------------|
| شهرکرد | ۲۰۴۸ | ۳۲-۲۸ | ۵۰-۴۸ | ۱۹۵۵ | نیمه‌مرطوب معتدل سرد |
| کوه‌رنگ | ۲۲۸۵ | ۳۲-۲۶ | ۵۰-۰۷ | ۱۹۸۷ | مرطوب معتدل و بسیار سرد |
| بروجن | ۲۱۹۷ | ۳۲-۰۰ | ۵۱-۱۸ | ۱۹۸۸ | نیمه‌مرطوب معتدل سرد |
| لردگان | ۱۵۶۴ | ۳۱-۳۱ | ۵۰-۴۹ | ۱۹۹۵ | نیمه‌مرطوب و کمی سرد |
| فرخشهر | ۲۰۷۴ | ۳۲-۱۸ | ۵۰-۵۰ | ۱۹۹۸ | نیمه‌مرطوب معتدل سرد |
| فارسان | ۲۰۵۹ | ۳۲-۱۵ | ۵۰-۳۳ | ۲۰۰۵ | نیمه‌مرطوب معتدل سرد |
| اردل | ۱۸۷۵ | ۳۲-۰۰ | ۵۰-۳۹ | ۲۰۰۵ | نیمه‌مرطوب و کمی سرد |

داده‌های بیومتری و فنولوژیکی

کلزا^۱ گیاهی است از خانوادهٔ چلیپاییان، که دارای تیپ‌های رشد بهاره، پاییزه، و بینابین است. توانایی بذور کلزا در جوانه‌زنی و رشد در دماهای پایین امکان کشت آن را در مناطق معتدله و ارتفاعات و تحت شرایط خنک فراهم کرده است. بذر این گیاه معمولاً بیش از ۴۰ درصد روغن دارد (کیمر و گرگوری، ۱۹۹۹). شانزده درصد روغن خوراکی تولیدی جهان را روغن کلزا تشکیل می‌دهد و مصرف این روغن، به دلیل خواص آن، رو به افزایش است (یو اس دی ای، ۲۰۱۶). کلزا گیاهی روزبلند است که ارقام مختلفی از آن در ایران کاشته می‌شود. رقم اکاپی یکی از ارقام زمستانه و توصیه شده برای مناطق سردسیر و معتدله همانند منطقه مورد مطالعه است. اطلاعات هواشناسی کشاورزی این رقم شامل مراحل فنولوژی و بیومتری در کنار داده‌های رطوبت خاک و شرایط اقلیمی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ جمع‌بندی و بررسی شد. این داده‌ها میزان عملکرد و ۱۲ مرحلهٔ مختلف فنولوژیکی، از جمله کاشت، جوانه‌زنی، سبزشدن، ظهور اولین برگ حقیقی، رزت، توقف رویش زمستانه، غنچه‌دهی، طویل‌شدن ساقه، گل‌دهی، غلاف‌بندی، و رسیدن و برداشت محصول را شامل می‌شود که از میکروپلات‌ها و مزرعه ازدیادی جمع‌آوری شده‌اند. اطلاعات مدیریت مزرعه از جمله مقدار کوددهی، تعداد دفعات و تاریخ‌های آبیاری همراه دانسته‌هایی از میزان آفت و سرمازدگی نیز در دسترس است. در مجموع، از ۱۷۰۰ گزارش دیدبانی مراحل فنولوژیکی با ۴ تکرار در طول ۱۰ سال داده‌برداری استفاده شد. شروع و خاتمه هر مرحلهٔ فنولوژیکی زمانی در نظر گرفته می‌شود که ۷۵ درصد بوته‌های هر میکروپلات وارد مرحلهٔ جدید شده باشند.

داده‌های اقلیم آینده

برای بررسی اقلیم آینده از داده‌های مرکز هماهنگی فعالیت‌های ریزمقیاس‌سازی منطقه‌ای آب و هوا (CORDEX)^۲ استفاده شد. در این مرکز، برای اجرای شبیه‌سازی اقلیم جهانی، کرهٔ زمین به ۱۴ ناحیه تقسیم شده است. خاورمیانه و شمال آفریقا در منطقهٔ کوردکس- منا^۳ قرار گرفته که محدوده‌ای از ۷ درجهٔ جنوبی تا ۴۵ درجهٔ شمالی و ۲۷ درجه تا ۷۶ درجهٔ شرقی را شامل می‌شود. داده‌های شبیه‌سازی شده برای این منطقه در دو توان تفکیک ۰/۴۴ درجه و ۰/۲۲ درجه با اندازهٔ خطی به ترتیب حدود ۵۰ و ۲۵ کیلومتر از طریق پورتال کوردکس در دسترس است. در این مطالعه از داده‌های تغییر اقلیم از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در توان‌های تفکیک یادشده و در مقیاس زمانی روزانه استفاده شد. براساس سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم خط سیرهایی برای هریک از غلظت‌های گازهای گلخانه‌ای (RCP) در نظر گرفته شده است. بر این اساس، در صورت عدم اتخاذ سیاست کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، آب و هوای کرهٔ زمین در خط سیر سناریوی غلظت RCP8.5 پیش خواهد رفت و در این شرایط واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ به ۸/۵ وات بر متر مربع خواهد رسید. در سناریوی RCP4.5 واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴.۵ وات بر مترمربع ثابت خواهد ماند (آی پی سی سی، ۲۰۱۳).

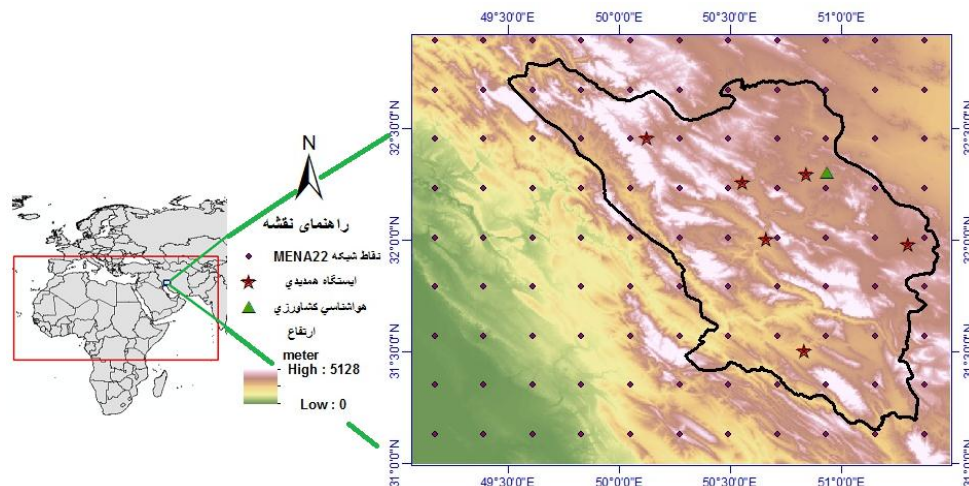
داده‌های حاصل از مدل NOAA-GFDL به علت اریب کمتر و توان تفکیک دقیق‌تر انتخاب شد. اعتبارسنجی و اصلاح خطاهای مدل با روش دلتا و استفاده از داده‌های تاریخچه‌ای سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ انجام شد. داده‌های اقلیمی هر یک از نقاط شبکه شامل دماهای بیشینه و کمینه، تابش و بارش روزانه همراه مختصات فضایی با استفاده از

1. Brassica napus L

2. Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment(CORDEX)

3. CORDEX-MENA

برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب برای دامنه منطقه بر جنوب غرب ایران استخراج شد. با وجود توان تفکیک مطلوب داده‌های دریافت‌شده و نزدیکی نقاط شبکه به ایستگاه‌های مورد بررسی از روش میان‌یابی عکس مجذور فاصله برای برآورد داده‌های اقلیم جهانی در هریک از ایستگاه‌های مورد بررسی استفاده شد. شکل ۲ محدوده منا همراه بخش‌های برش‌یافته از جنوب غرب ایران و محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت محدوده مورد مطالعه در کوردکس - منا

توصیف مدل آپسیم

این مدل شامل مجموعه‌ای از پودمان (ماژول)‌های بیولوژیکی، محیطی، و مدیریتی است که نیازهای هسته اصلی مدل را تأمین می‌کند. آپسیم تحت توسعه مستمر قرار دارد و قابلیت‌های جدیدی به نسخه‌های رسمی آن اضافه می‌شود (وبسایت آپسیم، ۲۰۱۶؛ مک کوان و همکاران، ۱۹۹۶). افزون بر تنظیمات اصلی مرتبط با محصول، برای اجرای این مدل به مقادیر روزانه کمینه و بیشینه دما، بارش و تابش خورشید، برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، و نیز شرایط مدیریتی نظیر میزان کوددهی، تعداد دفعات، و نوع آبیاری نیاز است.

معرفی رقم جدید به مدل آپسیم

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌ها بین رقم‌های هر محصول مربوط به مراحل فنولوژی است (نیسانکا و همکاران، ۲۰۱۵). بسیاری از مراحل فیزیولوژیکی گیاه با مراحل فنولوژیکی مرتبط است و دقت برون‌داد نهایی به مدل‌سازی صحیح مراحل فنولوژیکی وابسته است (وان اورت و همکاران، ۲۰۱۱) و از این رو باید پارامترهای فنولوژیکی برای هر یک از ارقام برآورد شود (کیتینگ و همکاران، ۲۰۰۳). در نسخه ۷.۷ مدل آپسیم ۴۳ واریته مختلف کلزای بهاره و زمستانه به طور پیش‌فرض قابل انتخاب است. پارامترهای اصلی رشد و نمو گیاه برای هر گونه خاص قابل عمومی‌سازی است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۲). در حال حاضر، هیچ یک از گونه‌های مورد کاشت کلزا در منطقه مورد مطالعه در این مدل تعریف نشده است و ضرورت دارد ضرایب واسنجی و ارقام جدید به مدل معرفی شود. بعد از مرحله کاشت، مراحل جوانه‌زنی، سبز شدن، رزت، غنچه‌دهی، گل‌دهی، غلاف‌بندی، رسیدن و برداشت محصول هشت مرحله فنولوژیکی است که به صورت روزانه قابلیت شبیه‌سازی دارند. آغاز هر مرحله بر اساس نیاز حرارتی تجمعی مورد نیاز از زمان کاشت تعیین می‌شود (ژائو و

همکاران، ۲۰۱۴). اگرچه، به نظر موهانتی و همکاران (۲۰۱۲)، امکان برآورد این پارامترها با استفاده از مشاهدات یک فصل وجود دارد، این شرایط قابلیت کاربرد مدل را محدود می‌کند. پودمان‌های موجود در آپسیم شرایط انعطاف‌پذیری را برای تعیین پارامترهای فنولوژیکی فراهم کرده است. برای این کار لازم است میزان فتوپریود و درجه روز تجمعی توسط کاربر تعیین شود. برای برآورد پارامترهای مدل از روش ارائه‌شده توسط آرکانتولیس و همکاران (۲۰۱۴) از جمله چرخه زندگی گیاه و بهینه‌سازی ضرایب با بهره‌گیری از روش‌های آماری استفاده شد.

روش‌های ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی، واسنجی ضرایب، و بررسی میزان دقت مدل واسنجی‌شده از سنج‌های آماری شامل ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد انحراف ریشه دوم میانگین مربعات خطا از میانگین داده‌های اندازه‌گیری‌شده (%RMSE)، میانگین خطای اریبی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، و ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و برآوردشده استفاده شد. درعین حال، حداقل و حداکثر خطای هر یک از روش‌ها نیز بررسی شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(C_i - M_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{M} \cdot 100 \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum(C_i - M_i)}{n} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(M_i - \bar{M})}{\sigma_{C_i} \cdot \sigma_{M_i}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum(|C_i - M_i|)}{n} \quad (5)$$

در روابط فوق، C_i مقدار محاسبه‌شده به وسیله مدل، M_i مقدار اندازه‌گیری‌شده، \bar{M} میانگین حسابی داده‌های اندازه‌گیری‌شده، و n تعداد داده‌هاست. مقدار RMSE بیانگر درستی و اعتبار مدل‌هاست و هر چه مقدار آن (در مدل‌های دارای شرایط یکسان از نظر واحد) کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است. این شاخص کارایی مدل را نشان می‌دهد (چای و دراکسلر، ۲۰۱۴). مقادیر مثبت MBE نشان‌دهنده بیش برآوردکردن و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده کم برآوردکردن مقادیر توسط مدل است. برای بررسی صحت مدل‌ها، نمی‌توان به MBE تکیه کرد، بلکه این متغیر فقط نشان‌دهنده میزان خطای خالص ناشی از برآورد مقادیر توسط مدل در بلندمدت است.

یافته‌های پژوهش

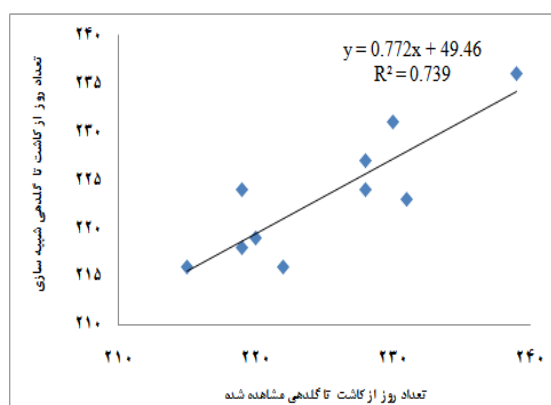
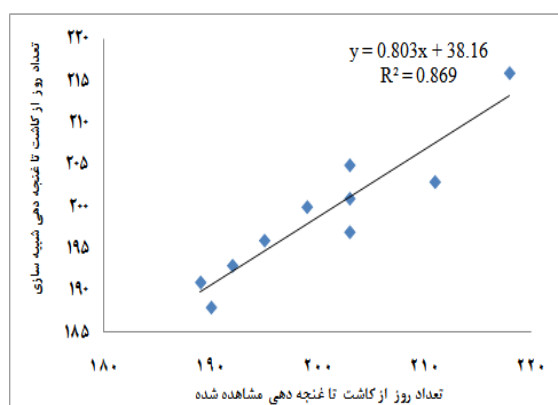
نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی

معمولاً ضرایب مدل‌ها با استفاده از سعی و خطا و با روش‌های رایانه‌ای واسنجی می‌شود. پیچیدگی اتصال و جفت‌سازی مدل دینامیکی به یک نرم‌افزار آماری و نکویی برازش دو دلیل عمده استفاده از روش سعی و خطا در برآورد پارامترها در مقایسه با روش رایانه‌ای است (نیسانکا و همکاران، ۲۰۱۵). برای شبیه‌سازی هر یک از مراحل فنولوژی، مدت زمان سپری‌شده از زمان کاشت تا اولین روز ورود به هر مرحله شمارش شد. تنش‌های آبی، تغذیه‌ای، فتوپریود، بهاره‌سازی، و رقم بر هر یک از این مراحل تأثیرگذارند. در جدول ۲ شاخص ارزیابی مدل در شبیه‌سازی مراحل مختلف فنولوژی ارائه شده

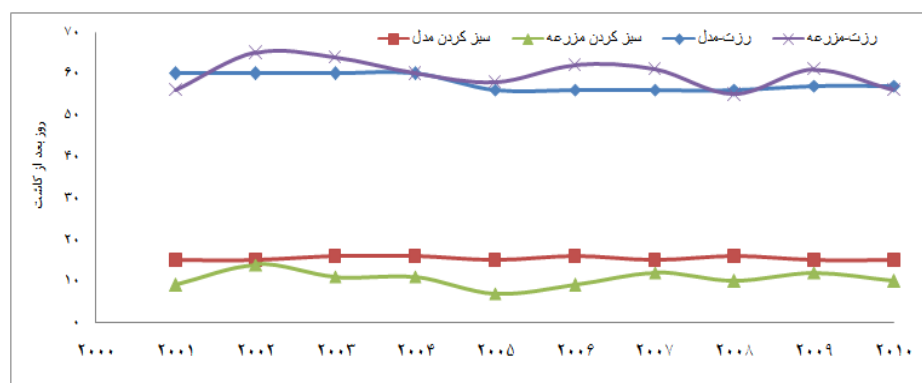
است. اگرچه بیشترین میزان میانگین ریشه دوم خطاها در شبیه‌سازی دوره تعداد روزهای سپری شده از کاشت تا رسیدگی و به میزان ۵ روز دیده می‌شود، میزان شاخص RMSE% این دوره نشان‌دهنده آن است که خطای نسبی مدل در شبیه‌سازی این مرحله فنولوژیکی کمتر از ۲ درصد بوده است. این شاخص در دوره‌های اولیه رشد شامل تعداد روزهای سپری شده از کاشت تا جوانه‌زنی و از کاشت تا سبز کردن مقدار قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد که از دلایل آن می‌توان به خطاهای موجود در برآورد رطوبت خاک توسط مدل در دوره اولیه رشد اشاره کرد. بیشترین خطای آریبی به میزان ۴/۹ روز در شبیه‌سازی دوره سبز کردن دیده می‌شود. مقدار ضریب همبستگی (r) مرحله جوانه‌زنی از نظر آماری معنی‌دار نیست و این شاخص در سایر مراحل فنولوژیکی از نظر آماری معنی‌دار است. بهترین ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به میزان ۰/۹ و مربوط مراحل غنچه‌دهی و گل‌دهی است. نتایج حاصل از همبستگی تعداد روز مشاهده شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده توسط مدل از کاشت تا مرحله غنچه‌دهی و گل‌دهی در شکل ۳ نشان داده است.

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی مدل در شبیه‌سازی از کاشت تا هر یک از مراحل مختلف فنولوژیکی کلزا

| | رسیدن | غلاف‌بندی | گل‌دهی | غنچه‌دهی | رزت | سبز کردن | جوانه‌زنی |
|---------------------------|-------|-----------|--------|----------|------|----------|-----------|
| میانگین تعداد روز از کاشت | ۲۸۲٫۵ | ۲۵۱٫۲ | ۲۲۴٫۸ | ۲۰۰٫۶ | ۵۷٫۸ | ۱۵٫۴ | ۳ |
| RMSE | ۵ | ۴٫۳ | ۳٫۳ | ۳٫۴ | ۳٫۸ | ۴٫۷ | ۱٫۷ |
| %RMSE | ۱٫۷۷ | ۱٫۷۱ | ۱٫۴۷ | ۱٫۶۹ | ۶٫۵۷ | ۳۰٫۵۲ | ۵۶٫۶۷ |
| MBE | -۰٫۷ | ۰٫۹ | ۱٫۷ | ۱٫۳ | -۲ | ۴٫۹ | -۱٫۵ |
| r | ۰٫۴ | ۰٫۷ | ۰٫۹ | ۰٫۹ | ۰٫۳ | -۰٫۱ | N/S |



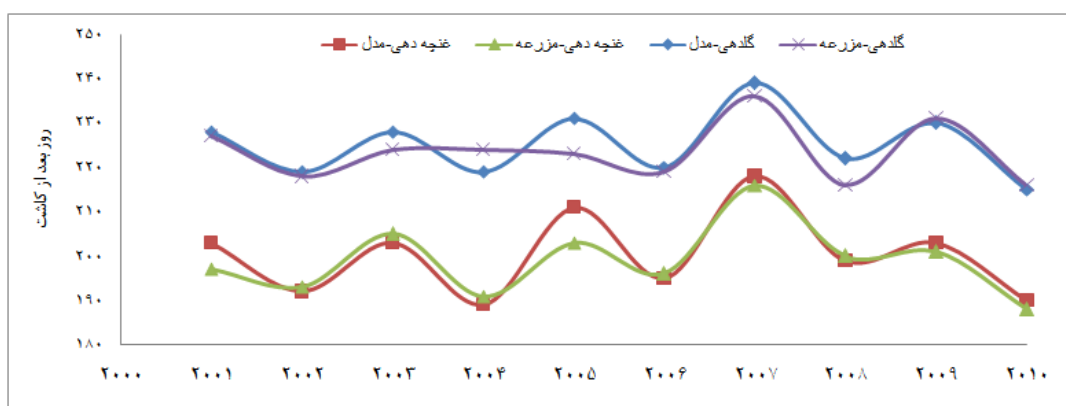
شکل ۳. همبستگی تعداد روز مشاهده و شبیه‌سازی شده از کاشت تا مرحله‌های غنچه‌دهی و گل‌دهی



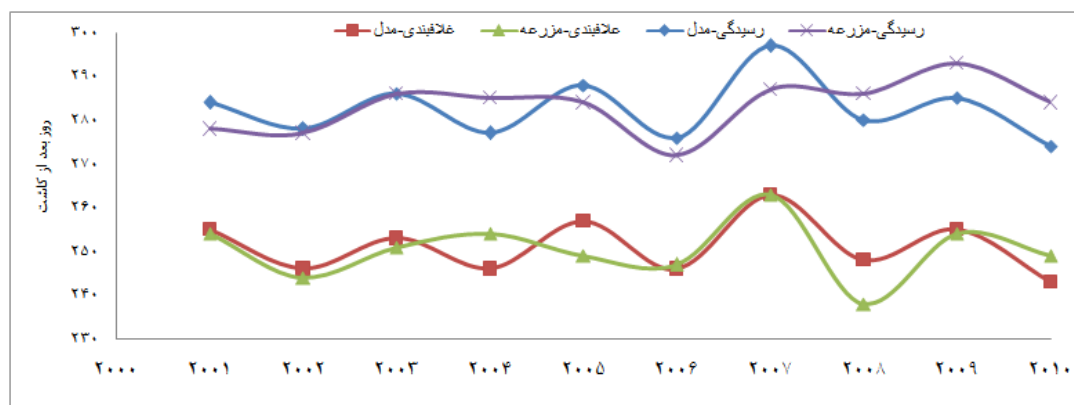
شکل ۴. مقایسه سال به سال مراحل فنولوژیک سبز کردن و رزت مشاهده و شبیه‌سازی شده

پس از سپری شدن مراحل اولیه رشد، که شاخص‌های ارزیابی وضعیت چندان مطلوبی را نشان نمی‌دهند، به تدریج میزان دقت مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی بهبود یافته است (شکل ۴). نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل و شکل ۵ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی سال به سال مراحل فنولوژیکی غنچه‌دهی و گل‌دهی نسبت به دیگر مراحل بهتر صورت گرفته است.

مقایسه سال به سال مراحل فنولوژیک غلاف‌بندی و رسیدگی مشاهده شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده با مدل آپسیم در شکل ۶ ارائه شده است. در این شکل مهارت مدل در شبیه‌سازی مراحل پایانی رشد کلزا نشان داده شده است. تفاوت‌هایی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، و ۲۰۰۸ دیده می‌شود. از دلایل آن می‌توان به ماهیت مدل‌سازی، وجود عوامل ناشناخته، و بهینه‌سازی ضرایب بر اساس میانگینی از دوره مشاهده شده اشاره کرد.



شکل ۵. مقایسه سال به سال مراحل فنولوژیک گل‌دهی و غنچه‌دهی مشاهده و شبیه‌سازی شده

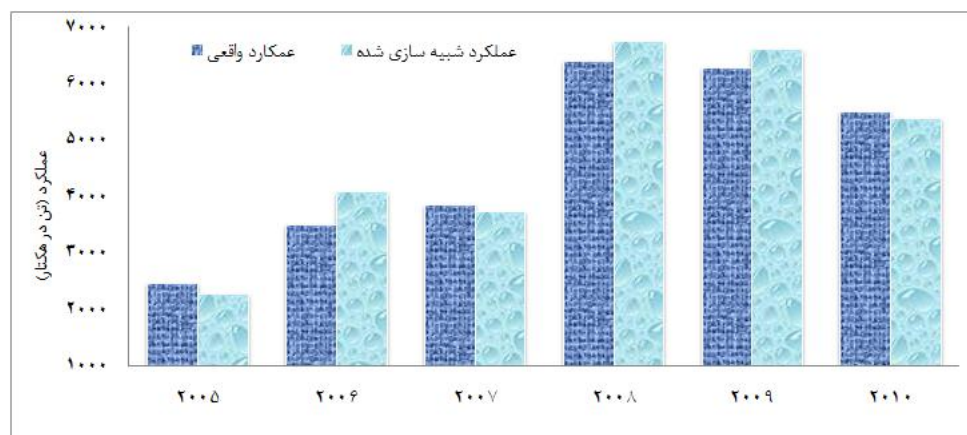


شکل ۶. مقایسه سال به سال مراحل فنولوژیک غلاف‌بندی و رسیدگی مشاهده و شبیه‌سازی شده

میزان دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد

با توجه به ویژگی‌های مدیریت زراعی، شرایط آب و خاک، و میزان کوددهی در هر سال، شبیه‌سازی عملکرد در سه حالت مدیریت ضعیف، مدیریت متوسط، و مدیریت خوب به انجام رسید. بر این اساس، در شرایط تغذیه‌ای و مدیریت خوب ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، شرایط متوسط ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، و در شرایط ضعیف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود استفاده شده است. در شکل ۷ میزان عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده ارائه شده است. میزان خطای مدل در برآورد عملکرد به طور متوسط ۳۲۹/۸ کیلوگرم در هکتار است؛ این میزان حدود ۷/۲ درصد از متوسط عملکرد این رقم کلزا در منطقه را

شامل می‌شود. میزان خطای اریبی مدل در شبیه‌سازی ۱۸/۲ کیلوگرم و ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده ۰/۹۶ و از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. مهارت مدل در شبیه‌سازی متوسط عملکرد قابلیت اعتمادپذیری آن را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه عملکرد کلزا-اکاپی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل آپسیم و اندازه‌گیری شده در مزرعه

اثر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیکی

همبستگی مثبتی بین مدت زمان فعالیت‌های فتوسنتزی و مدت زمان مورد نیاز برای پُرشدن دانه و در نهایت عملکرد محصول وجود دارد (بیدیگر و همکاران، ۱۹۷۷؛ گبینگ و همکاران، ۱۹۹۹). نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی کلزا بر اساس سناریوهای گزارش پنجم آی پی سی و دوره تاریخیچه‌ای برای ایستگاه‌های هواشناسی واقع در مناطق مختلف استان در جدول ۳ ارائه شده است. تأمین زودتر نیاز حرارتی در اثر افزایش دما، کوتاه‌تر شدن برخی مراحل را در پی داشته است. بر اساس سناریوی RCP8.5، مرحله فنولوژیکی سبزکردن در مناطق مختلف مورد مطالعه بین ۰/۳ تا ۱/۶ روز کاهش خواهد داشت. دوره رزت به طور میانگین حدود ۱۰ روز افزایش نشان می‌دهد. مرحله رزت دوره‌ای است که گیاه خود را برای سپری نمودن زمستان آماده می‌کند و از این رو طولانی‌تر شدن این مرحله موجب افزایش بیشتر مواد غذایی در ریشه گیاه و کاهش میزان سرمازدگی در زمستان خواهد شد. بیشترین مقدار افزایش این دوره در منطقه کوه‌رنگ و به میزان ۲۰ روز برآورد شده است. در مقابل میانگین مدت زمان سپری شده از کاشت تا غنچه‌دهی کلزا حدود ۱۰ روز زودتر اتفاق خواهد افتاد. این دوره نیز در کوه‌رنگ با مدت ۳۳ روز بیشترین تغییر کاهشی را دارد. تداوم این شرایط در دیگر مراحل رشد از جمله غلاف‌بندی و رسیدن نیز دیده می‌شود. بدین ترتیب، میانگین مدت زمان مورد نیاز تا ورود به مرحله غلاف‌بندی حدود ۱۳ روز و رسیدگی کلزا ۸ روز کاهش خواهد یافت. لذا، می‌توان گفت، بر اساس این سناریو، کلزا زودتر از شرایط فعلی غنچه خواهد داد، به گل خواهد نشست، و غلاف‌بندی و رسیدگی آن نیز زودتر از زمان فعلی خواهد بود. البته، این وضعیت در مناطق معتدل سرد در مقایسه با مناطق گرم‌تر نظیر اردل و لردگان تفاوت بیشتری با شرایط فعلی دارد.

کاربرد سناریوی RCP4.5 نتایج کم و بیش متفاوتی را در مراحل رشد کلزا در مناطق مختلف استان نشان می‌دهد. میانگین مدت زمان کاشت تا سبز شدن تفاوت چندانی با شرایط کنونی نخواهد داشت؛ هرچند با شرایط این سناریو نیز افزایش در دوره رزت به طور میانگین تا ۹ روز در استان و حداکثر تا ۱۴ روز در منطقه لردگان دیده می‌شود، تغییر چندانی

در زمان غنچه‌دهی کلزا پیش‌بینی نمی‌شود؛ ضمن آنکه دوره‌های گل‌دهی و غلاف‌بندی به طور میانگین دو روز کاهش خواهد یافت. بیشترین میزان کاهش در این دوره در منطقه اردل دیده می‌شود. با این سناریو مدت زمان سپری شده از کاشت تا رسیدن به طور متوسط سه روز افزایش خواهد داشت. نتایج حاصل از اجرای این مطالعه در خصوص پیش‌بینی مراحل فنولوژی در اثر تغییر اقلیم با سایر مطالعات انجام شده در سایر نقاط دنیا هم‌خوانی دارد. مثلاً، افزایش ۱٫۷ درجه سانتی‌گرادی دما کاهش ۱۱ روزه گل‌دهی گندم را در پی داشته است (آسنگ و همکاران، ۲۰۰۴).

جدول ۳. تعداد روزهای لازم از کاشت تا ورود به هر یک از مراحل فنولوژی بر اساس داده‌های موجود و سناریوهای اقلیمی

| ایستگاه | رسیدن | غلاف‌بندی | گل‌دهی | غنچه‌دهی | رزت | سبز کردن | جوانه‌زنی |
|--------------------|-------|-----------|--------|----------|-----|----------|-----------|
| شهرکرد | ۲۸۳ | ۲۵۱ | ۲۲۵ | ۲۰۱ | ۵۸ | ۱۵ | ۳ |
| | ۲۸۴ | ۲۵۰ | ۲۲۲ | ۲۰۲ | ۷۰ | ۱۴ | ۳ |
| | ۲۸۰ | ۲۴۶ | ۲۱۹ | ۱۹۸ | ۶۹ | ۱۴ | ۳ |
| اردل | ۲۵۱ | ۲۲۳ | ۱۹۸ | ۱۷۵ | ۵۱ | ۱۳ | ۲ |
| | ۲۵۴ | ۲۱۸ | ۱۹۳ | ۱۷۵ | ۶۱ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۴۹ | ۲۱۵ | ۱۹۱ | ۱۷۱ | ۵۷ | ۱۳ | ۲ |
| بروجن | ۲۸۶ | ۲۵۶ | ۲۳۰ | ۲۰۷ | ۵۷ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۹۱ | ۲۵۹ | ۲۳۲ | ۲۱۱ | ۶۶ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۷۰ | ۲۳۸ | ۲۱۲ | ۱۹۰ | ۵۷ | ۱۴ | ۲ |
| فارسان | ۲۸۱ | ۲۵۰ | ۲۲۴ | ۱۹۹ | ۵۵ | ۱۵ | ۲ |
| | ۲۸۵ | ۲۴۹ | ۲۲۲ | ۲۰۱ | ۶۳ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۷۲ | ۲۳۵ | ۲۰۹ | ۱۹۱ | ۶۱ | ۱۳ | ۲ |
| کوهرنگ | ۳۰۰ | ۲۷۱ | ۲۴۶ | ۲۲۵ | ۵۶ | ۱۳ | ۲ |
| | ۳۰۰ | ۲۶۷ | ۲۴۱ | ۲۲۲ | ۶۱ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۸۳ | ۲۴۴ | ۲۲۰ | ۲۰۲ | ۷۷ | ۱۲ | ۲ |
| لردگان | ۲۵۰ | ۲۱۸ | ۱۹۲ | ۱۶۹ | ۵۷ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۵۶ | ۲۱۶ | ۱۸۸ | ۱۶۸ | ۷۱ | ۱۵ | ۲ |
| | ۲۴۹ | ۲۱۱ | ۱۸۴ | ۱۶۴ | ۷۱ | ۱۴ | ۲ |
| میانگین ایستگاه‌ها | ۲۷۵ | ۲۴۵ | ۲۱۹ | ۱۹۶ | ۵۶ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۷۸ | ۲۴۳ | ۲۱۶ | ۱۹۷ | ۶۵ | ۱۴ | ۲ |
| | ۲۶۷ | ۲۳۲ | ۲۰۶ | ۱۸۶ | ۶۶ | ۱۳ | ۲ |

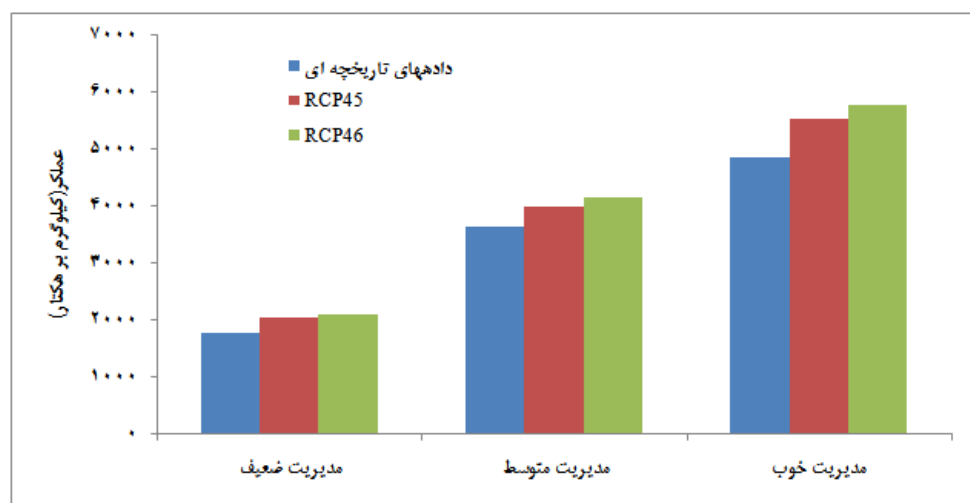
اثر تغییر اقلیم بر عملکرد

در جدول ۴ میزان میانگین عملکرد کلزا در دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۰ در مناطق مختلف استان و بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 ارائه شده است. بر این اساس، با سناریوی RCP4.5 میانگین عملکرد این محصول ۹٫۴ درصد و با سناریوی RCP8.5 به میزان ۱۳٫۶ درصد نسبت به شرایط فعلی افزایش خواهد داشت. با وجود این، میزان افزایش عملکرد در واحد سطح در لردگان از میانگین استان کمتر خواهد بود. چنانچه در بخش اثرات تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژی بیان شد، افزایش دوره رزت در اثر گرمایش جهانی و فراهم شدن شرایط برای رشد مطلوب ریشه کلزا قبل از دوره سرما را می‌توان از دلایل افزایش عملکرد این محصول در این استان بیان کرد. نتایج بیانگر آن است که، در صورت فراهم بودن سایر شرایط محیطی و تأمین آب مورد نیاز، گرمایش جهانی بر عملکرد کلزا در این منطقه تأثیر مثبت خواهد

داشت. یافته‌های این مطالعه با نتایج مطالعات سینگلز و همکاران (۲۰۱۴)، استرلینگ و همکاران (۲۰۰۷)، تویئلو و همکاران (۲۰۰۷)، مال و همکاران (۲۰۰۴) در زمینه نقش مثبت گرمایش جهانی بر عملکرد محصول سازگاری دارد. در شکل ۸ میانگین عملکرد کلزا با شرایط متفاوت مدیریتی، که مهم‌ترین ویژگی آن سطوح مختلف کود بوده، نشان داده شده است. پیش‌بینی می‌شود میزان افزایش عملکرد این رقم کلزا با سناریوی RCP8.5 در شرایط مدیریت و تغذیه مطلوب ۱۸ درصد افزایش یابد. میانگین عملکرد این محصول در شرایط مدیریت متوسط و ضعیف با این سناریو به ترتیب ۱۳/۶ و ۱۸ درصد افزایش خواهد داشت. در ضمن، میانگین عملکرد کلزا در این منطقه با سناریوی RCP4.5 در شرایط مدیریت و تغذیه خوب ۱۳/۴ درصد و در شرایط مدیریت متوسط و ضعیف به ترتیب ۱۳/۶ و ۱۴/۳ درصد افزایش خواهد داشت.

جدول ۴. مقایسه متوسط عملکرد کلزا در ایستگاه‌های مختلف استان (واحد عملکرد = تن در هکتار)، کوددهی ۲۵۰ kg/hect

| نام ایستگاه | عملکرد فعلی | RCP45 | RCP85 | تغییر درصد عملکرد بر اساس سناریو | |
|-------------|-------------|-------|-------|----------------------------------|-------|
| | | | | RCP45 | RCP85 |
| شهرکرد | ۳۷۱۴ | ۴۳۴۲ | ۴۴۱۶ | ۱۶/۹ | ۱۶/۸ |
| بروجن | ۳۷۴۹ | ۴۱۷۷ | ۴۳۲۲ | ۱۱/۴ | ۱۵/۳ |
| کوه‌رنگ | ۳۰۶۵ | ۳۳۵۷ | ۳۴۰۹ | ۹/۵ | ۱۱/۲ |
| فارسان | ۳۶۴۸ | ۳۹۲۳ | ۴۱۰۱ | ۷/۵ | ۱۲/۴ |
| اردل | ۳۷۶۰ | ۴۱۱۶ | ۴۲۹۵ | ۹/۵ | ۱۴/۲ |
| لردگان | ۴۰۱۰ | ۴۰۷۶ | ۴۳۹۲ | ۱/۶ | ۹/۵ |



شکل ۸. اثر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر عملکرد کلزا با سه تیمار تغذیه‌ای متفاوت

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش بیانگر آن است که، پس از معرفی رقم جدید و واسنجی ضرایب و تأمین ورودی‌های مورد نیاز، مدل آپسیم می‌تواند عملکرد کلزا را با میانگین ریشه دوم خطای ۳۲۰ کیلوگرم در هکتار شبیه‌سازی کند. ضمن آنکه می‌توان از مهارت این مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مراحل فنولوژیکی این محصول استفاده کرد. نتایج کاربرد داده‌های هواشناسی حاصل از خروجی مدل اقلیمی نشان می‌دهد که با هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 طول مدت مراحل فنولوژیکی گل‌دهی و غلاف‌بندی کاهش خواهد داشت؛ هرچند که بیشترین

میزان کاهش‌ها با سناریوی RCP8.5 دیده می‌شود و از نظر تغییرات کاهشی این دو دوره بیشترین واکنش را نشان داده‌اند.

به‌طور میانگین با سناریوی RCP8.5 دوره رزت ۱۰ روز و با سناریوی RCP4.5 این دوره ۹ روز طولانی‌تر خواهد شد. طولانی‌تر شدن این مرحله، افزایش ذخیره مواد غذایی در ریشه گیاه، و کاهش میزان سرمازدگی در زمستان را در پی خواهد داشت. این عامل در کنار پیش‌بینی افزایش عملکرد این رقم کلزا در منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰ درخور توجه است. میانگین افزایش عملکرد این محصول با سناریوی RCP4.5 به مقدار ۹٫۴ درصد و با سناریوهای RCP8.5 به میزان ۱۳٫۶ درصد نسبت به شرایط فعلی برآورد شده است. با وجود این، میزان افزایش عملکرد در واحد سطح در لردگان از میانگین استان کمتر خواهد بود و پیش‌بینی می‌شود عملکرد این رقم کلزا با سناریوی RCP8.5 در شرایط مدیریت و تغذیه مطلوب ۱۸ درصد و در شرایط مدیریت متوسط و ضعیف به ترتیب ۱۳٫۶ و ۱۸ درصد افزایش یابد. پیش‌بینی افزایش عملکرد کلزا در این منطقه از زاگرس مرکزی ایران بیانگر آن است که این منطقه تا افق ۲۰۳۰ از پتانسیل مطلوبی در کشت و توسعه این محصول برخوردار خواهد بود. البته، تغییرات مراحل فنولوژیک ناشی از گرمایش جهانی پیامدهایی دارد که باید در نظر گرفته شود. سبز شدن زودتر محصول و طولانی‌تر شدن دوره رزت افزایش نیاز آبی را در پی خواهد داشت.

منابع

- پرتووش، م. (۱۳۹۴). تخمین شست‌وشوی نیترات از ناحیه ریشه نیشکر با استفاده از مدل APSIM-SWIM، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.
- پژوهشکده هواشناسی (۱۳۸۳). پهنه‌بندی اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری.
- عباسپور، م.، عباسپور، ا.، (۱۳۹۱). بررسی کارایی مدل APSIM برای مدیریت کود نیتروژن و آبیاری در محصول ذرت، اولین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی و محیط زیست سالم، همدان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، شرکت هم‌اندیشان محیط زیست فردا.
- فرجی، ا. (۱۳۸۴). ارزیابی اثرات تاریخ کاشت بر میزان روغن و عملکرد کلزا، *مجله علوم زراعی ایران*، ۷(۳): ۱۸۹-۲۰۱.
- قربانی، خ. و سلطانی، ا. (۱۳۹۳). اثر تغییر اقلیم بر عملکرد سویا در منطقه گرگان، *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۲۱(۲): ۸۵-۶۷.
- کوچکی، ع.؛ نصیری محلاتی، م.؛ علیزاده، ا. و گنجعلی، ع. (۱۳۸۸). مدل‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر رفتار گل‌دهی زعفران، *مجله پژوهش‌های زراعی ایران*، ۷(۲): ۵۸۳-۵۹۴.
- محنت‌کش، ع. (۱۳۹۱). مدل‌سازی خاک-زمین‌نما و پیش‌بینی تولید گندم دیم به کمک مدل‌های مختلف در مناطقی از زاگرس مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- Abaspoor, M.; Abaspoor A.; (2012). Evaluation of APSIM Model Efficiency for Nitrogen Fertilizer and Irrigation Management in Corn Crop, *First National Conference on Sustainable Agriculture Development and Healthy Environment, Hamedan, Islamic Azad University, Hamedan Branch, Fars Foundation for Environmentalists.*
- Ahmed, M.; Akram, M.N.; Asim, M.; Aslam, M.; Hassan, F.; Higgins, S.; Stockle, C.O. and Hoogenboom, G. (2016). Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application, *Computers and Electronics in Agriculture*, 123: 384-401.
- Antel, J.M. (2010). Adaptation of agriculture and food system to climate change: policy issues, Resources for the future, issue brief 10-30, PP. 12.
- Anwar, M.R.; Liu, D.L.; Farquharson, R.; Macadam, I.; Abadi, A.; Finlayson, J.; Wang, B. and Ramilan, T. (2015). Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia, *Agricultural Systems*, 132: 133-144.
- APSIM (2016). <http://www.apsim.info>
- Archontoulis, S.V.; Miguez, F.E.; & Moore, K.J. (2014). A methodology and an optimization tool to calibrate phenology of short-day species included in the APSIM model: Application to soybean, *Environmental Modelling & Software*, 62(0): 465-477.
- Asseng, S.; Jamieson P.D.; Kimball, B.; Pinter, P.; Sayre, K.; Bowden, J.W. and Howden S.M. (2004). Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res*, 85: 85-102.
- Bao, Y.; Hoogenboom, G.; McClendon, R. and Urich, P. (2015). Soybean production in 2025 and 2050 in the southeastern USA based on the SimCLIM and the CSM-CROPGRO-Soybean models, *Clim Res*, 66: 73-89.
- Basak, J.K.; Ali, M.A.; Islam, M.N. and Rashid, M.A. (2010). Assessment of the effect of climate change on Boro rice production in Bangladesh using DSSAT model, *Journal of Civil Engineering*, 38: 95-108.

- Bidinger, F.; Musgrave, R.B. and Fischer, R.A. (1977). Contribution of stored pre-anthesis assimilate to grain yield in wheat and barley, *Nature*, 270: 431-433.
- Chai, T. and Draxler, R.R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geosci. Model Dev.*, 7: 1247-1250.
- CORDEX (2016). <http://www.cordex.org/index.php>.
- Easterling, W.; Aggarwal, P.; Batima, P.; Brander, K.; Erda, L.; Howden, M.; Kirilenko, A.; Morton, J.; Soussana, J.F. and Schmidhuber, J. (2007). *Food, fibre, and forest products*, In ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJvd Linden, CE Hanson, eds, *Climate Change, 2007, Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, PP. 273-313.
- FAO (2003). world agriculture towards 2015/2030. An FAO perspective, <http://www.fao.org> .
- FAO (2013). <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>.
- Faraji, A. (2005). Evaluation of the effect of sowing date on grain and oil yield and yield components of four canola genotypes in Gonbad, *Iranian Journal of Crop Sciences*, 7(3): 189-201.
- Gaydon, D.; Balwinder-Singh, S.; Wang, E.; Poulton, P.L.; Ahmad, B.; Ahmed, F.; Akhter, S.; Ali, I.; Amarasingha, R.; Chaki, A.K.; Chen, C.; Choudhury, B.U.; Darai, R.; Das, A.; Hochman, Z.; Horan, H.; Hosang, E.Y.; Vijaya Kumar, P.; Khan, A.S.M.M.R.; Laing, A.M.; Liu, L.; Malaviachichi, M.A.P.W.K.; Mohapatra, K.P.; Power, M.A.B.; Radanielson, A.M.; Rai, G.S.; Rashid, M.H.; Rathanayake, W.M.U.K.; Sarker, M.M.R.; Sena, D.R.; Shamim, M.; Subash, N.; Suriadi, A.; Suriyagoda, L.D.B.; Wang, G.; Wang, J.; Yadav, R.K. and Roth, C.H. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia, *Field Crops Research*, 204: 52-75.
- Ghorbani, K. and Soltani, A. (2014). The effect of climate change on soybean yield in Gorgan, *Journal of Plant Production Research*, 21: 67-85.
- Gebbing, T.; Schnyder, H. and Kuhbauch, W. (1999). The utilization of pre-anthesis reserves in grain filling of wheat: assessment by steady-state ¹³CO₂/¹²CO₂ labelling, *Plant Cell Environ*, 22: 851-858.
- Huntingford, C.; Lambert, F.H.; Gash, J.H.C.; Taylor, C.M. and Challinor, A.J. (2005). Aspects of climate change prediction relevant to crop productivity. *Philos. Trans, R. Soc. B*, 360, 1999-2009.
- IPCC (2007). In: Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Vander, L.P.J. and Hanson, C.E. (Eds.), *Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. *Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I, II and III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. In: R. Pachauri and L. Meyer (eds). Geneva, Switzerland. 151p.
- Karim, Z.; Hussain; S.G.; Ahmed, M.; (1996). Assessing impacts of climatic variations on foodgrain production in Bangladesh *Water Air Soil Pollut*, 92: 53.
- Kassie, B.T.; Asseng, S.; Reimund, P.R.; Huib, H.; Alex, C.R. and Martin, K.V.I. (2015). Exploring climate change impacts and adaptation options for maize production in the Central Rift Valley of Ethiopia using different climate change scenarios and crop models, *Climate change*, 129: 145-158.
- Keating, B.A.; Carberry, P.S.; Hammer, G.L.; Probert, M.E.; Robertson, M.J.; Holzworth, D.; Huth, N.I.; Hargreaves, J.N.G.; Meinke, H.; Hochman, Z.; Mclean, G.; Verburg, K.; Snow, V.; Dimes, J.P.; Silburn, M.; Wang, E.; Brown, S.; Bristow, K.L.; Asseng, S.; Chapman, S.; Mccown, R.L.; Freebairn, D.M. and Smith, C.J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation, *Eur. J. Agron.*, 18: 267-288.
- Kimbr, D. and Gregory, D.Y.M. (1999). *Rape, physiology, Bio technology*, translations Azizi, M., Soltani, A., Khorasani S.

- Koochaki, A.R.; Nasiri Mahallati, M. and Khorramdel, S. (2014). Iranian agriculture in transition to climate change and global warming, Ferdosi University of Mashhad Press, *Publication Press*, 628: 56.
- Mall, R.K. and Aggarwal, P.K. (2002). Climate Change and Rice Yields in Diverse Agro-Environments of India. I. Evaluation of Impact Assessment Models, *Climatic Change*, 52: 315.
- Mall, R.K.; Lal, M.; Bhatia, V.S.; Rathore, L.S. and Singh, R. (2004). Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study, *Agricultural and Forest Meteorology*, 121: 113-125.
- McCown, R.L.; Hammer, G.L.; Hargreaves, J.N.G.; Holzworth, D.P. and Freebairn, D.M. (1996). APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research, *Agric. Syst.*, 50: 255-271.
- Mohanty, M.; Probert, M.E.; SammiReddy, K.; Dalal, R.C.; Mishra, A.K.; Rao, A.S.; Singh, M. and Menzies, N.W. (2012). Simulating soybean-wheat cropping systems: APSIM model parameterization and validation, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 152: 68-78.
- Nissanka, S.P.; Karunaratne, A.S.; Weerakoon, R.P.W.M.W.; Thorburn, P.J. and Daniel, W. (2015). Calibration of the phenology sub-model of APSIM-Oryza: Going beyond goodness of fit, *Environmental Modelling and Software*, 70: 128-137.
- Partovash, M. (2015). Estimation of nitrate washout from cane roots using APSIM-SWIM model, *Master's Degree, Faculty of Agricultural Sciences, Bu-Ali Sina University*.
- Robertson, M.J.; Holland, J.; Cawley, S.; Bambach, R.; Cocks, B. and Watkinson, A.R. (2001). Phenology of canola cultivars in the northern region and implications for frost risk, *10th Australian Agronomy Conference*, Hobart, Tasmania.
- Singels, A.; Jones, M.M.F.; Ruane, A.C. and Thorburn, P. (2014). Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro model, *Sugar Tech*, 16(4): 347-355. (also published in *Int. Sugar J.*, 115: 874-881).
- Sommer, R.; Glazirina, M.; Yuldashev, T.; Otarov, A. and Ibraeva, M. (2013). Impact of climate change on wheat productivity in Central Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 178: 78-99.
- Sun, H.; Zhang, X.; Wang, E.; Chen, S.; Shao, L. and Qin, W.A. (2016). Assessing the contribution of weather and management to the annual yield variation of summer maize using APSIM in the North China Plain, *Field Crops Research*, 194: 94-102.
- Tubiello, F.N.; Soussana, J.F.; Howden, S.M. and Easterling, W. (2007). Crop and pasture response to climate change, *Proc Natl Acad Sci USA*, 104: 19686-19690.
- Turner, N.C.; Molyneux, N.; Yang, S.; Xiong, Y.C. and Siddique, K.H.M. (2011). Climate change in south-west Australia and north-west China: challenges and opportunities for crop production, *Crop Pasture Sci.*, 62: 445-456.
- Vernon, L. and Van, G.D. (2006). *Potential impacts of climate change on agricultural land use suitability: canola*, Department of Agriculture and Food, Western Australia. Report 303.
- Van Oort, P.A.J.; Zhang, T.; de Vries, M.E.; Heinemann, A.B. and Meinke, H. (2011). Correlation between temperature and phenology prediction error in rice (*Oryza sativa* L.), *Agric. For. Meteorol.*, 151: 1545-1555.
- USDA (2016). <http://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oil-crops/canola.aspx>.
- Wang, E.; Robertson, M.J.; Hammer, G.L.; Carberry, P.S.; Holzworth, D.; Meinke, H.; Chapman, S.C.; Hargreaves, J.N.G.; Huth, N.I. and McLean, G. (2002). Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM, *European Journal of Agronomy*, 18: 121-140.

- Yang, X.; Ch., C.; Luo, Q.; Li, L. and Yu, Q. (2011). Climate change effects on wheat yield and water use in oasis Cropland, *International Journal of Plant Production*, 5: 1.
- Zeke, K.T.; Luckett, D.J. and Cowley, R.B. (2014). The influence of soil water conditions on canola yields and production in *Southern Australia Original Research Article Agricultural Water Management*, 144: 20-32.
- Zeng, W.; Wu, J.; Hoffmann, M.P.; Xu, C.; Ma, T. and Huang, J. (2016). Testing the APSIM sunflower model on saline soils of Inner Mongolia, China, *Field Crops Research*, 192: 42-54.
- Zhang, Y.; Feng, L.; Wang, J.; Wang, E. and Xu, Y. (2012). Using APSIM to explore wheat yield response to climate change in the North China Plain: the predicted adaptation of wheat cultivar types to vernalization, *Journal of Agricultural Science*, 1: 1-13.
- Zhao, G.; Bryan, B.A. and Song, X. (2014). Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters, *Ecological Modelling*, 279: 1-11.