

مقاله علمی - پژوهشی

استفاده از مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب کلزا (*Brassica napus L.*) در شرایط ایران

سمانه رهبان<sup>۱</sup>، بنیامین ترابی<sup>۲\*</sup>، افشین سلطانی<sup>۳</sup> و ابراهیم زینلی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷

رهبان، س.، ترابی، ب.، سلطانی، ا.، و زینلی، ا.، ۱۴۰۰. استفاده از مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب کلزا (*Brassica napus L.*) در شرایط ایران. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۳(۱): ۱۷۷-۱۵۷.

چکیده

تغییرات اقلیمی، کاهش تنوع زیستی در منطقه و نگرانی در مورد امنیت غذایی به‌عنوان مشکلاتی مهم مطرح هستند؛ در این راستا بررسی شرایط جهت دستیابی به افزایش تولید محصولات کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. برای بررسی راه‌کارهای افزایش عملکرد، ابتدا بایستی پتانسیل عملکرد و عوامل محدودکننده عملکرد تعیین و مورد ارزیابی قرار گیرند. از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به‌عنوان طرح توسعه‌یافته‌ای از آزمایش‌های مزرعه‌ای برای غلبه بر محدودیت‌هایی مانند زمان و هزینه استفاده نمود. این بررسی با هدف استفاده از مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کلزا در سطح کشور انجام گرفت. در نتیجه پارامتریابی مدل، سه رقم زودرس، متوسط رس و دیرس برای کلزا تعیین شد، که درجه حرارت جمعی برای کامل شدن دوره رشد آن‌ها به ترتیب ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۲۷۰۰ درجه سانتی‌گراد روز برآورد گردید. پس از تعیین پارامترهای مورد نیاز، به‌منظور ارزیابی مستقل مدل، با استفاده از داده‌های مقالاتی که از آن‌ها برای برآورد پارامترها استفاده نشده بود، بر اساس تاریخ کاشت و مدیریت منطقه مورد نظر و همچنین آمار هواشناسی آن مناطق، مدل اجرا گردید تا درستی و صحت‌سنجی مدل صورت گیرد. با توجه نمودار ۱:۱ و آماره‌های  $F=0/87$ ،  $CV=18$  (درصد) و  $RMSE=67/04$  ( $g \cdot m^{-2}$ ) برای عملکرد دانه و  $F=0/97$ ،  $CV=5$  (درصد)،  $RMSE=10/68$  (روز) برای روز تا رسیدگی و  $F=0/83$ ،  $CV=19/35$ ،  $RMSE=91/9$  ( $mm \cdot ha^{-1}$ ) برای نیاز آبی می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی رشد کلزا با استفاده از مدل SSM-iCrop رضایت‌بخش بوده است و نتایج حاکی از برآورد صحیح پارامترهای مدل و تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی عملکرد کلزا در ایران می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، پارامتریابی، شبیه‌سازی، مدل‌های گیاهی

مقدمه

کنجاله جهان است (Yang et al., 2014). سطح زیر کشت کلزا در دنیا در نیم قرن اخیر پنج برابر شده است، یعنی هر ۲۰ سال دو برابر به سطح زیر کشت کلزا اضافه گردیده است (FAO, 2015). از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۳ میزان تولید کلزا در دنیا از ۲۶/۷ به بیش از ۷۲/۶ میلیون تن و سطح زیر کشت آن از ۲۰ به بیش از ۳۶ میلیون هکتار رسیده است. همچنین آمارها نشان می‌دهد که در ایران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ میزان تولید از ۷۶ به ۳۵۰ هزار تن و سطح زیر کشت از ۴۷ به ۱۷۰ هزار هکتار رسیده است (FAO, 2014). با این وجود، در حال حاضر تولید دانه‌های روغنی از جمله کلزا در کشور نمی‌تواند تقاضای مصرف داخلی را برآورده سازد. ایران با واردات ۹/۱ میلیارد دلار انواع

کلزا (*Brassica napus*) در بسیاری از مناطق جهان یک زراعت مهم اقتصادی محسوب می‌شود و سومین منبع تأمین‌کننده روغن و

- ۱- دانشجوی دکتری گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
  - ۲- دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
  - ۳- استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
  - ۴- دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.
- (\* نویسنده مسئول: Email: ben\_torabi@yahoo.com)

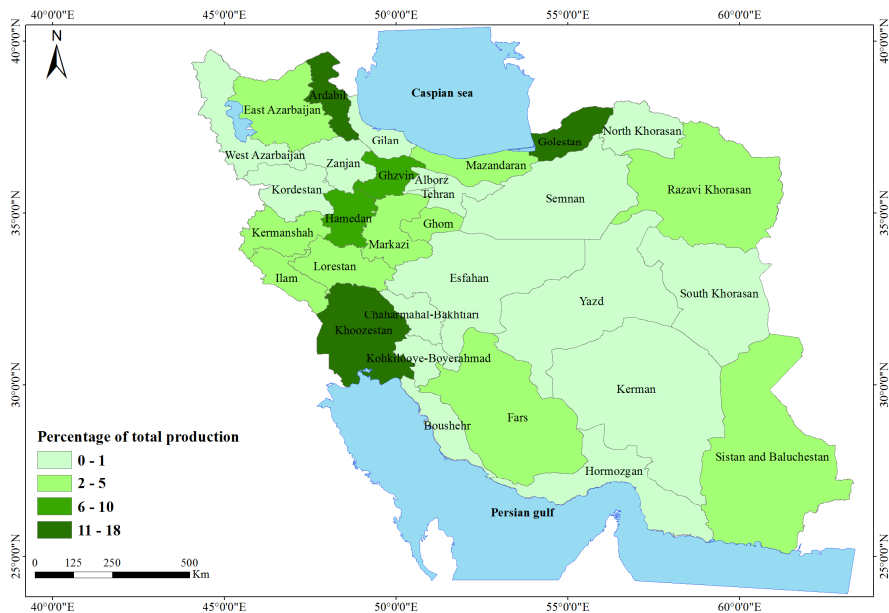
مناسب برای تخمین عملکرد پتانسیل می‌باشد (Soltani et al., 2016؛ Hajjarpoor et al., 2018) و دارای قابلیت اطمینان بالایی در مطالعات متعدد در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها برای محصولات مختلف از جمله نخود (Vadez et al., 2013)، سویا (Sinclair et al., 2014)، لوبیا (Marrou et al., 2014)، عدس (Ghanem et al., 2015) و بادام زمینی (Vadez et al., 2017) بوده است. مدل SSM-iCrop به‌واسطه دارا بودن مزیت‌هایی مانند تسهیل در ساخت آزمون، کاربرد، درک و تفسیر نتایج، و همچنین نیاز به حداقل ورودی‌ها، در تجزیه و تحلیل عملکرد و عوامل محدودکننده عملکرد، کارایی بالایی دارد. این مطالعه به‌منظور پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای کلزا بر اساس داده‌های آزمایش‌های مستقل میدانی در ایران انجام شد.

### مواد و روش‌ها

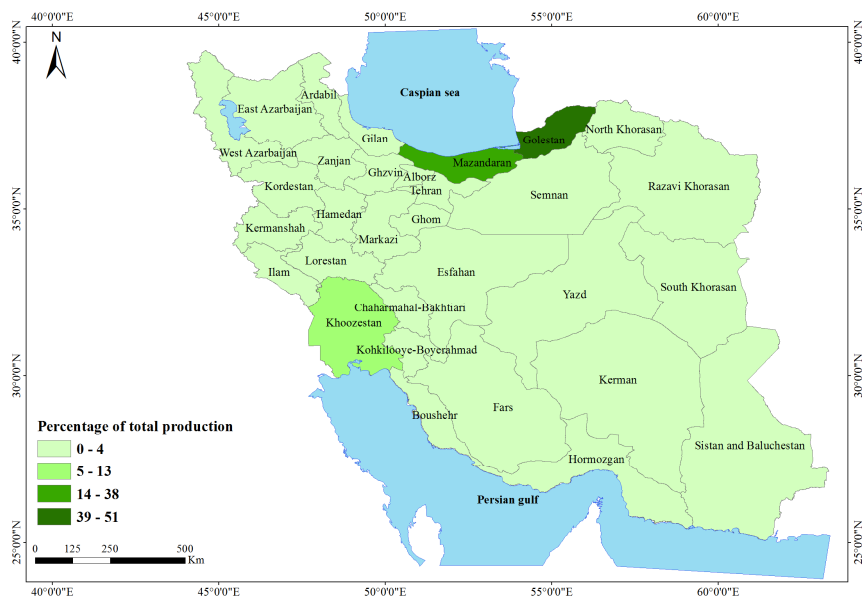
#### محل مطالعه و استان‌های اصلی تولیدکننده کلزا در ایران

این تحقیق در سال ۱۳۹۵ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شده است. در اولین مرحله مهم‌ترین مناطق تولیدکننده کلزا در ایران تعیین شد. برای این منظور استان‌هایی که مجموعاً ۸۵ درصد تولید کلزا در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ به‌تفکیک آبی و دیم را به خود اختصاص داده‌اند، انتخاب شدند. استان‌های با بیش از پنج درصد میزان تولید در اولویت انتخاب بودند. بر اساس آمار ۱۵ ساله از سازمان جهاد کشاورزی کشور استان‌های مهم تولیدکننده کلزا در کشت آبی عبارتند از خوزستان، گلستان، مازندران، اردبیل، ایلام، کرمانشاه، آذربایجان شرقی، لرستان، خراسان رضوی، فارس، همدان و قزوین که در مجموع، ۸۶/۷ درصد تولید کلزای آبی کشور را به خود اختصاص می‌دهند و استان‌های مهم تولیدکننده کلزا در کشت دیم عبارت از مازندران، گلستان و خوزستان است که مجموعاً ۹۰/۱ درصد تولید کلزای دیم کشور را به خود اختصاص می‌دهند. تولید کلزای آبی و دیم در ایران در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ به‌طور متوسط به‌ترتیب حدود ۸۵۹۵۱/۱ و ۶۴۳۰۱/۳ تن، عملکرد متوسط به‌ترتیب ۱۸۳۳/۵ و ۱۵۴۱/۶ کیلوگرم در هکتار و سطح زیر کشت به‌ترتیب ۴۳۳۸۹/۲ و ۳۸۷۹۱/۵ هکتار بوده است.

روغن‌های خوراکی دوازدهمین واردکننده در دنیا به‌شمار می‌رود. با در نظر گرفتن خالص مصرف داخلی، ایران با میزان سرانه واردات بیش از ۲۰ کیلوگرم به‌ازای هر نفر، مقام اول سرانه واردات در بین کشورها را به خود اختصاص می‌دهد (Soltani, A. 2015). بر اساس آمار ۱۵ ساله از سازمان جهاد کشاورزی کشور در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵، عملکرد متوسط در مزارع آبی کلزا برابر با ۱۹۰۷ کیلوگرم در هکتار و در مزارع دیم کلزا معادل با ۱۵۲۸ کیلوگرم در هکتار برآورد شده است. محدودیت منابع آب و خاک به‌دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیمی کشور از یک سو و ضرورت تحقق خودکفایی در امور زیربنایی از سوی دیگر، موجبات بهره‌برداری بهینه از منابع آب و خاک موجود در سطح کشور را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. تغییرات اقلیمی، کاهش تنوع زیستی در منطقه و نگرانی در مورد امنیت غذایی به‌عنوان مشکلاتی مهم مطرح هستند. در این راستا بررسی شرایط، جهت دستیابی به افزایش تولید محصولات کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد (Laurance, 2014). برای بررسی راه‌کارهای افزایش عملکرد، ابتدا بایستی پتانسیل عملکرد و عوامل محدودکننده عملکرد (آب و هوا، خاک، آب و عوامل ژنتیکی) تعیین و مورد بررسی قرار گیرند. بدین منظور می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای در نقاط مختلف و طی چند سال بهره‌گرفت تا راه‌های بهبود مدیریت زراعی و بهبود ژنتیکی مشخص گردد، اما انجام چنین آزمایشاتی پرهزینه بوده و هزینه زیادی دارد. از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به‌عنوان طرح توسعه‌یافته‌ای از آزمایش‌های مزرعه‌ای برای غلبه بر محدودیت‌هایی مانند زمان و هزینه استفاده نمود. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به‌دلیل هزینه پایین، سرعت بالا و در اختیار قرار دادن اطلاعات کامل، گزینه مناسبی برای تکمیل و توسعه نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای محسوب می‌شوند. مدل‌های گیاهان زراعی برای بررسی و برآورد میزان عملکرد، تعیین راه‌کارها و برنامه‌ریزی برای افزایش عملکرد با استفاده از منابع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند (Geerts & Raes, 2009). همچنین می‌توانند برای ارزیابی نیاز آب و نیازهای تغذیه گیاهی در شرایط مختلف از این مدل‌ها استفاده کرد (Van Ittersum et al., 2003). مدل‌های گیاهان زراعی از پارامترهای مختلف گیاهی و محیطی برای شبیه‌سازی رشد محصول استفاده می‌کنند و قبل از به‌کارگیری این مدل‌ها بایستی آن‌ها را پارامتریابی و سپس ارزیابی نمود (Hsiao et al., 2009). از جمله مدل‌هایی که برای کلزا واسنجی و کالیبره شده است، می‌توان به مدل AquaCrop (Arvaneh & Abbasi, 2014) و CropSyst (Honar et al., 2012) اشاره کرد. مدل SSM-iCrop که توسط سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2012) طراحی و ساخته شده است، بسیار



شکل ۱- سهم تولید کلزا آبی در استان‌های مختلف ایران (درصد) در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵  
 Fig. 1- Irrigated canola production share in different provinces of Iran (percent)



شکل ۲- سهم تولید کلزا دیم در استان‌های مختلف ایران (درصد) در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵.  
 Fig. 2- Rainfed canola production share in different provinces of Iran (percent)

## آزمایشات میدانی

استان‌های مهم تولیدکننده کلزا استخراج شد. این آزمایشات در جدول

۱ ارائه شده است.

داده‌های مورد نیاز مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی رشد،

نمو، عملکرد و نیاز آبی کلزا از منابع و پژوهش‌هایی انجام شده در

جدول ۱- آزمایشات مورد استفاده برای پارامتریابی و ارزیابی SSM-iCrop  
Table 1- Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iCrop

استان، شهرستان و سال آزمایش Province, location and year	تیمارها Treatments	رفرنس Reference
آزمایشات مورد استفاده برای پارامتریابی مدل Experiments used for parameter estimation		
مغان، اردبیل، ۱۳۸۵ Moghan, Ardebil, 2006	تاریخ کاشت Planting date	Razmi et al., 2009
مغان، اردبیل، ۱۳۸۹ Moghan, Ardebil, 2010	فنولوژی، فیزیولوژی Phenology, physiology	Soleymanzade et al., 2012
اراک، مرکزی، ۱۳۸۷ Arak, Markazi, 2008	ژنوتیپ Genotype	Khatamian et al., 2011
ارومیه، آذربایجان غربی، ۱۳۷۹ Orumieh, West Azarbaijan, 2000	ژنوتیپ Genotype	Valadiani & Tajbakhsh, 2007
اهواز، خوزستان، ۱۳۸۴-۱۳۸۵-۱۳۸۶ Ahwaz, Khozestan, 2005-2006-2007	تاریخ کاشت Planting date	Khayat et al., 2011
اسلام آباد، کرمانشاه، ۱۳۸۵ Eslamabad, Kermanshah, 2006	ژنوتیپ Genotype	Siahbidi & rezaizad, 2012
گرگان، گلستان، ۱۳۸۲ Gorgan, Golestan, 2003	تاریخ کاشت Planting date	Abadian et al., 2012
گرگان، گلستان، ۱۳۸۶ Gorgan, Golestan, 2007	تاریخ کاشت Planting date	Bagheri & Safahani, 2010
گرگان، گلستان، ۱۳۷۹ Gonbad, Golestan, 2000	مقدار دانه، فاصله ردیف Seed quantity, Row spacing	Faraji, 2004
ساری، مازندران، ۱۳۸۸ Sari, Mazandaran, 2009	تاریخ کاشت، کود نیتروژن planting date, Nitrogen fertilizer	Pashakolayi et al., 2011
نکاء، مازندران، ۱۳۸۶ Neka, Mazandaran, 2007	تاریخ کاشت، کود نیتروژن Planting date, Nitrogen fertilizer	Pashakolayi et al., 2008
باوه، مازندران، ۱۳۸۵ Baye, Mazandaran, 2006	تاریخ کاشت Planting date	Rameeh, 2014
آزمایشات مورد استفاده در ارزیابی مدل Experiments used for model evaluation		
زرقان، فارس، ۱۳۷۹ Zarghan, Fars, 2000	رژیم آبی Water regime	Niazi, 2006
همدان، همدان، ۱۳۸۹ Hamedan, Hamedan, 2007	روش آبیاری Irrigation method	Mazaheri et al., 2011
اراک، مرکزی، ۱۳۸۸ Arak, Markazi, 2008	ژنوتیپ Genotype	Mostafavi Rad et al., 2011
اراک، مرکزی، ۱۳۸۸ Arak, Markazi, 2008	تاریخ کاشت Planting date	Mostafavi Rad et al., 2012

Mashhad, Khorasan Razavi, 2006	ژنوتیپ Genotype	Ghani zade & Azizi, 2009
Ahwaz, Khozestan, 2007	تنش خشکی ژنوتیپ، Genotype, Drought stress	Ahmadi et al., 2015
Dezful, Khozestan, 2011	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	Nouriani, 2015
Qazvin, Qazvin, 2008	تاریخ کاشت، روش آبیاری Planting date, Irrigation method	Varse et al., 2010
Gorgan, Golestan, 2009	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	Behdadian et al., 2012
Gorgan, Golestan, 2010	تاریخ کاشت Planting date	Faraji, 2016
Gorgan, Golestan, 2010	باکتری‌های تحریک‌کننده رشد Growth stimulating bacteria	Faraji, 2013
Gorgan, Golestan, 2005	ژنوتیپ Genotype	Langrudi et al., 2007
Neka, Mazandaran, 2008	مقدار بذر Seed quantity	Sina & Ramie, 2011
Khoramabad, Lorestan, 2008	کود ریز مغذی Micronutrients	Azizi et al., 2011
Miandoab, West Azarbaijan, 2004	ژنوتیپ Genotype	Akhondi et al., 2009
Eslamabad, Kermanshah, 2009	ژنوتیپ Genotype	Jafari et al., 2014
Eslamabad, Kermanshah, 2009	تاریخ کاشت Planting date	Zarei Siahbidi & Rezai Zad, 2013
آزمایشات مورد استفاده برای تعیین مقدار تبخیر و تعرق		
<b>Experiments used for Water requirement</b>		
Fars, Shiraz, 2008	تنش خشکی Drought stress	Henr et al., 2013
Qazvin, Qazvin, 2009	تبخیر تعرق پتانسیل Determination of evapotranspiration potential	Ebrahimi pak, 2009
Kermansha, Kermansha, 2014	تعیین تبخیر و تعرق Determination of evapotranspiration	Ghamarniya, 2016
West Azerbaijan, orumie, 2004	میزان آب مورد نیاز Water requirements	Razavi, 2010
Hormozgan, Hajiabadm, 2005	میزان آب مورد نیاز Water requirements	Moradi, 2005
Golestan, Gorgan, 2005	آبیاری، تاریخ کاشت Irrigation & date	Faraji, 2005

شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه کلزا را بر اساس داده‌های هواشناسی روزانه (جدول ۲)، ویژگی‌های خاک (جدول ۲)، مدیریت زراعی (جدول ۲)، و پارامترهای گیاهی (جدول ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸) انجام می‌دهد.

#### ساختار مدل SSM-iCrop

از مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی مراحل رشد، نمو و عملکرد محصولات زراعی مختلف در شرایط متفاوت استفاده می‌شود (Soltani, 2012). این مدل رشد، نمو و عملکرد را با استفاده از زیر مدل‌های فنولوژی، گسترش و پیری برگ، تولید و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک محاسبه می‌کند. این مدل

جدول ۲- داده‌های مورد نیاز هواشناسی و ورودی‌های مدیریت محصول برای اجرای مدل SSM-iCrop  
 Table 2- Required weather, soil and crop management input to run SSM-iCrop

پارامتر Parameter	اختصار Abbreviation	واحد Unit
داده‌های هواشناسی Wheatear data		
حداکثر دمای روزانه Maximum daily temperature	TMAX	°C
حداقل دمای روزانه Minimum daily temperature	TMIN	°C
تشعشع خورشیدی Solar radiation	SRAD	MJ.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
بارندگی روزانه Daily rainfall	RAIN	mm
ویژگی‌های خاک Soil Attributes		
آلبدوی خاک Soil albedo	SALB	-
ضریب زهکشی عمق خاک Drainage factor	DRAINF	-
کسر حجمی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم Volumetric soil water content at drained upper limit	IDUL	mm.mm <sup>-1</sup>
کسر حجمی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی Volumetric soil water content at crop lower limit	ILL	mm.mm <sup>-1</sup>
کسر حجمی رطوبت خاک در نقطه اشباع Volumetric soil water content at saturation	ISAT	mm.mm <sup>-1</sup>
حجم آب خاک در دسترس قابل استخراج برای ریشه‌ها Volumetric soil water content available for extraction by crop roots	EXTR	mm.mm <sup>-1</sup>
شماره منحنی خاک Curve number	CN	-
عمق خاک Soil depth	SOL DEP	mm
مدیریت زراعی Crop management		
تاریخ کاشت Planting data	PDOY	Day
رطوبت خاک در زمان کاشت Initial soil water at sowing time	ISW	mm
کسر آب قابل تعرق خاک برای انجام آبیاری Irrigation threshold level	IRGLVL	-

## فنولوژی

فنولوژی بر اساس مفهوم واحد دمایی تعدیل شده بر اساس مقدار رطوبت خاک پیش‌بینی می‌شود (Soltani et al., 1999; Soltani & Sinclair, 2011, 2012). مدل مراحل سبز شدن، شروع پیر شدن دانه‌ها، پایان پیر شدن دانه‌ها، شروع پیر شدن برگ‌ها و رسیدگی را پیش‌بینی می‌کند. مدل، واکنش سرعت نسبی نمو به میانگین دمای روزانه را با استفاده از یک تابع دندان‌مانند<sup>۱</sup> توصیف می‌کند. پارامترهای مورد نیاز در این تابع شامل TBD: دمای پایه<sup>۲</sup>، TPID: دمای مطلوب تحتانی<sup>۳</sup>، TP2D: دمای مطلوب فوقانی<sup>۴</sup> و TCD: دمای سقف<sup>۵</sup> می‌باشد. گیاهان برای رسیدن به هر یک از مراحل نیاز به مقادیر مشخصی از واحد دمایی تجمعی دارند که این مقادیر به‌عنوان پارامترهای ورودی زیرمدل SSM-iCrop جهت مدل‌سازی مراحل فنولوژیک گیاهان محسوب می‌شوند.

## تغییرات سطح برگ

برای محاسبه تغییرات سطح برگ از روشی که در مدل EPIC و ALMANAC به کار گرفته شده استفاده شد (Soltani, 2009; Williams et al., 1989; Kiniry et al., 1992). در این روش فرض بر آن است که دما مهم‌ترین عامل محدود سازنده گسترش سطح برگ است و گسترش سطح برگ به‌طور غیرمستقیم از طریق مرحله نمو نسبی که خود تحت کنترل واحد دمایی است، به دما ربط داده می‌شود. همچنین پیر شدن و کاهش سطح برگ به‌طور ساده به مرحله نمو ارتباط داده می‌شود. با شروع رشد دانه‌ها مرحله پیر شدن سطح برگ شروع شده و شاخص سطح برگ به‌طور خطی کاهش می‌یابد و در رسیدگی برداشت به صفر می‌رسد. بدین ترتیب، در مرحله پیر شدن دانه‌ها چنانچه دما بالاتر باشد، پیر شدن دانه‌ها سریع‌تر رخ داده و رسیدگی زودتر اتفاق می‌افتد و در نتیجه، شاخص سطح برگ نیز زودتر کاهش پیدا می‌کند.

## تولید و توزیع ماده خشک

در این مدل تولید ماده خشک با روش ساده مبتنی بر کارایی استفاده از تشعشع (RUE<sup>۶</sup>) پیش‌بینی می‌شود. کسر دریافت نور در هر روز از شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (K برای PAR) بر اساس قانون بیر-بوگر-لامبرت در مدل محاسبه می‌شود (Sinclair, 2006).

کسری از نور رسیده به بالای کانوبی گیاه که توسط آن دریافت می‌شود، کسر دریافت نور (FINT) نامیده می‌شود. به‌طور کلی، کسر دریافت نور تحت تأثیر شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی (K) می‌باشد. در معادله ۱ رابطه بین FINT با شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نشان داده شده است.

$$\text{FINT} = 1 - \text{EXP}(-k \times \text{LAI}) \quad (1)$$

در این معادله، FINT: کسری از نور رسیده به بالای کانوبی گیاه که توسط آن دریافت می‌شود، K: ضریب خاموشی و LAI شاخص سطح برگ است.

بین مقدار نور دریافت شده و ماده خشک تولید شده در گیاه یک رابطه خطی وجود دارد. شیب این خط به‌عنوان کارایی استفاده از تشعشع (RUE) شناخته می‌شود (معادله ۲). با استفاده از مقدار شاخص سطح برگ روزانه و با استفاده از ضریب خاموشی برای گیاه (K)، به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی مدل SSM-iCrop، و با استفاده از رابطه موجود در معادله ۱، مقدار کسر دریافت تشعشع روزانه محاسبه می‌شود. در مدل SSM-iCrop با استفاده از مقدار تشعشع دریافتی تجمعی محاسبه شده با معادله ۱ و پارامتر RUE و با استفاده از معادله ۲، مقدار ماده خشک محاسبه می‌شود.

$$\text{CDM} = \text{RUE} \times \text{CPAR} \quad (2)$$

در این معادله، CDM: ماده خشک تجمعی، CPAR: مقدار تشعشع دریافتی تجمعی و RUE: کارایی استفاده از تشعشع می‌باشد. تشکیل دانه بر اساس مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت محاسبه می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012). ابتدا مقدار بالقوه افزایش شاخص برداشت به‌ازای هر واحد دمایی در طول دوره پیر شدن (PDHI) به‌صورت  $\text{Hmax} \times \text{tuHAR} / \text{frTSG} - \text{frBSG}$  تقسیم بر واحد دمایی دوره پیر شدن دانه ( $\text{tuHAR} \times \text{frTSG} - \text{frBSG}$ ) به‌دست می‌آید.  $\text{frTTG}$  به‌ترتیب واحد دمایی از کاشت تا رسیدگی برداشت، واحد حرارتی از کاشت تا شروع رشد دانه و واحد حرارتی از کاشت تا پایان رشد دانه می‌باشند. در طول دوره پیر شدن میزان افزایش شاخص برداشت در هر روز (DHI) به‌صورت حاصل ضرب PDHI و واحد دمایی در آن روز (DTU) محاسبه می‌شود. میزان افزایش ماده خشک دانه از تولید جاری یا انتقال مجدد به‌صورت حاصل ضرب DHI و ماده خشک کل محاسبه می‌شود.

## موازنه آب خاک

این مدل می‌تواند تعادل آب خاک و اثرات کمبود آب خاک را بر رشد و نمو محصول شبیه‌سازی کند. مقدار آب قابل دسترس برای گیاه تحت تأثیر عمق ریشه و به تبع آن حجم خاکی است که ریشه در طول فصل رشد به آن دسترسی دارد. در مدل SSM برای انجام

- 1- Dent-link
- 2- Base Temperature for Development
- 3- Lower Optimum Temperature for Development
- 4- Upper Optimum Temperature for Development
- 5- Ceiling Temperature for Development
- 6- Radiation use efficiency

(Ritchie, 1998) (Taylor, 1972) اصلاح شده توسط ریچی (Ritchie, 1998) محاسبه می‌شود. در این روش ابتدا تبخیر و تعرق معادل (EEQ) از آلبیدو (ALBEDO) سطح (خاک و گیاه زراعی)، میانگین دمای هوا در طی روز (TD) و تشعشع خورشیدی روزانه (SRAD) به‌دست می‌آید:

معادله (۶)

$$EEQ = SRAD \times (0.004876 - 0.004374 \times ALBEDO) \times (TD + 29)$$

میانگین دمای هوا از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن وزن بیشتری به حداکثر دمای روزانه داده شده است.

$$TD = 0.6 \times TMAX + 0.4 \times TMIN \quad \text{معادله (۷)}$$

آلبیدوی سطح (ALBEDO) بستگی به بخشی از سطح مزرعه که توسط گیاه زراعی یا خاک پوشیده شده، دارد و به آلبیدوی گیاه زراعی (CALB) یا خاک (SALB) نیز وابسته است:

معادله (۸)

$$ALBEDO = CALB \times (1 - \exp(-KET \times ETLAI)) + SALB \times (\exp(-KET \times ETLAI))$$

بر اساس معادلات بالا برای مزرعه‌ای بدون پوشش گیاه زراعی، ALBEDO برابر با آلبیدوی خاک (SALB) خواهد بود، ولی با افزایش ALBEDO، ETLAI افزایش می‌یابد و با پوشش کامل زمین با گیاه، آلبیدو برابر آلبیدو گیاه (CALB) خواهد بود.

بعد از تخمین EEQ تبخیر تعرق بالقوه (PET) بسته به شرایط طی روز به‌دست می‌آید:

$$PET = EEQ \times 1.1 \quad \text{معادله (۹)}$$

$$if \quad 5 \leq TMAX \leq 34$$

$$PET = EEQ \times ((TMAX - 34) \times 0.05 + 1.1)$$

$$if \quad TMAX > 34$$

$$PET = EEQ \times 0.01 \times \exp(0.18 \times (TMAX + 20))$$

$$if \quad TMAX < 5$$

در این معادله، TMAX: حداکثر دمای روزانه می‌باشد. در شرایطی که حداکثر دمای هوا کمتر از پنج درجه سانتی‌گراد باشد به دلیل احتمال وقوع یخبندان PET کمتری محاسبه می‌گردد و برعکس، در شرایطی که حداکثر دمای هوا بالاتر از ۳۴ درجه سانتی‌گراد باشد، به دلیل احتمال وقوع انتقال افقی گرما، PET کوچک‌تری محاسبه می‌شود.

تبخیر بالقوه از سطح خاک (EOS) یعنی تبخیر از خاک کاملاً مرطوب، با ضرب PET در کسری از سطح خاک که توسط گیاه پوشیده نشده است، به‌دست می‌آید:

معادله (۱۰)

$$EOS = PET \times \exp(-KET \times ETLAI)$$

عبارت‌نمایی در سمت راست معادله، کسری از زمین که توسط

محاسبات موازنه آب خاک، خاک به‌صورت دو لایه در نظر گرفته شده است: یک لایه فوقانی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و یک لایه دوم که شامل لایه اول نیز می‌باشد و برابر با عمق مؤثر استخراج آب<sup>۷</sup> است (MEED). مقدار این پارامتر برابر با ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. عمق لایه دوم با شروع رشد ریشه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد. عمق خاک در زمان سبز شدن برابر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. پس از مرحله سبز شدن به‌ازای هر واحد دمایی، به‌مقداری که جزء پارامترهای گیاهی محسوب می‌شود، بر عمق ریشه افزوده می‌شود. عمق نهایی قابل دسترس برای ریشه می‌تواند بر اساس مرحله فنولوژیک، عمق نفوذ ریشه، عمق خاک و یا موانع فیزیکی و شیمیایی موجود در خاک برای رشد ریشه تعیین شود (Soltani & Sinclair, 2011). در این مدل مقدار آب قابل دسترس برای گیاه و کسر آب قابل تعرق روزانه برای گیاه با استفاده از معادلات ۳ تا ۵ به‌دست می‌آید:

$$ESW_i = ESW_{i-1} + I - ES - TR - D \quad \text{معادله (۳)}$$

$$ATSW_i = ATSW_i + I + EWAT - ES - TR - D$$

معادله (۴)

$$FTSW_i = ATSW_i / TTSW \quad \text{معادله (۵)}$$

در این معادله‌ها، ESW: مقدار آب قابل دسترس در لایه اول، ATSW: مقدار آب قابل دسترس در لایه دوم، FTSW: کسر آب قابل تعرق خاک، I: مقدار آب نفوذ کرده به خاک در اثر بارندگی (پس از کسر رواناب) یا آبیاری، ES: تبخیر از سطح خاک، TR1: مقدار آب تعرق یافته که از لایه اول جذب شده است، D: مقدار زهکشی، EWAT: مقدار آبی که در اثر افزایش عمق مؤثر استخراج آب یعنی نفوذ ریشه به لایه‌های زیرین، قابل دسترس شده است، TR: مقدار آب تعرق یافته، TTSW: کل آب قابل تعرق خاک (بالقوه). به‌جز FTSW که فاقد واحد است، سایر اجزای معادلات ۱ تا ۳ دارای واحد میلی‌متر هستند. TTSW را می‌توان با ضرب کردن عمق مؤثر استخراج آب و کسر حجمی آب قابل استخراج خاک به‌دست آورد. کسر حجمی آب قابل استخراج خاک در خاک‌های زراعی عموماً برابر ۰/۱۳ متر بر متر می‌باشد (Soltani, 2009).

### تبخیر از سطح خاک

در مدل SSM برای محاسبه تبخیر تعرق ابتدا تبخیر و تعرق بالقوه (PET: میلی‌متر در روز) محاسبه شده و سپس تبخیر بالقوه از سطح خاک (EOS: میلی‌متر در روز) و سرانجام تبخیر واقعی از سطح خاک (SEVP: میلی‌متر در روز) محاسبه می‌شود.

تبخیر تعرق بالقوه با روش پرستیلی و تیلور (Priestley &



(Torabi, 2009) و سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2012) مراجعه شود.

### بهره‌وری آب

مقدار بهره‌وری آب (WP) از تقسیم مقدار عملکرد بر مقدار تبخیر و تعرق گیاه زراعی در طی فصل رشد (ET) محاسبه شد. معادله (۱۴)

$$WP = Y / ET$$

### اطلاعات آب و هوا

اطلاعات مربوط به آب و هوا شامل مقادیر روزانه تشعشع رسیده (SRAD, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), دمای حداکثر (TMAX, °C), دمای حداقل (Tmin, °C), متوسط دما (TEMP, °C) و بارندگی (PR, mm) از مرکز اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید.

### اطلاعات خاک

اطلاعات مربوط به خاک از نقشه خاک Harvest Choice استخراج شد (Koo & Dimes, 2010). اطلاعات خاک مورد نیاز برای مدل در جدول ۱ آورده شده است.

### پارامتریابی

پارامتریابی مدل SSM-iCrop با استفاده از بررسی منابع و پژوهش‌هایی که قبلاً انجام گرفته است، صورت پذیرفت (لیست مقالات استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است). پارامتریابی عبارتست از تعیین پارامترها و ضرایب مدل برای منطقه مورد مطالعه به‌منظور تصحیح مراحل فنولوژی و عملکرد. جهت انجام پارامتریابی از رنج وسیعی از تاریخ کاشت و سال‌های مختلف استفاده شد. بدین ترتیب از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای استخراج شده از پایان‌نامه‌ها و مقالات چاپ شده توسط سایر محققین در استان‌های مهم تولیدکننده کلزا بر اساس روش پارامتریابی سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2012) عمل گردید. اطلاعات مورد نیاز جهت پارامتریابی شامل تاریخ کاشت، روز تا رسیدگی، حداکثر عملکرد دانه، حداکثر شاخص سطح برگ مورد انتظار، میزان کارایی مصرف نور بر حسب تشعشع فعال فتوسنتزی، شاخص برداشت و میزان رطوبت دانه در زمان برداشت بود. بعد از اجرای مدل، تنظیم پارامترها و ضرایب برای تعیین نتایج درست، و تکرار تنظیمات برای دستیابی به نتایج مورد نظر انجام گرفت. برای بررسی درستی پیش‌بینی روز تا رسیدگی و عملکرد توسط مدل، مقادیر مشاهده شده این صفات در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده آن‌ها در نمودار ۱:۱ ترسیم شد. برای صفت روز تا رسیدگی با تغییر در مقدار tuHAR (واحد حرارتی برای

گیاه پوشیده نشده است را نشان می‌دهد، KET: ضریب خاموشی برای کل تشعشع خورشیدی (و نه PAR) (معادل ۰/۵) و ETLAI: عبارت از شاخص سطح برگ مؤثر در تبخیر هستند.

تبخیر حقیقی از سطح خاک (SEVP) بر مبنای مدل ساده شده دو مرحله‌ای تبخیر است (Soltani & Sinclair, 2012). در مرحله اول، تبخیر از سطح خاک توسط انرژی قابل دسترس محدود می‌شود و زمانی اتفاق می‌افتد که لایه اول خاک مرطوب باشد، یعنی اولین روز پس از مرطوب شدن سطح خاک با بارندگی یا آبیاری بیش از ۱۰ میلی‌متر. در این شرایط مقدار SEVP مساوی با EOS قرار داده می‌شود. مرحله دوم، در زمانی اتفاق می‌افتد که لایه اول خشک باشد (ATSW1 ≤ 1) یا از مرطوب شدن سطح خاک بیش از یک روز گذشته باشد، یا کسر آب قابل دسترس در لایه مؤثر ریشه کمتر از ۰/۵ باشد (ATSW1 ≤ 5). در این مرحله، هر چه زمان پیشرفت کند، تبخیر حقیقی از سطح خاک کمتر می‌شود.

معادله (۱۱)

$$\begin{aligned} SEVP &= EOS && \text{Stage I} \\ SEVP &= EOS \times [(DYSE + 1)0.5 - DYSE0.5] && \text{Stage II} \end{aligned}$$

در این معادله، DYSE: تعداد روز از شروع مرحله دوم است.

### تعرق از گیاه

تعرق روزانه از گیاه (TR؛ میلی‌متر در روز) بر اساس پیوستگی بین تعرق و تولید ماده خشک روزانه (DDMP) محاسبه می‌شود. این پیوستگی توسط تنر و همکاران (Tanner, 1983) به‌طور کامل توضیح داده شده است. بر این اساس، مقدار تعرق روزانه متناسب با مقدار ماده خشک روزانه (حاصل فتوسنتز که از طریق روزنه‌ها رخ می‌دهد، یعنی همان مسیری که تعرق از آن روی می‌دهد) است که درجه خشکی هوا (VPD: کمبود فشار بخار اشباع بر حسب کیلوپاسکال) و ویژگی‌های گیاه از طریق ضریب کارایی تعرق (TEC؛ کیلوپاسکال) نیز اثرگذار هستند:

$$TR = (DDMP \times VPD) / TEC \quad \text{معادله (۱۲)}$$

TEC عمدتاً به مسیر فتوسنتزی (C<sub>3</sub> یا C<sub>4</sub>) و نیز کیفیت بیوشیمیایی بافت گیاه بستگی دارد و یک پارامتر گیاهی ورودی مدل است. کمبود فشار بخار اشباع (VPD) به‌صورتی کسری (VPDF) از اختلاف بین فشار بخار اشباع در دمای حداکثر روزانه (VPTMAX) و دمای روزانه (VPTMIN) به‌دست می‌آید:

$$VPD = VPDF (VPTMAX - VPTMIN)$$

مقدار VPDF عموماً برابر ۰/۷۵ می‌باشد، ولی در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب به ۰/۶۵ قابل کاهش است.

برای توضیحات بیشتر در ارتباط با روش‌های برآورد پارامترهای گیاهی به سلطانی (Soltani, 2009)، سلطانی و ترابی (Soltani ana)

## نتایج

### فنولوژی

پارامتریایی مدل SSM-iCrop برای کلزا بر اساس مناطق و ارقام مختلف تعیین شد و در نهایت، در مدل سه گونه یا رقم زودرس، متوسط رس و دیررس با واحد دمایی به ترتیب ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۲۷۰۰ درجه روز رشد (GDD) برای کل دوره رشد تعریف شدند. بر اساس نتایج پارامتریایی دمایی کاردینال کلزا شامل TBD (دمای پایه برای نمو)، TP1D (دمای مطلوب تحتانی برای نمو)، TP2D (دمای مطلوب فوقانی برای نمو) و TCD (دمای سقف برای نمو) به ترتیب  $0^{\circ}\text{C}$ ،  $25^{\circ}\text{C}$ ،  $28^{\circ}\text{C}$ ،  $40^{\circ}\text{C}$  می‌باشد (Soltani, 2009). همچنین واحد دمایی برای هر یک از مراحل فنولوژیکی شامل tuEMR (واحد حرارتی برای سبز شدن)، tuBSG (واحد حرارتی برای شروع شدن دانه)، tuBLS (واحد حرارتی برای شروع پیر شدن برگ)، tuTSG (واحد حرارتی برای پایان پر شدن دانه) و tuHAR (واحد حرارتی برای رسیدگی برداشت) برای ارقام زودرس به ترتیب معادل ۱۶۰، ۱۲۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰، برای ارقام متوسط رس به ترتیب ۲۰۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰، ۲۲۵۰ و ۲۵۰۰ و برای ارقام دیررس به ترتیب ۲۱۶، ۱۶۲۰، ۱۶۲۰، ۱۶۳۰، ۲۴۳۰ و ۲۷۰۰ درجه روز رشد (GDD) برآورد شد (جدول ۳). هر یک از متغیرهای tuEMR، tuBSG، tuBLS، tuTSG کسری از واحد حرارتی برای رسیدگی برداشت هستند که بر اساس ضرایب مربوط به گیاه کلزا محاسبه می‌شوند (Soltani, 2009). لازم به ذکر است که ضرایب مربوط به متغیرهای tuBSG و tuBLS یکسان می‌باشد. این بدین معناست که مرحله شروع پیر شدن برگ‌ها همزمان با مرحله شروع پر شدن دانه آغاز می‌گردد. با توجه به شکل ۳ نتایج نهایی پارامتریایی برای گیاه کلزا نشان می‌دهد که مدل SSM-iCrop صفت روز تا رسیدگی را با مقدار  $r=0.90$  و  $RMSE=17/5$  (day) و  $CV=7/38$  پیش‌بینی نموده است. این نتیجه بدین معنی که فنولوژی شبیه‌سازی شده توسط مدل دقیق بوده است.

رسیدگی برداشت) و برای صفت عملکرد با تغییر در مقادیر LAIMX (حداکثر شاخص سطح برگ) و RUE (کارایی استفاده از تشعشع) توانستیم تنظیمات لازم برای برآورد مناسب مدل را فراهم آوریم. لازم به ذکر است که مدل SSM-iCrop عملکرد دانه را بر حسب وزن خشک شبیه‌سازی می‌نماید. عملکرد گزارش شده در پژوهش‌های مورد استفاده بر حسب وزن تر است. بنابراین، برای اضافه کردن رطوبت (رطوبت ثبت شده برای دانه‌های کلزا در زمان برداشت ۱۰٪ می‌باشد)، عملکرد ماده خشک با ۰/۹ ضرب شد.

### ارزیابی

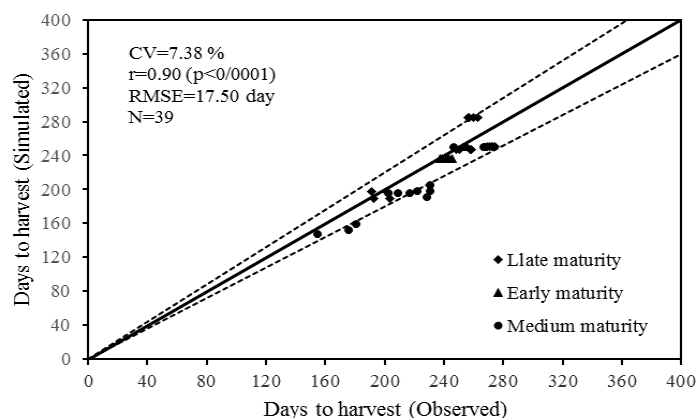
پس از پارامتریایی مدل، به منظور ارزیابی مستقل مدل، با استفاده از مقالاتی که از آن‌ها برای برآورد پارامتر استفاده نشده بود، اطلاعات مورد نیاز استخراج شد و بر اساس تاریخ کاشت و مدیریت منطقه مورد نظر و همچنین آمار هواشناسی آن مناطق مدل اجرا گردید تا درستی و صحت‌سنجی مدل صورت گیرد (جدول ۱). برای ارزیابی مدل از سه شاخص ضریب تغییر (CV)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad \text{معادله (۱۵)}$$

$$CV = \frac{RMSE}{O} \times 100 \quad \text{معادله (۱۶)}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad \text{معادله (۱۷)}$$

که در این معادلات،  $O_i$  و  $Y_{pi}$ : به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده متغیرهاست و  $n$ : تعداد مشاهدات می‌باشد. RMSE: به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود، کم بودن میزان خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV) و بالا بودن ضریب همبستگی (r) بیانگر دقت قابل قبول مدل خواهد بود.



شکل ۳- روز تا رسیدگی مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop بر اساس داده‌های استفاده شده در پارامتریابی مدل  
 Fig. 3- Simulated versus measured days to harvest by SSM-iCrop model based on data used in model parameterization

جدول ۳- برآورد پارامترهای فنولوژیکی برای ارقام زودرس، متوسط رس و دیررس  
 Table 3- Estimation of phenological parameters for early, Medium and late maturity cultivars

تعریف پارامترهای فنولوژی Definition of phenological parameters	اختصار Abbreviation	ارقام زودرس Early maturity	ارقام متوسطرس Medium maturity	ارقام دیر رس Late maturity	رفرنس References
دمای پایه برای نمو (درجه سانتی‌گراد) Base temperature for development (°C)	TBD	0	0	0	Soltani, 2009
دمای مطلوب تحتانی برای نمو (درجه سانتی‌گراد) Lower optimum temperature for development (°C)	TP1D	25	25	25	Soltani, 2009
دمای مطلوب فوقانی برای نمو (درجه سانتی‌گراد) Upper optimum temperature for development (°C)	TP2D	28	28	28	Soltani, 2009
دمای سقف برای نمو (درجه سانتی‌گراد) Ceiling temperature for development (°C)	TCD	40	40	40	Soltani, 2009
واحد حرارتی برای سبز شدن (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for emergence (°C)	tuEMR	160	200	216	Soltani, 2009
واحد حرارتی برای شروع پر شدن دانه (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for beginning of tuber growth (°C)	tuBSG	1200	1500	1620	Soltani, 2009
واحد حرارتی برای پایان پر شدن دانه (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for termination of tuber growth (°C)	tuTSG	1800	2250	2430	Soltani, 2009
واحد حرارتی برای رسیدگی برداشت (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for beginning leaf senescence (°C)	tuHAR	2000	2500	2700	Soltani, 2009
واحد حرارتی برای شروع پیر شدن برگ (درجه سانتی‌گراد روز) Temperature unit for harvest (°C)	tuBLS	1200	1500	1620	Soltani, 2009

## ۳-۲- توسعه سطح برگ

پارامترهای مورد نیاز برای این بخش از مدل شامل  $RLAI_1$  (شاخص سطح برگ در زمان سبز شدن)،  $frEMR$  (واحد دمایی از کاشت تا سبز شدن بر حسب درجه سانتی‌گراد روز)،  $RLAI_2$  (شاخص سطح برگ در مرحله نمو نسبی که در آن گیاه به ۹۶ درصد از حداکثر شاخص سطح برگ خود می‌رسد)،  $frMLAI$  (واحد دمایی از کاشت تا سبز شدن)،  $frMLAI$  (واحد دمایی از کاشت تا مرحله نمو نسبی که در آن گیاه به ۹۶ درصد از حداکثر شاخص سطح برگ خود می‌رسد بر حسب درجه سانتی‌گراد روز) و  $SRATE$  (ضریب سرعت زوال برگ) به ترتیب برابر  $۰/۲۲$ ،  $۰/۴$ ،  $۰/۹۹$ ،  $۰/۶۵$  و  $۱$  تخمین زده شد.

مقدار  $LAIMX$  (حداکثر شاخص سطح برگ) برای ارقام زودرس، متوسط رس و دیررس به ترتیب برابر  $۲/۲$ ،  $۲/۳$  و  $۵$  برآورد شد. پارامترهای مربوط به تأثیر دماهای نامناسب برای توسعه برگ‌ها شامل  $FrzTh$  (آستانه حداقل دما / دمایی که باعث انجماد و مرگ برگ می‌شود) و  $HeatTh$  (آستانه حداکثر دما برای پیری برگ) و همچنین مقدار تأثیر این دماها شامل  $FrzLDR$  (سرعت زوال برگ نسبت به هر درجه از دمای زیر آستانه دمای حداقل / انجماد)، و  $HtLDR$  (سرعت افزایش پیری برگ نسبت به هر درجه بالاتر از دمای آستانه) برای کلزا به ترتیب برابر  $۰/۱$ ،  $۳۰$ ،  $۰/۱$   $cm^2 \cdot ^\circ C^{-1}$  می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴- برآورد پارامترهای توسعه و پیری سطح برگ

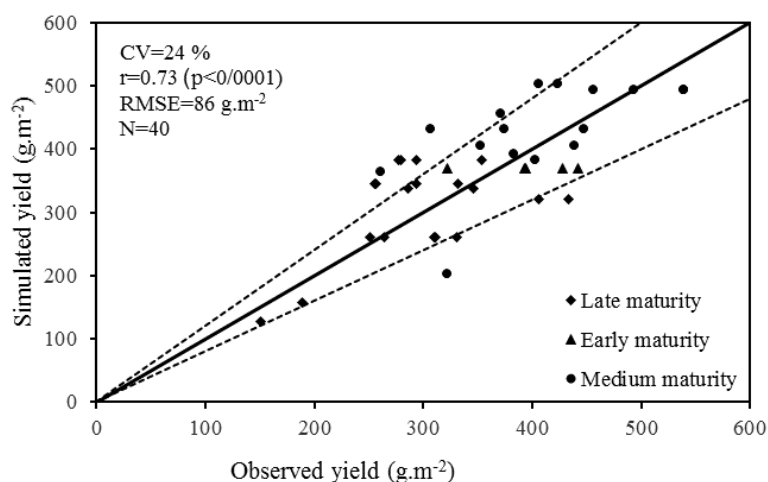
Table 4- Estimation of the parameters of development and senescence leaf

پارامتر Parameter	اختصار Abbreviation	ارزش Values	رفرنس References
شاخص سطح برگ در زمان سبز شدن Relative LAI at emergence stage	$RLAI_1$	0.22	Soltani, 2009
واحد دمایی از کاشت تا سبز شدن (درجه سانتی‌گراد روز) Fraction of temperature unit from sowing to emergence ( $^\circ C$ )	$frEMR$	0.4	Soltani, 2009
شاخص سطح برگ در مرحله نمو نسبی که در آن گیاه به ۹۶ درصد از حداکثر شاخص سطح برگ خود می‌رسد Relative LAI from sowing to 96% of maximum LAI	$RLAI_2$	0.99	Soltani, 2009
واحد دمایی در مرحله نمو نسبی که در آن گیاه به ۹۶ درصد از حداکثر شاخص سطح برگ خود می‌رسد (درجه سانتی‌گراد روز) Fraction of temperature unit from sowing to 96% of maximum LAI ( $^\circ C$ )	$frMLAI$	0.65	Soltani, 2009
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index		Early maturity=2.2 Medium maturity=3.2 Late maturity=5	
ضریب سرعت زوال برگ Leaf senescence rate coefficient	$SRATE$	1	Soltani, 2009
آستانه حداقل دما / دمایی که باعث انجماد و مرگ برگ می‌شود ( $^\circ C$ ) Low temperature/freezing threshold for leaf death ( $^\circ C$ )	$FrzTh$	-10	Table 1
سرعت زوال برگ نسبت به هر درجه از دمای زیر آستانه دمای حداقل / انجماد ( $cm^2 \cdot ^\circ C^{-1}$ ) Leaf death rate per $^\circ C$ below $FrzTh$ ( $cm^2 \cdot ^\circ C^{-1}$ )	$FrzLDR$	0.01	Table 1
آستانه حداکثر دما برای پیری برگ ( $^\circ C$ ) Heat threshold temperature for leaf death ( $^\circ C$ )	$HeatTh$	30	Table 1
سرعت افزایش پیری برگ نسبت به هر درجه بالاتر از دمای آستانه ( $cm^2 \cdot ^\circ C^{-1}$ ) Leaf death rate per $^\circ C$ above $HeatTh$ ( $cm^2 \cdot ^\circ C^{-1}$ )	$HtLDR$	0.1	Table 1

شد. آستانه شوری برای کلزا ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) ۱۱ و کاهش نسبی عملکرد با شوری بالاتر از حد آستانه ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) ۱۳ در نظر گرفته شد (جدول ۵). در شکل ۴ نتایج نهایی پارامتریابی برای صفت عملکرد گیاه کلزا ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که مدل SSM-iCrop عملکرد دانه کلزا را با مقدار  $r=0.73$  و  $\text{RMSE}=86$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) و  $\text{CV}=24$  پیش‌بینی نموده است.

### تولید و توزیع ماده خشک

در زیر مدل تولید و توزیع ماده خشک پارامترهای مربوط به دمای کاردینال برای تولید ماده خشک شامل  $\text{To}_1\text{RUE}$ ،  $\text{TbRUE}$  و  $\text{To}_2\text{RUE}$  و  $\text{TcRUE}$  به ترتیب برابر  $0^\circ\text{C}$ ،  $10^\circ\text{C}$ ،  $25^\circ\text{C}$  و  $35^\circ\text{C}$  برآورد گردید. همچنین مقادیر KPAR و IRUE به ترتیب ۰/۶۵ و ۲ ( $\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ) به دست آمد. پارامترهای توزیع ماده خشک به دانه از جمله  $\text{Hmax}$  و  $\text{Hmin}$  به ترتیب معادل ۰/۲۵ و ۰/۵ تخمین زده



شکل ۴- عملکرد مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop بر اساس داده‌های استفاده شده در پارامتریابی مدل  
Fig. 4- Simulated versus measured yield by SSM-iCrop model based on data used in model parameterization

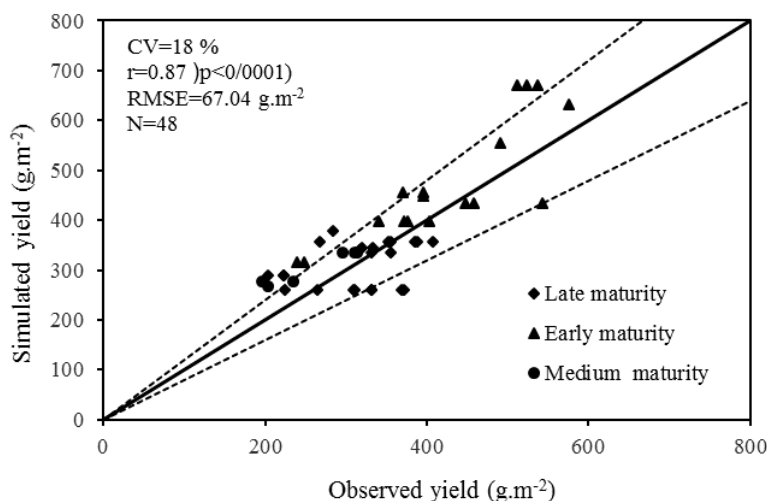
نمودار ۱:۱ (شکل ۵ و ۶) و آماره‌های  $r=0.87$ ،  $\text{CV}=18$  (درصد) و  $\text{RMSE}=67/04$  ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) برای عملکرد دانه و  $r=0.97$ ،  $\text{CV}=5$  (روز)،  $\text{RMSE}=10/68$  برای روز تا رسیدگی، می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی کلزا با استفاده از مدل SSM-iCrop رضایت‌بخش بوده است و نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و تصدیق‌کننده کارایی مدل در پیش‌بینی عملکرد کلزا در شرایط آب و هوایی مناطق مهم تولیدکننده کلزا در ایران می‌باشد.

### ارزیابی مدل

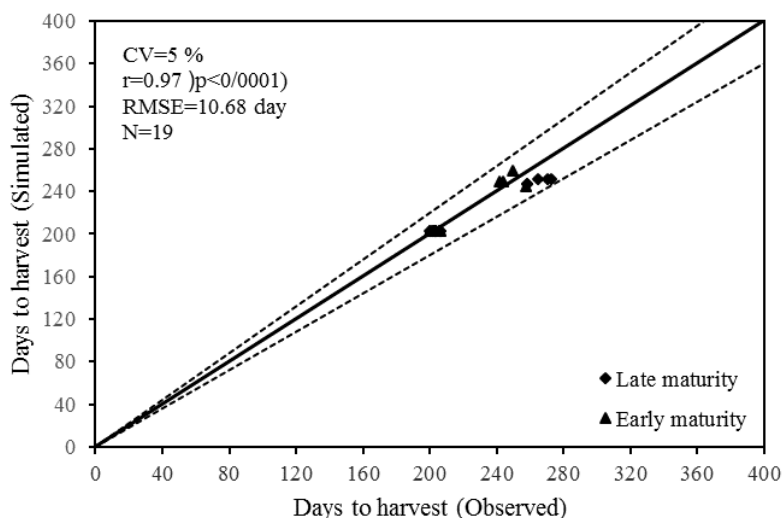
در این مرحله به منظور اطمینان از کارایی مدل، داده‌های روز تا رسیدگی و عملکرد شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده آن‌ها در آزمایش‌های میدانی (جدول ۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده برای روز تا رسیدگی و عملکرد به ترتیب برابر ۲۲۲ (روز) و ۳۸۳ (گرم بر مترمربع) به دست آمده و میانگین داده‌های مشاهده شده برای روز تا رسیدگی و عملکرد به ترتیب برابر ۲۲۳ (روز) و ۳۵۹ (گرم بر مترمربع) بوده است. همچنین با توجه

جدول ۵- برآورد پارامترهای تولید و توزیع ماده خشک  
**Table 5- Estimation of the parameters of dry matter production and partitioning**

پارامتر References	اختصار Abbreviation	ارزش Values	دفرنس Parameter
دمای پایه برای تولید ماده خشک (°C) Base temperature for dry matter production (°C)	TBRUE	0	Soltani, 2009
دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک (°C) Lower optimum temperature for dry matter production (°C)	TP1RUE	10	Soltani, 2009
دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک (°C) Upper optimum temperature for dry matter production (°C)	TP2RUE	25	Soltani, 2009
دمای سقف برای تولید ماده خشک (°C) Ceiling temperature for dry matter production (°C)	TCRUE	35	Soltani, 2009
ضریب خاموشی PAR Extinction coefficient for photosynthetically active radiation	KPAR	0.65	Soltani, 2009
کارایی استفاده از تشعشع فعال فتوسنتزی در شرایط بهینه رشد (g.MJ <sup>-1</sup> ) Radiation use efficiency under optimal growth conditions (g.MJ <sup>-1</sup> )	IRUE	2	Soltani, 2009
حداکثر شاخص برداشت Maximum harvest index/linear increase in harvest index	HI <sub>max</sub>	0.5	Table 1
حداقل شاخص برداشت Minimum harvest index	HI <sub>min</sub>	0.25	Table 1
آستانه شوری برای عملکرد (dS.m <sup>-1</sup> ) Salinity threshold for yield (dS.m <sup>-1</sup> )	SaltTH	11	Table 2
کاهش نسبی عملکرد با شوری بالاتر از آستانه (dS.m <sup>-1</sup> ) Slope of yield decrease per dS.m <sup>-1</sup> above SaltTh	SaltSlope	13	Table 3



شکل ۵- عملکرد مشاهده شده در مقابل عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop بر اساس داده‌های استفاده شده در ارزیابی مدل  
 fig. 5- Simulated versus measured yield by SSM-iCrop model based on data used in model evaluation



شکل ۶- روز تا رسیدگی مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop بر اساس داده‌های استفاده شده در ارزیابی مدل  
 fig. 6- Simulated versus measured days to harvest by SSM-iCrop model based on data used in model evaluation

### نیاز آبی

مقادیر پارامترهای به‌دست آمده در این مرحله به‌طور کامل در جدول ۶ آورده شده است.

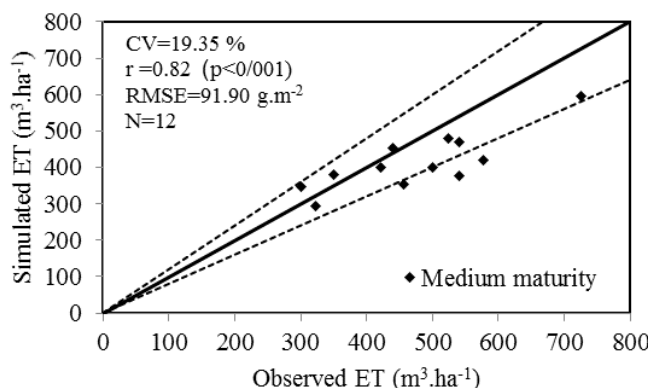
جدول ۶- برآورد پارامترهای گیاهی در کلزا که در موازنه آب خاک استفاده می‌شود.

Table 6- Parameter estimates relating to plant in canola that is used in soil water balance.

تعریف Description	اختصار Abbreviation	ارقام زودرس Early maturity	ارقام متوسط رس Medium maturity	ارقام دیررس Late maturity
عمق اولیه ریشه در زمان سبز شدن Initial depth of roots at emergence (mm)	iDEPOR	200	200	200
واحد حرارتی که در آن رشد ریشه شروع می‌شود Temperature unit for beginning root growth (°C)	tuBRG	160	200	216
واحد حرارتی که در آن رشد ریشه متوقف می‌شود Temperature unit for termination root growth (°C)	tuTRG	1200	1500	1620
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک توسط ریشه Effective depth of water extraction from soil (mm)	MEED	1000	1000	1000
ضریب کارایی تعرق Transpiration efficiency coefficient (Pa)	TEC	4.5	4.5	4.5
کسر آب قابل دسترس خاک که در کمتر از آن تولید کاهش می‌یابد FTSW threshold when dry matter production starts to decline	WSSG	0.3	0.3	0.3
کسر آب قابل دسترس خاک که در کمتر از آن گسترش سطح برگ کاهش می‌یابد FTSW threshold when leaf area development starts to decline	WSSL	0.4	0.4	0.4
ضریب حساسیت نمو و پیر شدن به تنش خشکی A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit	WSSD	0.5	0.5	0.5

به‌طور متوسط ۴۷۵ میلی‌متر بر هکتار و مقدار تبخیر و تعرق پیش‌بینی شده در محدوده ۲۹۵ تا ۶۰۰ و به‌طور متوسط ۴۱۴ میلی‌متر بر هکتار تخمین زده شد. شکل ۷ نمودار ۱:۱ با حدود اطمینان ۲۰ درصد تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد.

به‌منظور ارزیابی مدل در برآورد نیاز آبی، مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در تحقیقات مستقل میدانی انجام شده (جدول ۱) با مقادیر تبخیر و تعرق پیش‌بینی شده توسط مدل مورد مقایسه قرار گرفت. میزان تبخیر و تعرق مشاهده شده در دامنه ۳۰۰ تا ۷۲۶ و



شکل ۷- تبخیر و تعرق مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM-iCrop  
Fig. 7- Simulated versus measured evaporation and transpiration by SSM-iCrop model

2002). CV کمتر از این مقادیر به دلیل (الف) وجود خطاهای ذاتی در آزمایش‌ها و (ب) وجود خطا در تخمین پارامترهای ورودی به‌سختی به‌دست می‌آید (Soltani & Sinclair, 2011).

نتایج حاصل از پارامتریابی و ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا با نتایج گزارش شده توسط امیری و همکاران (Amiri et al., 2018) هم‌خوانی داشت. همچنین پیش‌بینی‌ها با نتایج به‌دست آمده در سایر مطالعات برای گیاه کلزا با استفاده از مدل CropSyst (Honar et al., 2012) و AquaCrop (Mousavizadeh et al., 2012; Arvaneh & Abbasi, 2014; 2016) مشابه بود.

مطالعات متعددی جهت پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop انجام شده است. نهبندانی و همکاران (Nehbandani et al., 2015) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا از مدل SSM-iCrop استفاده کردند. آن‌ها نتایج قابل قبولی را در رابطه با ارزیابی مدل گزارش دادند و ابراز داشتند که از این مدل می‌توان برای تعیین مناسب‌ترین تاریخ کاشت و برداشت محصول، عملکرد دانه و سایر مراحل فنولوژیکی سویا استفاده کرد. همچنین از مدل SSM-iCrop در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها و برای محصولات مختلف از جمله نخود (Vadez et al., 2013)، سویا (Sinclair et al., 2014)، لوبیا (Marrou et al., 2014)، عدس (Ghanem et al., 2015)، بادام

نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل، تبخیر و تعرق کلزا را با مقدار  $r=0.83$  و  $CV=19.35\%$  و  $RMSE=91.90$  ( $\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) پیش‌بینی نموده است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که مدل SSM-iCrop پیش‌بینی قابل قبولی را برای مقدار تبخیر و تعرق در مورد گیاه کلزا ارائه نموده است. برآورد تبخیر-تعرق در مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی آبیاری و ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر روی بازده و تأمین نیاز آبی گیاهان، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. میزان بهره‌وری آب در مناطق مورد بررسی بین ۰/۶۳ تا ۱/۰۴ و به‌طور متوسط ۰/۸۲ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد گردید.

## بحث

در مطالعه حاضر، مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا پارامتریابی شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل برای شبیه‌سازی روز تا رسیدگی از دقت بالایی برخوردار بود (درصد  $CV=5$ ) و برای شبیه‌سازی عملکرد و نیاز آبی از دقت قابل قبولی برخوردار بود (شکل ۶، ۷، ۸).

معمولاً برای مدل‌ها CV بین ۱۰ تا ۳۰ درصد قابل قبول است (به‌عنوان مثال، Amir & Sinclair, 1991; Hammer et al., 2010; Jamieson & Semenov, 2000; Robertson et al.,



SSM-iCrop می‌تواند بر این محدودیت‌ها غلبه کند و نیازی به سرمایه‌گذاری برای تعیین ضرایب مناطق جدید نیست. علاوه بر این، SSM دارای کدهای باز است که امکان استفاده در شرایط محیطی گسترده را برای پیش‌بینی رشد و عملکرد بسیاری از محصولات زراعی فراهم می‌آورد (Noorhosseini et al., 2018). این مدل نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر بوده و نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد. بنابراین، مهم‌ترین مزیت مدل SSM-iCrop شفافیت و کاربر پسند بودن آن می‌باشد، به طوری که می‌تواند مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی ابزاری قدرتمند برای مطالعات مختلف مرتبط با گیاهان هستند. مدل حاضر که نسخه ساده شده مدل‌های SSM است برای کاربرد در سطوح بزرگ تهیه شده است. هدف اصلی از این مدل استفاده از آن برای پیش‌بینی توان تولید گیاه و نیاز آبیاری خالص آن در گستره کشور بوده است. بنابراین، این مدل برای شبیه‌سازی جزئیات فرایندهای گیاهی در شرایط یک مزرعه احتمالاً مناسب نیست. برای مثال، این مدل فاقد معادلات لازم برای شبیه‌سازی تأثیر فتوسنتز و بهره‌سازی بر سرعت نمو فنولوژیک است. یا همچنین در این مدل خاک به صورت تک لایه تعریف و استفاده شده است.

باید توجه داشت که هر نوع مطالعه ممکن است مدل خاص خود را نیاز داشته باشد. وقتی هدف پیش‌بینی رشد و تولید گونه‌های گیاهی در کشوری پهناور باشد، یک مدل ساده مناسب‌تر خواهد بود، چون پارامتریابی آن ساده‌تر بوده و برای پیش‌بینی به ورودی‌های ساده‌تر و در دسترس نیاز خواهد داشت. مدل SSM-iCrop چنین مدلی است. نتایج ارزیابی مدل با کمک داده‌های واقعی که از سطح کشور جمع‌آوری شده بود، نشان داد که عملکرد مدل رضایت‌بخش است.

### References

- Amir, J., and Sinclair, T.R., 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28: 59–69. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90074-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90074-6).
- Amiri, E., Khorsand, A., Daneshian, J., and Yousefi, M., 2018. Predicting biomass and grain yield in canola under different water regimes and fertilizers using AquaCrop model. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 41(1): 57-72. (In Persian with English Summary)
- Arvaneh, H., and Abbasi, F., 2014. Validation and calibration of the model aqua crop for *Brassica napus* in field conditions. *Journal of Iran Water Research* 14: 9-17. (In Persian with English Summary)
- FAO and DWFI., 2015. Yield gap analysis of field crops— Methods and Case Studies, by Sadras, V.O., Cassman, K.G.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaanssen, W.G.M., Laborde, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G., Steduto, P. FAO Water Reports No. 41, Rome, Italy.
- FAOSTST., 2014, Available in <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> [15 June 2014].
- Geerts, S., and Raes, D., 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry

زمینی (Vadez et al., 2017) و ذرت (Sinclair & Muchow, 2011; Torabi et al., 1999) استفاده شده است. تعداد پارامترها در مدل SSM-iCrop خیلی کمتر از مدل‌های DSSAT (Hoogenboom et al., 2019) و APSIM (Keating et al., 2010; Hammer et al., 2003) می‌باشد، ولی با تعداد پارامتر در مدل CropSyse (Stockle et al., 2003) قابل قیاس است. سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2015) به منظور شبیه‌سازی رشد، توسعه و عملکرد گندم، در مطالعه‌ای اقدام به مقایسه چهار مدل گندم با توجه به قدرت و شفافیت مدل‌ها نمودند. در میان چهار مدل مورد آزمایش، دو مدل ساده (Stockle et al., 2003) و CropSyst (Amir & Sinclair, 1991; Soltani & Sinclair, 2013) و دو مدل پیچیده‌تر APSIM (Jones et al., 2003; DSSAT (Keating et al., 2003) و Hoogenboom et al., 2012) مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاکی از تفاوت معنی‌دار در قدرت مدل‌ها بود. در تمام متغیرهای ارزیابی شده مدل SSM و CropSys دارای CV پایین و ضریب همبستگی بالاتر نسبت به مدل‌های APSIM و DSSAT بودند و به طور کلی، در این آزمون دو مدل ساده قوی‌تر از دو مدل پیچیده‌تر بودند. در مورد صفت عملکرد دانه مدل SSM بهترین نتایج را حاصل نمود. ایشان همچنین نشان دادند که بین تعداد پارامتر در مدل برای فرایندهای مختلف و کارکرد مدل ارتباط معنی‌داری وجود ندارد. باید توجه داشت که کم بودن تعداد پارامترها دارای دو جنبه است (Soltani, 2009). گاهی یک مدل در مقایسه با دیگری پارامتر کمتری دارد و تعداد فرآیند و واکنش کمتری را هم شبیه‌سازی می‌کند. اما، گاهی برای شبیه‌سازی فرآیند معینی (مثل تولید ماده خشک) دو مدل دارای تعداد پارامتر متفاوت هستند. در مدل SSM جنبه دوم صادق است. بسیاری از مدل‌های نیمه‌تجربی ابزار مناسبی برای ارزیابی عملکرد گیاهان مختلف در مناطق مختلف جغرافیایی نیستند. اما مدل

areas. *Agricultural Water Management* 96: 1275-1284.

Ghanem, M.E., Marrou, H., Biradar, C., and Sinclair, T.R., 2015. Production potential of lentil (*Lens culinaris* Medik.) in East Africa. *Agricultural Systems* 137: 24–38.

Hajjarpoor, A., Vadez, V., Soltani, A., Gaur, P., Whitbread, A., Babu, D.S., Gumma, M.K., Diancoumba, M., and Kholová, J., 2018. Characterization of the main chickpea cropping systems in India using a yield gap analysis approach. *Field Crops Research* 223: 93–104.

Hammer, G.L., Van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S.C., Broad, I., Harland, P., and Muchow, R.C., 2010. Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany* 61: 2185–2202.

Honar, T., Sarverestani, A., Kamgarhaghighy, A.A., and Shams, S., 2012. CropSyst calibration model to predict performance and simulation of plant growth. *Journal of Soil and Water (Agricultural Science and Technology)* 25(3): 593-605. (In Persian with English Summary)

Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijssman, A.J., Tsuji, G.Y., and Koo, J., 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii (CD-ROM).

Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.L., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L.P., and Jones, J.W., 2019. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.

Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101: 448–459.

Jamieson, P.D., and Semenov, M.A., 2000. Modelling nitrogen uptake and redistribution in wheat. *Field Crops Research* 68: 21–29.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J., and Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235–265.

Keating, B.A., Asseng, S., Brown, S.D., Carberry, P.S., Chapman, S., Dimes, J.P., Freebairn, D.M., Hammer, G.L., Hargreaves, J.N.G., Hochman, Z., Holzworth, D., Huth, N.I., Meinke, H., McCown, R.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Silburn, M., Smith, C.J., Snow, V.O., Verburg, K., and Wang, E., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18: 267–288.

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., and Hochman, Z., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18: 267–288.

Kiniry, J.R., Blanchet, R., Williams, J.R., Texier, V., and Jones, C.A., 1992. Sunflower simulation using the EPIC and A LM A N A C models. *Field Crops Research* 30: 403–423.

Koo, J., and Dimes, J., 2010. HC27 Generic Soil Profile Database. Version 1, July. International Food Policy Research Institute, Washington, DC.

Laurance, W.F., Sayer, J., and Cassman, K.G., 2014. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology and Evolution* 29: 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>.

Marrou, H., Sinclair, T.R., and Metral, R., 2014. Assessment of irrigation scenarios to improve performances of lingot bean (*Phaseolus vulgaris*) in southwest France. *European Journal of Agronomy* 59: 22–28.

Mousavizadeh, S.F., Honar, T., and Ahmadi, S.H., 2016. Assessment of the aquacrop model for simulating canola under different irrigation management in a semiarid area. *International Journal of Plant Production* 10(4): 1735-6814.

Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S. and Rajabi, R., 2015. Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research (JOPPR)* 22(3): 1-26. (In Persian with English Summary)

Noorhosseini, S., Soltani, A., and Ajamnoroozi, H., 2018. Simulating peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and yield with the use of the Simple Simulation Model (SSM). *Computers and Electronics in Agriculture* 145: 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.020>

Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using largescale parameters. *Monthly Weather Review* 100: 81-92.

Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D., and Bowen, W., 1998. Cereal growth, development and yield. In *Understanding*

options for agricultural production 79-98. Springer, Dordrecht.

Robertson, M.J., Carberry, P.S., Huth, N.I., Turpin, J.E., Probert, M.E., Poulton, P.L., Bell, M., Wright, G.C., Yeates, S.J., and Brinsmead, R.B., 2002. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Crop Science* 53: 429-446.

Sinclair, T., Farias, J., Neumaier, N., and Nepomuceno, A., 2003. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. *Field Crops Research* 81: 149-158.

Sinclair, T.R., and Muchow, R.C., 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65: 215-265.

Sinclair, T.R., Marrou, H., Soltani, A., Vadez, V., and Chandolu, K.C., 2014. Soybean production potential in Africa. *Global Food Security* 3: 31-40.

Soltani, A., 2009. Mathematical modeling of the crop. Publication Mashhad University Jihad, Iran p. 175. (In Persian)

Soltani, A., 2015. All About Importing Iranian Edible Oils. <http://aftabeyazd.ir/6631>.

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research* 124: 252-260.

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2012. Identifying plant traits to increase chickpea yield in water-limited environments. *Field Crops Research* 133: 186-196. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2012.04.006>

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2012. Modeling Physiology of Crop Development, Growth, and Yield. CABI Publication, 322 pp.

Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research* 175: 37-46.

Soltani, A., and Torabi, B., 2009. Mathematical Modeling in Field Crop. Jihad Daneshgahi Mashhad Press, Iran. (In Persian)

Soltani, A., Ghassemi-Golezani, K., Khoosheh, F.R., and Moghaddam, M., 1999. A simple model for chickpea growth and yield. *Field Crops Research* 62: 213-224.

Soltani, A., Hajjarpour, A., and Vadez, V., 2016. Analysis of chickpea yield gap and water-limited potential yield in Iran. *Field Crops Research* 185: 21-30.

Soltani, A., Maddah, V., and Sinclair, T.R., 2013. SSM-Wheat: a simulation model for wheat development, growth, and yield. *International Journal of Plant Production* 7: 711-740.

Soltani, A., and Sinclair T.R., 2011. A simple model for chickpea development, growth, and yield. *Field Crops Research* 124: 252-260.

Stockle, C.O., Donatelli, M., and Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.

Tanner, C.B., and Sinclair, T.R., 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor, H. M., Jordan, W. R., and Sinclair, T. R. (Eds.) *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 1-27.

Torabi, B., Soltani, A., Galeshi, S., and Zeinali, E., 2011. Assessment of yield gap due to nitrogen management in wheat. *Australian Journal of Crop Science* 5: 879-884.

Vadez, V., Halilou, O., Hissene, H.M., Sibiry-Traore, P., Sinclair, T.R., and Soltani, A., 2017. Mapping water stress incidence and intensity, optimal plant populations, and cultivar duration for African groundnut productivity enhancement. *Frontiers In Plant Science* 8: 432.

Vadez, V., Soltani, A., and Sinclair, T.R., 2013. Crop simulation analysis of phenological adaptation of chickpea to different latitudes of India. *Field Crops Research* 146: 1-9.

Van Ittersum, M., Leffelaar, P., van Keulen, H., Kropff, M., Bastiaans, L., and Goudriaan, J., 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5)

Yang, C., Gan, Y., Harker, K.N., Kutcher, H.R., Gulden, R., Irvine, B., and May, W.E., 2014. Up to 32 % yield increase with optimized spatial patterns of canola plant establishment in western Canada. *Agronomy for Sustainable Development* 34(4): 793-801.



## Using SSM-iCrop Model to Predict Phenology, Yield, and Water Productivity of Canola (*Brassica napus* L.) in Iran Condition

S. Rahban<sup>1</sup>, B. Torabi<sup>2\*</sup>, A. Soltani<sup>3</sup> and E. Zeinali<sup>4</sup>

Submitted: 03-11-2019

Accepted: 16-02-2020

Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., and Zeinali, E., 2021. Using SSM-iCrop model to predict phenology, yield and water productivity of canola (*Brassica napus* L.) in Iran condition. Journal of Agroecology 13(1):157-177

### Introduction

Due to limitation of water and soil resources resulted from geological and climatic conditions of Iran as well as necessity of self-reliance in infrastructural issues, efficient usage of water and soil resources available in Iran is inevitable. Climatic changes, reduced biodiversity in the region and concerns about food security are regarded as important issues; hence, evaluation of conditions to attain improved crop production seems essential. To investigate yield improvement methods, yield potential and yield limiting factors (climate, soil, water, and genetic factors) should be determined and evaluated in the first step. Simulation models may be used as scaled-up designs of field experiments to overcome limitations such as time and costs. Crop simulation models are mathematical representations of plant growth processes as influenced by interactions among genotype, environment and crop management. Using crop simulation models can be an efficient complement to experimental research. Models are being used to understand the response of crops to possible changes in crop, cultural management, and environmental variables. Crop models use various plant and environmental parameters to simulate crop growth and should be calibrated and evaluated before usage.

### Materials and Methods

SSM-iCrop model predicts phenological stages as a function of temperature, day length. Calculation of phenological development in the model is based on the biological day concept. A biological day is a day with optimal temperature, photoperiod, and moisture conditions for plant development. Leaf area development and senescence is a function of temperature, provide nitrogen for leaf growth, plant density and nitrogen remobilization. To simulate leaf area expansion, the first step is to determine on each day the increase in leaf number on the main stem using the phyllochron (temperature unit between emergences of successive leaves) concept. In this model biomass is estimated as a function of the received radiation and temperature. Daily increase of crop mass is estimated as the product of incident photosynthetic active radiation (PAR, MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>), the fraction of that radiation

intercepted by the crop (FINT) and efficiency with which the intercepted PAR is used to produce crop dry mass, i.e., radiation use efficiency (RUE, g MJ<sup>-1</sup>). Yield formation in the model is simply simulated as total dry matter production during seed filling period plus a fraction of crop dry mass at BSG (as mobilized dry

1- Ph.D. Student, Ph.D. Student, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

2- Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran.

3- Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran.

4- Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran.

(\* Corresponding author: ben\_torabi@yahoo.com)

Doi: 10.22067/jag.v13i2.84057

matter). Modeling seed growth rate and yield formation in the current model is based on a modified linear increase in harvest index concept as described by Soltani and Sinclair (2011).

The model needs daily weather data, i.e. maximum and minimum temperatures, rainfall, and solar radiation. The model can be run under multiple scenarios/treatments over many years.

#### **Results**

As a result of the SSM-iCrop model parameterization, three early, medium and late maturing cultivars were determined for canola, which their cumulative degree days (GDD) for growth period completion were estimated as 2000, 2500 and 2700 °C days. After determination of the required parameters, the model was run based on sowing date, management, and meteorological statistics of the region using the data from the papers which were not used for parameterization, so as to validate the model. The average of the simulated data for days to maturity and yield were 222 (days) and 383 (g.m<sup>-2</sup>), respectively, whereas observed values for this traits were 223 (days) and 359 (g.m<sup>-2</sup>).

#### **Conclusion:**

Based on the 1:1 line and statistics of  $r=0.87$ ,  $CV=18\%$  and  $RMSE=67.04$  (g.m<sup>-2</sup>) for grain yield and  $r=0.97$ ,  $CV=5\%$  and  $RMSE=10.68$  (days) for days to maturity, it may be concluded that simulation canola growth using SSM-iCrop model has been satisfactory and indicates accurate estimation of the model parameters, as well as serving as a verification of the model efficiency in prediction of canola yield under climatic conditions of major canola production regions of Iran.

**Keywords:** Evaluation, Parameterization, Plant models, Simulation.