

## پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد پنبه در ایران شبیه‌سازی رشد و عملکرد پنبه با استفاده از مدل SSM-iCrop2

حسین کمری<sup>۱\*</sup>، ابراهیم زینلی<sup>۲</sup>، افشین سلطانی<sup>۲</sup>، فرشید قادری‌فر<sup>۴</sup>  
<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
<sup>۲</sup>دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
<sup>۳</sup>استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
<sup>۴</sup>دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۰

### چکیده

سابقه و هدف: پنبه مهم‌ترین منبع الیاف طبیعی در جهان و ایران به شمار می‌رود. سطح زیر کشت پنبه در ایران حدود ۸۰ هزار هکتار است. استان‌های خراسان‌رضوی، فارس، خراسان جنوبی، گلستان، خراسان شمالی، سمنان و اصفهان واقع در شمال شرق و مرکز کشور مناطق اصلی تولید پنبه در ایران هستند. هدف از این مطالعه پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه پنبه در مناطق و شرایط محیطی مختلف کشت پنبه در ایران است.

مواد و روش‌ها: جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه در مدل SSM-iCrop2 به صورت زیربرنامه‌هایی شامل نمو فنولوژیک، تغییرات سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و تشکیل عملکرد سازماندهی شده‌اند. زیر برنامه موازنه آب خاک نیز برای شبیه‌سازی تغییرات آب خاک و تعیین شدت تنش در مدل گنجانده شده است. مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و به اطلاعات مربوط به هوا (دمای حداکثر، دمای حداقل، تابش و بارش)، خاک (آلبدوی خاک، فاکتور زه‌کشی و شماره منحنی خاک) و مدیریت زراعی (تاریخ کاشت، تراکم) نیاز دارد. جهت پارامتریابی مدل از داده‌های ۸ آزمایش انجام شده طی ۷ سال در نقاط مختلف کشور استفاده شد. سپس برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل از یک سری دیگر از داده‌های آزمایشی (۱۳ آزمایش) که طی ۸ سال انجام شده بودن استفاده گردید. در این مطالعه برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)،



عوامل این اختلاف و راهکارهای مناسب برای به حداقل رساندن آن، از مهم ترین چالش‌ها در امنیت غذایی کشور می‌باشد.

امروزه مدل‌های متفاوتی برای برآورد عملکرد پتانسیل، براساس روش‌های مختلف محاسبه، از قبیل محاسبه ماده خشک خالص، فتوسنتز و تبخیر و تعرق توسعه داده شده‌اند. از میان این مدل‌ها می‌توان به مدل فائو یا مدل پتانسیل حرارتی-تابشی تولید (سیس و همکاران، ۱۹۸۵)، مدل WOFOST (دپین و همکاران، ۱۹۸۹)، مدل DSSAT (جونز و همکاران، ۲۰۰۳)، مدل EPIC (ویلیامز و همکاران، ۱۹۸۹) و مدل AquaCrop (ریس و همکاران، ۲۰۰۹) اشاره کرد. برای پیش‌بینی رشد و نمو گیاه راهبردی پنبه مدل‌های مختلفی از قبیل GOSSYM (بیکر و همکاران، ۱۹۸۳)، OZCOT (هرن، ۱۹۹۴) و COTCROP (برون و همکاران، ۱۹۸۵) ارائه شده است.

کو و همکاران (۲۰۰۹) مدل EPIC را برای شبیه‌سازی رشد پنبه در جنوب تگزاس پارامتریابی کردند. در مطالعه آن‌ها مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده برابر ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار ضریب تبیین ( $r^2$ ) برابر ۸۶ درصد به دست آمد. فراهانی و همکاران (۲۰۰۹) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی رشد پنبه واسنجی نمودند. در این مطالعه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده برابر ۱۳۰ کیلوگرم در هکتار و مقدار ضریب تبیین ( $r^2$ ) برابر ۹۸ درصد به دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر تان و همکاران (۲۰۱۸) عملکرد مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی رشد پنبه در جنوب سین کیانگ چین مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ به ترتیب برابر ۶۴۴ و ۱۳۱۹ کیلوگرم در هکتار و مقدار ضریب تبیین ( $r^2$ ) به ترتیب برابر ۹۶ و ۸۵ درصد به دست آمد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۸) مدل SUCROS Cotton را برای شبیه‌سازی رشد پنبه اعتبارسنجی نمودند. در این بررسی مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده در مقابل روز تا رسیدگی مشاهده شده برابر ۴/۲ روز و مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای عملکرد پنبه شبیه‌سازی شده در مقابل عملکرد مشاهده شده برابر ۳۱۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد.

علاوه بر مدل‌های یاد شده مدل دیگری به نام SSM-iCrop2 توسط سلطانی و همکاران (۲۰۱۳) برای شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است. این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک (سبز شدن، شروع مؤثر پر شدن دانه، پایان مؤثر پر شدن دانه، شروع پیر شدن برگ و رسیدگی)، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد. این مدل دارای کد باز بوده و چون دارای ساختار ساده است برای اهداف آموزشی نیز قابل استفاده است. از آن جایی که مدل از صفحه گسترده اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌کند کار با آن ساده است. از

این مدل می‌توان در موارد متعددی نظیر کاربردهای تحقیقاتی، مدیریت زراعی و آموزشی استفاده نمود (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۳). تاکنون مدل SSM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان مختلف مثل سویا (رسام و سلطانی ۲۰۱۴)، نخود (سلطانی و سینکлер، ۲۰۱۱)، بادام زمینی (نورحسینی و همکاران، ۲۰۱۸) و سیب‌زمینی (دادرسی و همکاران، ۲۰۲۰) پارامتریابی و ارزیابی شده است. برای استفاده از مدل SSM-iCrop2 نیاز به پارامتریابی و ارزیابی مدل برای گیاه مورد نظر است. بنابراین هدف از این مطالعه پارامتریابی مدل SSM-iCrop2 برای گیاه پنبه و ارزیابی این مدل (قیاس نتایج اجرا کردن مدل با آزمایش‌های صورت گرفته در مناطق مختلف سطح زیر کشت پنبه در ایران) است.

### مواد و روش‌ها

ساختار مدل: زیرمدل iCrop2 برگرفته از مدل اصلی SSM می‌باشد (سلطانی و همکاران، ۲۰۲۰). این مدل در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان توسط سلطانی و همکاران (۲۰۱۳) طراحی و ساخته شده است. در این مدل مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت (مانند آبیاری) و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۳). مدل شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد و از اطلاعات قابل دسترس آب و هوا و خاک استفاده می‌کند (سلطانی و سینکлер، ۲۰۱۱). لازم به ذکر است که این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز را بر روی گیاه در نظر نمی‌گیرد. ورودی‌های مورد نیاز مدل در جدول ۱ خلاصه شده است. مهم‌ترین فرآیندهایی که در مدل باید شبیه‌سازی شوند عبارتند از فنولوژی گیاه، تغییرات سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک و موازنه آب خاک.

جدول ۱- ورودی‌های مورد نیاز مدل iCrop2 (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۳)

متغیر (مخفف)	واحد
پارامترهای گیاهی	-
فنولوژی	-
شاخص سطح برگ	-
پارامترهای مدیریتی	-
تاریخ کاشت (PDOY)	Day of year (beginning from January 1 <sup>st</sup> )
تراکم بوته (DEN)	(Plant per m <sup>2</sup> )
رطوبت خاک در زمان کاشت (ISW)	(mm)
کسر آب قابل تعرق خاک برای انجام آبیاری (IRGLVL)	-
پارامترهای خاک	-

-	آلبیدوی خاک (SLAB)
(mm.mm <sup>-1</sup> )	فاکتور زهکشی (DRAINF)
(Cm water.cm soil <sup>-1</sup> )	کسر حجمی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (IDUL)
(Cm water.cm soil <sup>-1</sup> )	کسر حجمی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی (ILL)
(Cm water.cm soil <sup>-1</sup> )	کسر حجمی رطوبت در نقطه اشباع (ISAT)
-	شماره منحنی خاک (CN)
	پارامترهای هواشناسی
(°C)	حداکثر دمای روزانه (TMAX)
(°C)	حداقل دمای روزانه (TMIN)
(MJ.m <sup>2</sup> .day <sup>-1</sup> )	تابش خورشیدی روزانه (SRAD)
(mm)	بارندگی روزانه (RAIN)
(ppm)	غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر (CO <sup>2</sup> )
-	ضریب محاسبه کمبود فشار بخار (VPDF)

**فنولوژی:** پیش‌بینی دقیق فنولوژی گیاهان زراعی از ویژگی‌های ضروری مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی به شمار می‌رود. تولید و تسهیم ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی به وسیله زمان‌بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (سینکلر و همکاران، ۱۹۹۱؛ سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۱). فنولوژی براساس مفهوم واحد دمایی تعدیل شده و بر اساس مقدار رطوبت خاک پیش‌بینی می‌شود (سلطانی و همکاران، ۱۹۹۹؛ سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۱). مدل مراحل سبز شدن، شروع موثر پر شدن دانه‌ها (در غوزه پنبه)، پایان موثر پر شدن دانه‌ها (در غوزه پنبه)، شروع پیر شدن برگ‌ها و رسیدگی را پیش‌بینی می‌کند. مدل، واکنش سرعت نسبی نمو در گیاه به میانگین دمای روزانه را با استفاده از یک تابع دندان مانند توصیف می‌کند. بر اساس تابع دندان مانند سرعت نمو در یک دمای معین و کمتر از آن صفر می‌باشد که این دما، دمای پایه نامیده می‌شود. با افزایش دما نسبت به دمای پایه، سرعت نمو نیز افزایش می‌یابد و در دمایی به نام دمای مطلوب حداقل، به حداکثر می‌رسد. با افزایش دما نسبت به دمای مطلوب تحتانی تا رسیدن به دمای مطلوب فوقانی، سرعت نمو در حداکثر مقدار خود باقی می‌ماند. با افزایش دما نسبت به دمای مطلوب فوقانی، سرعت نمو مجدداً کاهش می‌یابد تا این که در دمایی موسوم به دمای سقف به صفر می‌رسد. سرعت نمو در دمای بالاتر از دمای سقف نیز صفر می‌باشد.

بر اساس توضیحات ارائه شده مقدار واحد دمایی روزانه با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شود:

$$DTU=(TP1D-TBD)\times f(T) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$TU=\sum DTU \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در روابط ۱ و ۲، DTU: واحد دمایی روزانه؛ TP1D: دمای مطلوب تحتانی برای گیاه؛ TBD: دمای پایه برای گیاه؛  $f(T)$ : سرعت نمو نسبی با توجه به دمای روزانه؛ TU: واحد دمایی تجمعی. گیاهان برای رسیدن به هر یک از مراحل (سبز شدن، شروع موثر پر شدن دانه‌ها، پایان موثر پر شدن دانه‌ها، شروع پیر شدن برگ‌ها و رسیدگی) نیاز به مقادیر مشخصی از واحد دمایی تجمعی دارند که این مقادیر به عنوان پارامترهای ورودی زیرمدل iCrop2 جهت مدل سازی مراحل فنولوژیک گیاهان محسوب می‌شوند. با محاسبه واحد دمایی روزانه از طریق رابطه ۱ و جمع این اعداد از زمان کاشت با استفاده از رابطه ۲، می‌توان زمان وقوع هر یک از مراحل فنولوژیک گیاه را پیش‌بینی کرد. در این مطالعه، متغیرهای فنولوژیک مدل پنبه و تخمین آن‌ها برای پیش‌بینی مدت زمان کاشت تا مراحل مختلف نمو با استفاده از رابطه (۱) برای سه رقم (زودرس، متوسط‌رس و دیررس) در (جدول ۲) نشان داده شده است. سپس مرحله نمو نرمال شده (NGS) که یک متغیر بدون بعد است و مقدار آن در کاشت صفر و در رسیدگی برداشت ۱ می‌باشد با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\text{NGS} = \text{CGDD} / \text{GDDM} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن GDDM واحد دمایی مورد نیاز از کاشت تا رسیدگی برداشت برای رقم‌های زودرس، متوسط رس و دیررس به ترتیب (۱۳۰۰، ۱۶۰۰ و ۲۱۰۰ درجه روز رشد) و CGDD واحد دمایی تجمعی برای مرحله نموی مورد نظر می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای SSM مشاهده شده برای فنولوژی پنبه (سلطانی، ۲۰۰۹)

مقدار	مخفف	پارامتر (واحد)	فنولوژی
۱۲	TBD		دمای پایه نمو ( $^{\circ}\text{C}$ )
۳۰	TP1D		دمای بهینه تحتانی نمو ( $^{\circ}\text{C}$ )
۳۰	TP2D		دمای بهینه فوقانی نمو ( $^{\circ}\text{C}$ )
۴۵	TCD		دمای سقف نمو ( $^{\circ}\text{C}$ )
۱۳۰۰-۱۶۰۰-۲۱۰۰	tuHAR		واحد دمایی لازم برای برداشت یا ریزش برگ ( $^{\circ}\text{C}$ )
۶۸-۸۴-۱۱۰	tuEMR		واحد دمایی لازم برای سبز شدن یا شروع رشد برگ ( $^{\circ}\text{C}$ )
۶۸۱-۸۳۹-۱۱۰۱	tuBSG		واحد دمایی لازم برای شروع رشد بذر یا میوه ( $^{\circ}\text{C}$ )
۱۱۰۵-۱۳۶۰-۱۷۸۵	tuTSG		واحد دمایی لازم برای پایان رشد بذر یا میوه ( $^{\circ}\text{C}$ )
۱۱۰۵-۱۳۶۰-۱۷۸۵	tuPM		واحد دمایی لازم برای رسیدگی فیزیولوژیکی (پایان تجمع ماده خشک) ( $^{\circ}\text{C}$ )

**تغییرات سطح برگ:** محاسبه‌های مربوط به سطح برگ با روشی مشابه با مدل EPIC انجام گرفت (ویلیامز و همکاران، ۱۹۸۹) که در مدل SBEET (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۵) به کار گرفته شده بود.

در این روش میزان شاخص سطح برگ در هر روز از کاشت تا برداشت از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$LAI = RLAI \times LAIMAX \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن،  $LAI$ : شاخص سطح برگ،  $LAIMAX$ : حداکثر شاخص سطح برگ و  $RLAI$ : نسبت  $LAI$  موجود به حداکثر  $LAI$  قابل حصول توسط گیاه می‌باشد. مقدار  $RLAI$  از طریق رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

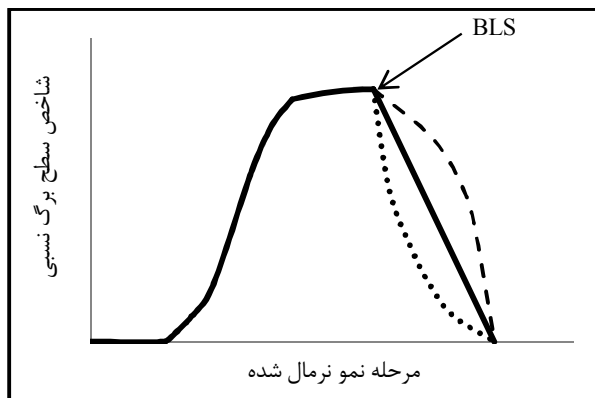
(رابطه ۵):

$$RLAI = (NGS / (NGS + EXP((a+b) \times NGS)))^{SRAT} \quad \text{اگر } NGS < BLS$$

$$RLAI = BSGLAI \times ((1-NGS) / (1-BLS))^{SRAT} \quad \text{اگر } NGS \geq BLS$$

که در آن،  $BLS$ : مرحله نموی نرمال شده در شروع پرشدن غوزه پنبه است که در آن حداکثر شاخص سطح برگ ( $BSGLAI$ ) به دست می‌آید و بعد از آن کاهش  $LAI$  شروع می‌شود (شکل ۱). در این مدل مقدار  $BLS$  برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شد (سلطانی، ۲۰۰۹).  $a$  و  $b$  ضرایب معادله هستند و با در دست بودن دو نقطه  $(X1, Y1)$  و  $(X2, Y2)$  و از طریق حل هم‌زمان رابطه بالا برای آن دو نقطه به دست می‌آید. در این مدل مقدار  $(X1, Y1)$  و  $(X2, Y2)$  به ترتیب معادل  $(۰/۱۵, ۰/۰۵)$  و  $(۰/۵, ۰/۹۵)$  منظور گردید (سلطانی، ۲۰۰۹). مقدار  $(X1, Y1)$  به این مفهوم است که پس از طی شدن ۱۵ درصد واحد دمایی از کاشت تا برداشت  $LAI$  به ۵ درصد حداکثر خود می‌رسد و  $(X2, Y2)$  نشان می‌دهد که  $LAI$  با سپری شدن ۵۰ درصد واحد دمایی به ۹۵ درصد حداکثر خود می‌رسد (سلطانی، ۲۰۰۹).

در برخی از گیاهان پیر شدن برگ به صورت خطی اتفاق نمی‌افتد. ممکن است پیر شدن بسیار سریع یا به کندی رخ دهد. در زیرمدل iCrop2 برای حل این مشکل از پارامتری به نام SRATE استفاده شده است (شکل ۱). در این مطالعه میزان SRATE برای پنبه ۱ در نظر گرفته شد. متغیرهای مربوط به سطح برگ و تخمین آن‌ها در (جدول ۳) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ای از روند پیر شدن سطح برگ در مقابل مرحله نمو؛ خط نقطه‌چین: زمانی که مقدار پارامتر SRATE بزرگتر از ۱ است؛ خط ممتد: زمانی که مقدار پارامتر SRATE مساوی ۱ است؛ خط چین: زمانی که مقدار پارامتر SRATE کوچکتر از ۱ است (سلطانی، ۲۰۰۹)

جدول ۳- پارامترهای SSM مشاهده شده برای تغییرات سطح برگ پنبه (سلطانی، ۲۰۰۹؛ سلطانی و سینکلی، ۲۰۱۲)

مقدار	مخفف	پارامتر (واحد)
		پیری و توسعه سطح برگ
(۰/۱۵، ۰/۰۵)	x1, y1	نقطه شماره ۱ برای سطح برگ نرمال در مقابل واحد دمایی نرمال
(۰/۵، ۰/۹۵)	x2, y2	نقطه شماره ۲ برای سطح برگ نرمال در مقابل واحد دمایی نرمال
۳/۵	LAIMX	شاخص سطح برگ حداکثر
۱۲۳۵-۱۵۲۰-۱۹۹۵	tuBLS	واحد دمایی برای شروع پیری برگ (°C)
۱	SRATE	ضریب سرعت پیر شدن برگ‌ها
۸	FrzTh	آستانه انجماد برای مرگ برگ (دمای پایین) (°C)
۰/۰۱	FrzLDR	مرگ برگ نسبی به ازای هر درجه کاهش دما زیر دمای پایین (آستانه انجماد)
۳۷	HeatTH	دمای آستانه گرما برای پیر شدن برگ‌ها (°C)
۰/۱	HtLDR	افزایش نسبی سرعت پیری برگ به ازای هر درجه افزایش دما از دمای آستانه گرما (°C)

**تولید و توزیع ماده خشک:** در مدل مورد استفاده، تولید ماده خشک با روش ساده مبتنی بر کارایی استفاده از تابش (RUE<sup>۱</sup>) برآورد شد. مقدار PAR دریافت شده در هر روز (FINT) از شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (K برای PAR) براساس قانون بیر- بوگر- لامبرت در مدل محاسبه می‌شود (سینکلی، ۲۰۰۶). مقدار ماده خشک تولید شده در هر روز (DBP) از حاصل ضرب PAR دریافت شده،

## 1. Radiation use efficiency



کسری از تابش رسیده که به وسیله جامعه گیاهی دریافت می‌شود ( $FINT$ ، بدون واحد) و  $RUE$  به دست می‌آید:

$$DBP = PAR \times FINT \times RUE \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$PAR = SRAD \times 0.5 \quad (\text{رابطه ۷})$$

مقدار ۰/۵ به‌عنوان ضریبی برای تبدیل کل تشعشع خورشیدی ( $SRAD$ ) به تشعشع فعال فتوسنتزی ( $PAR$ ) در رابطه بالا منظور شده است. کسر تشعشع دریافت شده ( $FINT$ ) به‌صورت تابع نمایی از  $LAI$  و ضریب استهلاک نور ( $K_{PAR}$ ) مطابق رابطه زیر به دست می‌آید (مانسی و سایکی به نقل از راسل و همکاران، ۱۹۸۹):

$$FINT = 1 - \exp(-K_{PAR} \times LAI) \quad (\text{رابطه ۸})$$

مقدار  $K_{PAR}$  برای پنبه برابر ۰/۶ می‌باشد (سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۲). مقدار  $LAI$  در رابطه بالا توسط رابطه ۴ به دست می‌آید. مدل مقدار  $RUE$  در هر روز را از  $RUE$  در شرایط مطلوب ( $IRUE$ ) و فاکتور تصحیح  $RUE$  برای دما ( $TCFRUE$ ) محاسبه می‌نماید:

$$RUE = IRUE \times TCFRUE \quad (\text{رابطه ۹})$$

اگرچه  $RUE$  تحت شرایط مطلوب رشد ثابت بوده ولی دماهای نامناسب می‌توانند موجب کاهش آن شوند (سلطانی، ۲۰۰۹). به همین دلیل مقدار  $RUE$  براساس دمای روزانه تعدیل می‌شود. فاکتور تصحیح  $RUE$  برای دما ( $TCFRUE$ ) در مدل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$TCFRUE = 0$	IF	$TMP \leq TBRUE$
$TCFRUE = (TMP - TBRUE) / (TP1RUE - TBRUE)$	IF	$TBRUE < TMP < TP1RUE$
$TCFRUE = 1$	IF	$TP1RUE \leq TMP \leq TP2RUE$
$TCFRUE = (TCRUE - TMP) / (TCRUE - TP2RUE)$	IF	$TP2RUE < TMP < TCRUE$
$TCFRUE = 0$	IF	$TMP \geq TCRUE$

$TCFRUE$  بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند و در واقع این فاکتور مقدار  $RUE$  در هر دمایی را نسبت به دمای مطلوب نشان می‌دهد.  $TBRUE$ ،  $TP1RUE$ ،  $TP2RUE$  و  $TCRUE$  دماهای کاردینال برای  $RUE$  هستند و به ترتیب دمای پایه، دمای مطلوب تحتانی، دمای مطلوب فوقانی و دمای سقف را نشان می‌دهند. مقادیر متغیرهای مربوط به  $RUE$  و  $K$  در (جدول ۴) آورده شده است.

جدول ۴- پارامترهای SSM مشاهده شده برای تولید و توزیع ماده خشک پنبه (سلطانی، ۲۰۰۹؛ سلطانی و سینکیر، ۲۰۱۲)

مقدار	مخفف	پارامتر (واحد)
		تجمع ماده خشک
۱۰	TBRUE	دمای پایه برای تولید ماده خشک (°C)
۲۰	TP1RUE	دمای بهینه تحتانی برای تولید ماده خشک (°C)
۴۰	TP2RUE	دمای بهینه فوقانی برای تولید ماده خشک (°C)
۵۰	TCRUE	دمای سقف برای تولید ماده خشک (°C)
۰/۶	KPAR	ضریب خاموشی برای تشعشع فعال فتوسنتزی
۱/۷	IRUE	کارایی استفاده از تشعشع در شرایط رشد بهینه (g MJ <sup>-1</sup> )
۰/۸	C3C4	ضریب برای واکنش کارایی استفاده از تشعشع به غلظت CO <sub>2</sub>

**موازنه آب خاک در زیرمدل iCrop2:** مقدار آب قابل دسترس برای گیاه تحت تاثیر عمق ریشه و به تبع آن حجم خاکی است که ریشه در طول فصل رشد به آن دسترسی دارد. در زیرمدل iCrop2 برای انجام محاسبات موازنه آب خاک، خاک به صورت 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 موثر استخراج آب<sup>۱</sup> است. عمق لایه دوم با شروع رشد ریشه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد. 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 (سلطانی و سینکیر، ۲۰۱۱). در زیرمدل iCrop2 مقدار آب قابل دسترس برای گیاه و کسر آب قابل تعرق روزانه برای گیاه از روابط ۱۱ تا ۱۴ به دست می‌آید:

$$ESW_i = ESW_{i-1} + I - ES - TRI - D \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$ATSW_i = ATSW_i + I + EWAT - ES - TR - D \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$FTSW_i = ATSW_i / TTSW \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$TTSW = DEPORT \times EXTR \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

در روابط ۱۱ تا ۱۴،  $ESW$ : 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؛  $TRI$ : مقدار آب تعرق یافته که از لایه اول جذب شده

1. Effective extraction depth

است؛  $D$ : مقدار زهکشی؛  $EWAT$ : مقدار آبی که در اثر افزایش عمق موثر استخراج آب یعنی نفوذ ریشه به لایه‌های زیرین، قابل دسترس شده است؛  $TR$ : مقدار آب تعرق یافته؛  $TTSW$ : کل آب قابل تعرق خاک (بالقوه)؛  $DEPORT$ : عمق موثر استخراج آب؛  $EXTR$ : کسر حجمی آب قابل استخراج خاک که در خاک‌های زراعی عموماً برابر  $0.13$  متر بر متر می‌باشد (سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۲). به جز  $FTSW$  که فاقد واحد است، سایر اجزای معادلات ۱۱ تا ۱۴ دارای واحد میلی‌متر هستند.

تنش کم آبی یکی از عواملی است که می‌تواند بر سرعت نمو و به دنبال آن تولید برگ و تجمع ماده خشک تاثیر گذارد. در زیر مدل  $iCrop2$  اثر تنش کم آبی با محاسبه تعدادی ضریب اصلاحی لحاظ می‌شود. ضرایب اصلاحی به کسر آب قابل دسترس خاک ( $FTSW$ ) ارتباط داده می‌شوند. آستانه  $FTSW$  برای نمو سطح برگ ( $WSSL$ )  $0.4$  و آستانه  $FTSW$  برای رشد ( $WSSG$ )  $0.3$  برای مدل در نظر گرفته شد (امیر و سینکلر، ۱۹۹۱). در مدل فرض می‌شود که تنش آب تأثیری بر زمان تا مراحل مختلف نموی در پنبه ندارد. اما این فاکتور در مدل گنجانده شده است تا بتوان در صورت نیاز در مطالعات از آن استفاده کرد. مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک ( $WSSD$ ) در مدل  $0.5$  در نظر گرفته شد. همچنین حداکثر عمق موثر استخراج آب ( $MEED$ )  $1000$  میلی‌متر و ضریب کارایی تعرق ( $TEC$ )  $5$  پاسکال در مدل قرار داده شد (سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۲). این پارامترها در (جدول ۵) نشان داده شده‌اند.

**تشکیل عملکرد:** رشد دانه در دوره‌ای از شروع رشد بذر ( $BSG$ ) تا پایان رشد بذر ( $TSG$ ) اتفاق می‌افتد و با استفاده از یک روش، مشابه روشی که برای مدل سیریوس گندم (جامیسون و همکاران، ۱۹۹۸) استفاده شد، محاسبه می‌شود. مدل‌سازی سرعت رشد دانه‌ها و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت توسط (سلطانی و سینکلر، ۲۰۱۲) شرح داده شده است.

سرعت رشد واقعی دانه به تولید ماده خشک روزانه و ماده خشک حاصل از انتقال مجدد<sup>۱</sup> ( $TRANSL$ ) محدود می‌شود. در مدل کل ماده خشک فراهم برای انتقال مجدد ( $TRLDM$ ) و رشد دانه از حاصل ضرب کسر ماده خشک تاج پوشش در شروع رشد دانه که قابل انتقال مجدد<sup>۲</sup> می‌باشد ( $FRTRL$ ) و مقدار ماده خشک تاج پوشش در شروع رشد دانه ( $BSGDM$ ) به دست می‌آید.

$$TRLDM = BSGDM \times FRTRL \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

طی پرشدن دانه، در هر روز که تولید ماده خشک روزانه کمتر از نیاز دانه‌ها (یعنی  $SGR$ ) باشد، مقدار کمبود از تفاضل سرعت رشد دانه اصلاح شده برای انرژی ماده خشک ( $SGR/GCF$ ) و مقدار ماده خشک تولیدی روزانه ( $DDMP$ ) به دست می‌آید که همان انتقال مجدد روزانه یعنی  $TRANSL$  است.

1. Total Crop Mass at Beginning Seed Growth Which is Translocateable to Grains
2. Fraction Crop Mass at Beginning Seed Growth Which is Translocateable to Grains

$$TRANSL = DTU / (tuTSG - tuBSG) \times TRLDM \quad \text{(رابطه ۱۶):}$$

مقادیر  $tuTSG$  و  $tuBSG$  برای این تحقیق در (جدول ۲) نشان داده شده است.

**جدول ۵- پارامترهای SSM مشاهده شده برای موازنه آب خاک در زیرمدل iCrop2 (سلطانی، ۲۰۰۹؛ امیر و سینکدر، ۱۹۹۱)**

پارامتر (واحد)	مخفف	مقدار
تشکیل عملکرد		
بیشترین مقدار شاخص برداشت	HImax	۰/۴
محتوای رطوبت وش (% dwb)	MC	۱۰
روابط آب و خاک		
عمق اولیه ریشه در زمان سبز شدن یا شروع رشد برگ (mm)	iDEPORT	۲۰۰
کسر واحد دمایی برای شروع رشد ریشه (°C)	tuBRG	۰/۰۵
کسر واحد دمایی برای پایان رشد ریشه (°C)	tuTRG	۰/۵۵
بیشترین عمق موثر ریشه (mm)	MEED	۱۰۰۰
ضریب کارایی تعرق (Pa)	TEC	۵
آستانه FTSW وقتی تولید ماده خشک شروع به کاهش می‌کند	WSSG	۰/۳
آستانه FTSW وقتی توسعه سطح برگ شروع به کاهش می‌کند	WSSL	۰/۴
ضریب تغییر سرعت نمو در شرایط کمبود آب	WSSD	۰/۵

FTSW: کسر آب قابل حمل خاک

**پارامتریابی و ارزیابی مدل:** برای پارامتریابی و ارزیابی مدل مقادیر عملکرد و روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده با مشاهده شده مقایسه شدند (شکل ۳ و ۴). برای این منظور از مجموعه‌ای از داده های آزمایشی در مناطق مهم تحت کشت پنبه کشور استفاده شد (جدول ۶). براساس آمارنامه وزارت کشاورزی (<https://zeraat.maj.ir>) در سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۸۴ هفت استان خراسان رضوی، فارس، خراسان جنوبی، گلستان، خراسان شمالی، سمنان و اصفهان به ترتیب با ۳۸/۴۹، ۱۳/۲۷، ۱۰/۹۱، ۸/۳، ۶/۱۶، ۴/۶۸ و ۳/۹۹ درصد در مجموع ۸۵/۸ درصد تولید پنبه کشور را به خود اختصاص داده و مناطق اصلی کشت و تولید پنبه در ایران هستند (شکل ۲). در هر مورد برای انجام شبیه‌سازی، ورودی‌های مورد نیاز مدل جمع‌آوری شدند. به این ترتیب که آمار هواشناسی منطقه مورد نظر در سال‌های انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای به صورت یک فایل در اختیار مدل قرار گرفت. ورودی‌های مدیریت زراعی نیز مطابق گزارش آزمایش‌ها وارد گردید. در این مطالعه برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده از میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تغییرات (CV)، ضریب همبستگی (r) و میزان انحراف نتایج شبیه‌سازی شده از خط ۱:۱ با طیفی از اختلاف ۲۰٪ بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (به وسیله خطوط منقطع تعریف شده) برای آزمون نتایج مدل استفاده شد (سلطانی و هوگنبوم، ۲۰۰۷)، براساس معادلات زیر:

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum (Xi - Yi)^2}{n-1}} \times \frac{100}{\bar{X}} \quad \text{(رابطه ۱۷):}$$

که در آن  $Xi$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $Yi$  مقدار شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه  $RMSE$  استفاده می‌شوند.

$$CV = \frac{\delta}{\mu} \times 100 \quad \text{(رابطه ۱۸):}$$

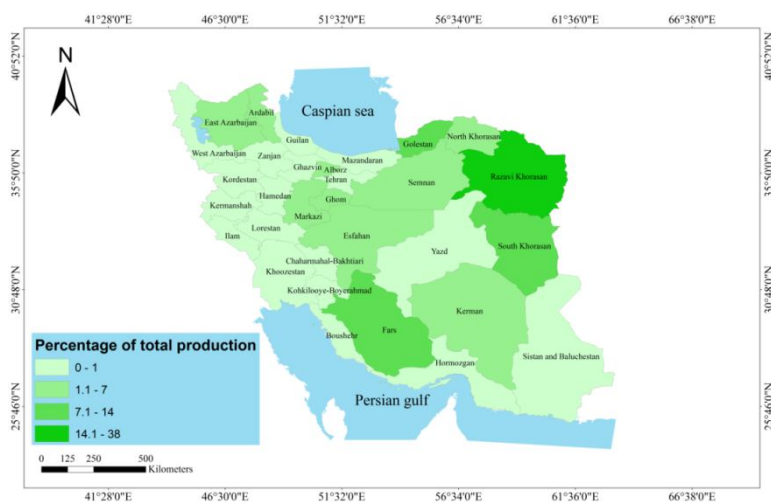
در رابطه ۱۸،  $CV$ : ضریب تغییرات،  $\delta$ : انحراف معیار و  $\mu$ : میانگین می‌باشد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})(Yi - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Yi - \bar{Y})^2}} \quad \text{(رابطه ۱۹):}$$

که در آن  $Xi$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $Yi$  مقدار شبیه‌سازی شده،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$ : میانگین مقادیر  $Xi$  و  $Yi$  و  $n$  تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است که برای محاسبه  $r$  استفاده می‌شوند.

جدول ۶- آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM

استان، موقعیت و سال آزمایش	تیمار	منبع
		پارامتریابی مدل
اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۶-۱۳۸۴	آبیاری	دهقانی و همکاران، ۱۳۹۳
خراسان رضوی، کاشمر، ۱۳۸۴-۱۳۸۳	مالچ پلاستیک	افشار و همکاران، ۱۳۹۱
سمنان، گرمسار، ۱۳۹۴-۱۳۹۳	تنش کمبود آب	نادری عارفی و همکاران، ۱۳۹۵
سمنان، گرمسار، ۱۳۹۲-۱۳۹۱	ارقام	نادری عارفی و حمیدی، ۱۳۹۳
اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۷	شوری آب آبیاری، رقم	دهقانی و همکاران، ۱۳۹۲
گلستان، گرگان، ۱۳۹۲	فاصله ردیف، رقم	مونیان اردستانی، ۱۳۹۲
گلستان، گرگان، ۱۳۷۹	تاریخ کاشت	اکرم قادری و همکاران، ۱۳۸۲
گلستان، گرگان، ۱۳۷۹	تاریخ کاشت	اکرم قادری و همکاران، ۱۳۸۱
ارزیابی مدل		
اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۸-۱۳۸۷	شوری آب آبیاری، رقم	جعفر آقایی و جلالی، ۱۳۹۱
اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۶-۱۳۸۵	کم آبیاری، رقم	جعفر آقایی و جلالی، ۱۳۹۱
سمنان، گرمسار، ۱۳۹۱-۱۳۹۰	تاریخ کاشت، آبیاری	نادری عارفی و عابدینی اسفهلانی، ۱۳۹۲
گلستان، گرگان، ۱۳۷۷	آبیاری	فرداد و ضیغمی گل، ۱۳۸۴
گلستان، گرگان، ۱۳۹۰	فاصله ردیف	قادری فر و همکاران، ۱۳۹۱
خراسان رضوی، کاشمر، ۱۳۸۷-۱۳۸۶	نیتروزن، آبیاری	ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۲
اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۵-۱۳۸۴	تراکم، رقم	جعفر آقایی و جلالی، ۱۳۹۳
گلستان، گرگان، ۱۳۹۱	ژنوتیپ، شوری خاک	روشنی و همکاران، ۱۳۹۳
خراسان رضوی، کاشمر، ۱۳۸۸-۱۳۸۷	محلول پاشی	نوری حسینی و همکاران، ۱۳۹۳
گلستان، کردکوی، ۱۳۹۰-۱۳۸۸	دورگ‌های زودرس	قجری و همکاران، ۱۳۹۳
گلستان، گرگان، ۱۳۹۲	واریته	انتصاری و همکاران، ۱۳۹۴
گلستان، کردکوی، ۱۳۹۲-۱۳۹۱	نیتروزن، فاصله ردیف	قجری و همکاران، ۱۳۹۵
فارس، داراب، ۱۳۹۰-۱۳۸۹	آبیاری	حقیقت نیا و همکاران، ۱۳۹۵



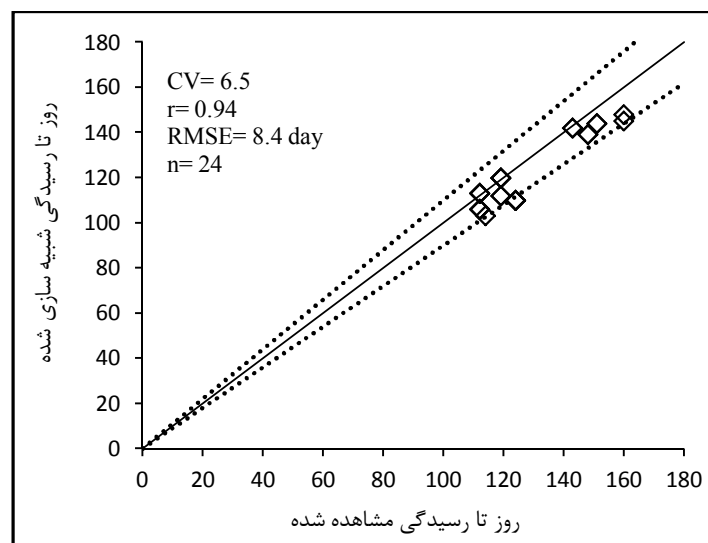
شکل ۲- مناطق اصلی تولید پنبه کشور براساس آمارنامه وزارت کشاورزی (۱۳۹۳-۱۳۸۴)

### نتایج و بحث

**واسنجی مدل:** نتایج حاصل از واسنجی مدل برای گیاه پنبه در استان‌های مهم تولید کننده این گیاه نشان داد که مدل SSM-iCrop2 با دقت خوبی عملکرد و روز تا رسیدگی را شبیه‌سازی نموده است (شکل ۳ و ۴).

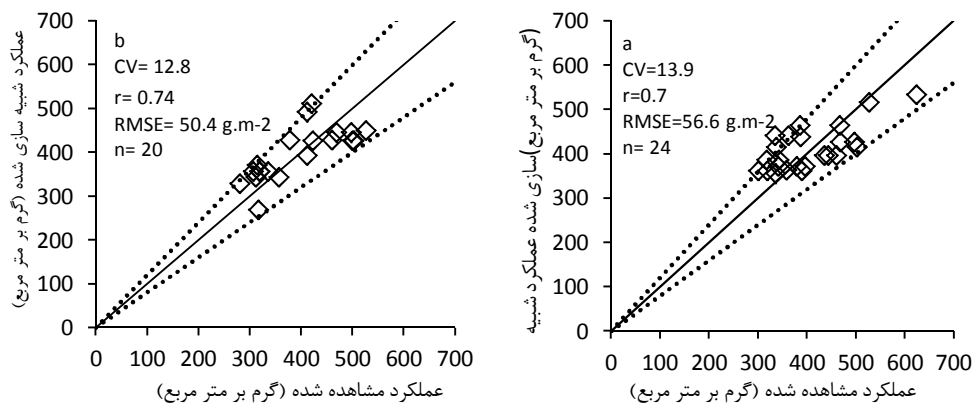
**پارامتریابی مدل:** نتایج حاصل از پارامتریابی نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روز تا رسیدگی ۸/۴ روز است که حدود ۶/۵ درصد میانگین روز تا رسیدگی مشاهده شده می‌باشد یعنی ضریب تغییرات (CV) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای روز تا رسیدگی ۶/۵ درصد بود. ضریب همبستگی بالای روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده با روز تا رسیدگی مشاهده شده ( $r=0.94$ ) نیز نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی دقیق مراحل نمو فنولوژیک موفق بوده است (شکل ۳). پیش‌بینی نمو فنولوژیک یا مراحل نمو گیاه اهمیت زیادی دارد، چون تولید و توزیع ماده خشک در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی تحت تأثیر زمان وقوع مراحل فنولوژی می‌باشد. به همین ترتیب، پیش‌بینی آن نسبت به پیش‌بینی تغییرات سطح برگ و سایر فرآیندها نسبتاً مشکل‌تر است، زیرا تفاوت بین گونه‌ها و ارقام زیاد است و اطلاعات کمی زیادی نیز وجود ندارد (سلطانی و همکاران، ۲۰۰۶). مراحل فنولوژی در مدیریت مزرعه مانند آبیاری، مصرف علف‌کش‌ها، کودهای شیمیایی و دیگر نهاده‌ها برای دستیابی به حداکثر عملکرد نقش مهمی دارند.

همچنین نتایج نشان داد که جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مقدار عملکرد پارامتریایی مدل برای گیاه پنبه در استان‌های مهم تولید کننده این محصول ۵۶/۶ گرم در متر مربع است که حدود ۱۳/۹ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده بود (شکل ۴a). همان‌طور که در (شکل ۴a) مشاهده می‌شود بیشتر نقاط در محدوده خطوط  $\pm 20\%$  درصد نسبت به خط ۱:۱ می‌باشند. که نشان از برآورد صحیح پارامترهای مدل می‌باشد.



شکل ۳- مقادیر روز تا رسیدگی مشاهده شده در مقابل روز تا رسیدگی شبیه‌سازی شده، دامنه  $\pm 20\%$  درصد از اختلاف بین شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

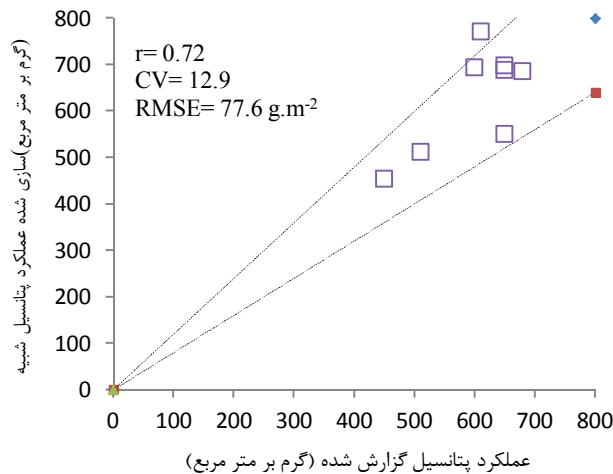
**ارزیابی مدل:** نتایج حاصل از ارزیابی نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مقدار عملکرد گیاه پنبه در استان‌های مهم تولید کننده این محصول ۵۰/۴ گرم در متر مربع است که حدود ۱۲/۸ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده بود. که نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد می‌باشد. همچنین، همبستگی بالای عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد مشاهده شده نشان می‌دهد که مدل در پیش‌بینی عملکرد از دقت بالایی برخوردار است (شکل ۴b). همان‌طور که در (شکل ۴b) مشاهده می‌شود بیشتر نقاط در محدوده خطوط  $\pm 20\%$  درصد نسبت به خط ۱:۱ می‌باشند.



شکل ۴- نتایج پارامتریابی (a) و ارزیابی (b) مدل از میزان عملکرد مشاهده شده در مقابل عملکرد شبیه‌سازی شده، دامنه ۲۰ درصد از اختلاف بین شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل در مناطق مهم تحت کشت پنبه و مقایسه آن با عملکرد پتانسیل گزارش شده در آن مناطق: شکل ۵ شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل پنبه را با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برای شهرهای بیرجند، بيله‌سوار، حسن آباد داراب، بشرویه، گرمسار، هاشم‌آباد، جهرم و لار در مقابل عملکرد پتانسیل گزارش شده گیاه پنبه در این مناطق را نشان می‌دهد (وزارت کشاورزی، ۲۰۱۷). RMSE برای عملکرد برابر با ۷۷/۶ گرم در متر مربع بود که معادل ۱۲/۹ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده بود. مقدار ضریب همبستگی برای رابطه بین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده و گزارش شده برابر با ۰/۷۲ بود. نورحسینی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل SSM به پیش‌بینی عملکرد بادام‌زمینی پرداختند. در مطالعه آن‌ها مقدار RMSE برابر با ۲۱ درصد میانگین عملکرد مشاهده شده و با ضریب همبستگی ۰/۵۵ برای رابطه بین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده گزارش گردید. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشتر نقاط در محدوده خطوط  $\pm 20$  درصد می‌باشند. بر این اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل پنبه برای مناطق مهم تولید کننده این گیاه در ایران با استفاده از مدل SSM-iCrop2 رضایت بخش بود که می‌تواند نشان دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و یا تصدیق کننده کارایی مدل در تخمین مقدار عملکرد پنبه در ایران باشد.



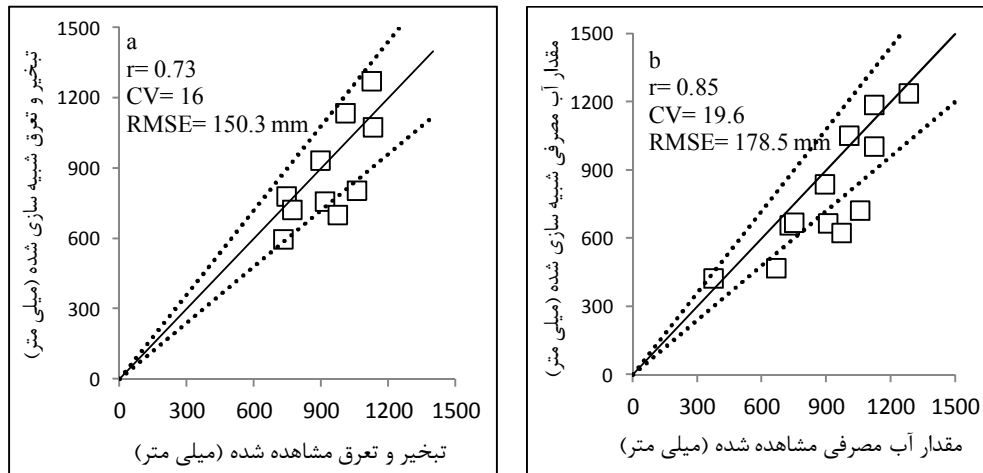


شکل ۵- عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده پنبه (۱۰ درصد رطوبت) توسط مدل SSM در مقابل عملکرد پتانسیل گزارش شده برای چندین منطقه مهم تولید پنبه در ایران (وزرات کشاورزی، ۲۰۱۷). ۲۰ درصد اختلاف توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط سیاه خط ۱:۱ است.

تبخیر و تعرق (ET) و مقدار آب مصرفی (CIRGW): شکل ۶ شبیه‌سازی مقدار ET و CIRGW را با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برای برخی از شهرهای مهم تولید کننده پنبه در ایران در مقابل ET و CIRGW مشاهده شده گیاه پنبه در این مناطق را نشان می‌دهد (وزرات کشاورزی، ۲۰۱۷). RMSE برای ET و CIRGW به ترتیب برابر با ۱۵۰/۳ و ۱۷۸/۵ میلی‌متر بود که معادل ۱۶ و ۱۹/۶ درصد میانگین ET و CIRGW مشاهده شده بود. مقدار ضریب همبستگی برای رابطه بین مقدار ET شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برابر با ۰/۷۳ و CIRGW برابر ۰/۸۵ بود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود بیشتر نقاط در محدوده خطوط  $\pm 20\%$  درصد می‌باشند. بر این اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و مقدار آب مصرفی پنبه برای مناطق مهم تولید کننده این گیاه در ایران با استفاده از مدل SSM-iCrop2 رضایت بخش بود که می‌تواند نشان دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل و یا تصدیق کننده کارایی مدل در ایران باشد.

با در نظر گرفتن آماره‌ها مشخص شد مدل SSM-iCrop2 برای تخمین رشد، نمو و عملکرد در ایران کارایی قابل قبولی دارد. زیرا ضریب تبیین ( $R^2$ ) که نشان دهنده نسبت پراکندگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد هم برای عملکرد پتانسیل و هم برای روز تا رسیدگی به ۱ نزدیک بود. نهبندانی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل SSM به پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان پرداختند. ایشان عنوان کردند که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای

عملکرد دانه برابر با ۴۸ گرم بر متر مربع، ضریب تغییرات (CV) برابر با ۱۵ درصد و مقدار ضریب همبستگی برای رابطه بین مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برابر با ۸۰ درصد بود. همچنین مقدار (RMSE)، (CV) و ضریب همبستگی برای روز تا رسیدگی به ترتیب ۸/۷ روز، ۶ درصد و ۷۲ درصد به دست آمد. در مطالعه دیگری اکبری و سلطانی (۲۰۱۷) در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه سویا در شرایط اقلیمی تهران با استفاده از مدل SSM اعلام کردند که با توجه به مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۱۷/۸ گرم بر متر مربع که معادل ۹ درصد هر دو میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است، مدل برای پیش‌بینی عملکرد سویا از دقت مناسبی برخوردار بوده است. مدل SSM-iCrop2 نسبت به دیگر مدل‌ها نیاز به داده کمتر بدون کاهش دقت و همچنین کاربری آسان‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها دارا می‌باشد. سلطانی و سینکلر (۲۰۱۵) در مقایسه چهار مدل APSIM و DSSAT (به‌عنوان دو مدل پیچیده) و CropSyst و SSM (به‌عنوان دو مدل ساده) در پیش‌بینی عملکرد گندم بیان کردند که مدل SSM قادر به پیش‌بینی رشد و نمو و عملکرد گندم با دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد به طوری که ضریب تغییرات در پیش‌بینی عملکرد برای SSM (۸/۲ درصد) و CropSyst (۱۴/۳ درصد) نسبت به APSIM (۱۵ درصد) و DSSAT (۱۸/۵ درصد) کمتر بود. همچنین تعداد پارامترهای ورودی در SSM (۵۵ پارامتر) در مقایسه با مدل APSIM (۲۹۲ پارامتر) و مدل DSSAT (۲۱۱ پارامتر) بسیار کمتر می‌باشد. این به معنای نیاز به داده‌های کمتر برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد با استفاده از مدل SSM-iCrop2 می‌باشد که در مدل‌سازی به‌ویژه برای کشورهایی مثل ایران، که کمبود اطلاعات دقیق استفاده از مدل‌ها را محدود می‌کند، بسیار مهم است. سلطانی و سینکلر (۲۰۱۵) اعلام کردند که بین عملکرد مدل و تعداد پارامترها ارتباط معنی‌داری وجود ندارد. به این معنی که تعداد پارامترهای ورودی بر توانایی پیش‌بینی مدل تاثیر نمی‌گذارد. بنابراین مزیت اصلی SSM وضوح و استفاده آسان از آن می‌باشد که می‌تواند مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گیرد. علاوه بر این SSM دارای کدهای باز است که اجازه استفاده برای پیش‌بینی رشد و عملکرد بسیاری از محصولات در طیف وسیعی از شرایط محیطی را می‌دهد.



شکل ۶- تبخیر و تعرق (a) و مقدار آب مصرفی (b) شبیه‌سازی شده توسط مدل SSM در مقابل مشاهده شده در چندین منطقه در ایران. ۲۰ درصد اختلاف توسط خطوط منقطع نشان داده شده است. خط سیاه خط ۱:۱ است.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاکی از کارایی قابل قبول مدل برای پیش‌بینی روز تا رسیدگی ( $CV=۶/۵$ ،  $RMSE=۸/۴$  day) و عملکرد وش ( $CV=۱۳/۹$ ،  $RMSE=۵۶/۶$  g.m-2) برای پارامتریابی و عملکرد وش ( $CV=۱۲/۸$ ،  $RMSE=۵۰/۴$  g.m-2) برای ارزیابی بود. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد (با مقدار  $RMSE$  برابر  $۷۷/۶$  گرم در مترمربع و  $CV$  برابر  $۱۲/۹$  درصد)،  $ET$  (با مقدار  $RMSE$  برابر  $۱۵۰/۳$  میلی‌متر و  $CV$  برابر  $۱۶$  درصد) و  $CIRGW$  (با مقدار  $RMSE$  برابر  $۱۷۸/۵$  میلی‌متر و  $CV$  برابر  $۱۹/۶$  درصد) در مناطق مهم تولید کننده پنبه در ایران حاکی از دقت رضایت‌بخش مدل SSM برای پیش‌بینی عملکرد بود. بنابراین، می‌توان از این مدل برای اهداف تجزیه و تحلیل عملکرد پنبه و بررسی واکنش پنبه به تغییرات محیطی، مدیریتی و عوامل ژنتیکی در ایران استفاده نمود.

### منابع

1. Afshar, H., Sedre qain, S.H., and Mehr abadi, H.R. 2012. Evaluation of Application of Plastic Mulch on Water Used and Seed Cotton Yield. Journal of Water and Soil. 26(6): 1421-1427. (In Persian with English abstract).
2. Ahmadi, M., and Agha-alikhani, M. 2012. An analysis of energy consumption of cotton cultivation in Golestan province to offering strategy for increasing resources productivity. Journal of Agroecology. 4(2): 151-158. (In Persian).

3. Akbari, Sh., and Soltani, A. 2017. Parameterization and evaluation of simple model for simulation of growth and yield of soybean in Tehran climatic condition. *Journal of Agricultural Crops Production*. 19(3): 751-765. (In Persian with English abstract).
4. Akram ghaderi, F., Latifi, N., and Rezaee, J. 2002. Effect of planting date on yield and yield components of three cotton cultivars in Gorgan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 9(2): 81-93. (In Persian with English abstract).
5. Akram ghaderi, F., Latifi, N., Rezaee, J., and Soltani, A. 2003. Effect of planting date on phenology and morphology of three cotton cultivars in Gorgan. *Iranian Journal of Agriculture Science*. 34(1): 221-230. (In Persian with English abstract).
6. Amir, J., and Sinclair, T. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research*. 28: 59-69.
7. Baker, D.N., Lambert, J.R., and McKinion, J.M. 1983. GOSSYM: A simulator of cotton crop growth and yield. *Tech Bull.*, 1086, S.C. Agricultural Experiment Station, Clemson, South Carolina, USA.
8. Brown, L.G., Jones, J.W., Hesketh, J.D., Hartsog, J.D., Whisler, F.D., and Harris, F.S. 1985. COTCROP: Computer simulation of growth and yield. *Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Information Bulletin No 69*. Mississippi State, USA.
9. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., and Zeinali, E. 2020. Parameterization and Evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield in Iran. *Potato Research*. 63: 545-563.
10. Dehqani, M., Jafar aghaee, M., and Mohamadi kia, S. 2013. Effect of irrigation water salinity on yield and some yield components of three cotton cultivars in Isfahan. *Journal of Water Research in Agriculture*. 27(4): 601-610. (In Persian).
11. Dehqani, M., Jafar aghaee, M., and Tabatabaee, S.H. 2014. Effect of irrigation Schedule on yield and its components in two cotton cultivars in Isfahan. *Journal of Water Research in Agriculture*. 28(3): 561-569. (In Persian).
12. Diepen, C.V., Wolf, J., Keulen, H.V., and Rappoldt, C. 1989. WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil use and management*. 5(1): 16-24.
13. Entesari, M.H., Zangi, M.R., and Dadashi, M.R. 2015. Evaluation of the morphological and yield traits in the new Varieties of cotton. *Iranian Journal of Cotton Researches*. 3(1): 119-132. (In Persian with English abstract).
14. FAO., 2016. Production statistics of crops. Food and Agriculture Organization (<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>).
15. Farahani, H.J., Izzi, G., and Oweis, T.Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*. 101(3): 469-476.

16. Fardad, H., and Zighamigol, R. 2005. Optimization of Water Consumption for Irrigation of Cotton in Gorgan Region. Iranian Journal of Agriculture Science. 36(5): 1197-1206. (In Persian).
17. Ghaderi Far, F., Alimagham, S.M., Cancholi, O., Yousefi Daz, M., and Miri, A.A. 2012. Yield and fiber quality comparison of cotton planted in ultra-narrow row and conventional row. Electronic Journal of Crop Production. 5(2): 75-91. (In Persian with English abstract).
18. Ghajari, A., Alisha, O., and Mirgasemi, S.J. 2014. Investigation of reaction successful early matured cotton crosses on yield and Yield components as double cropping. Iranian Journal of Cotton Researches. 2(2): 75-89. (In Persian with English abstract).
19. Ghajari, A., Gharanjeeki, A., and Dieji, A. 2016. Optimizing the nitrogen fertilizer use and row spacing for increasing yield of Cotton cv. Golestan in double-cropping. Iranian Journal of Cotton Researches. 4(1): 47-60. (In Persian).
20. Haghghat nia, H., Shirvaniyan, A., and Hekmat, M.H. 2016. Effect of Different Levels of Irrigation and Plant Growth Regulatory of Pix on Yield of Cotton (Case Study: Darab, Fars). Iranian Journal of Cotton Researches. 4(1): 61-76. (In Persian).
21. 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.
22. Hearn, A.B. 1994. OZCOT: A simulation model for cotton crop management. Agricultural Systems. 44: 257-299.
23. Jafar aghaee, M., and Jalali, A.H. 2012. Effect of Deficit Irrigation on Production of Two Cotton Cultivars in Isfahan Province. Journal of Crop Production and Processing. 2(6): 145-152. (In Persian).
24. Jafar aghaee, M., and Jalali, A.H. 2012. Effect of Irrigation-Water Salinity on Yield and Water Use Efficiency of Three Cultivars of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Journal of Crop Production and Processing. 2(5): 97-107. (In Persian).
25. Jafar aghaee, M., and Jalali, A.H. 2014. Yield and yield components of three varieties of cotton, under the influence of different densities. Iranian Journal of Cotton Researches. 2(1): 55-64. (In Persian with English abstract).
26. Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R., and Francis, G.S., 1998. Sirius: A mechanistic model of wheat response to environmental variation. European Journal of Agronomy. 8: 161-179.
27. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., ... and Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy. 18(3): 235-265.

28. Ko, J., Piccinni, G., Guo, W., and Steglich, E. 2009. Parameterization of EPIC crop model for simulation of cotton growth in South Texas. *Journal of Agricultural Science*. 147: 169-178.
29. Monian ardestani, M. 2013. Comparison of seed yield and quality of cotton cultivars grown in a very narrow range of rows. M.Sc thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian with English abstract).
30. Naderi arefi, A., Ahmadi, A., Sabok dast, M., Tavakoli, A.R., and Vafae tabar, M.A. 2016. Effect of water deficit stress on some vegetative aspects and yield of cotton genotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*. 47(1): 41-52. (In Persian with English abstract).
31. Naderi arefi, A., and Abedini esfehiani, M. 2013. Effect of planting date and final irrigation on cotton yield at Garmsar condition. *Agricultural Crop Management*. 15(3): 201-211. (In Persian).
32. Naderi arefi, A., and Hamidi, A. 2014. Seed Cotton Yield and some Related Traits in Different Cultivars of Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in Garmsar Conditions. *Seed and Plant Production*. 30(4): 401-420. (In Persian).
33. Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Raisi, S., and Najafi, R. 2015. Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for Prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*. 22(3): 1-26. (In Persian).
34. Noorhosseini, S.A., 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.
35. Nouri hoseini, S.M., Zabihi, H.R., and Ramazani Moghaddam, M.R. 2014. Cotton yield and yield components response to soil and foliar application of iron and zinc. *Iranian Journal of Cotton Researches*. 2(2): 43-57. (In Persian with English abstract).
36. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. 2009. *AquaCrop Reference Manual*. FAO. Land and Water Division, Rome, Italy.
37. Rassam, Gh.A., and Soltani, A. 2014. A simple model to simulate growth and yield of soybean. *Journal of Plant Production Research*. 21(2): 87-105. (In Persian with English abstract).
38. Roshani, G.H., Gharanjiki, A., and Mirghasemi, S.J. 2014. Evaluation and Comparison of Salinity Tolerance of Several Cotton Genotypes in a Saline Soil. *Iranian Journal of Cotton Researches*. 2(2): 13-26. (In Persian with English abstract).
39. Rucell, G., Jarvis, P.G., and Monteith, J.L. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth. pp: 21-39. In: Russell. G., Marshall, B., and Jarvis, P.G. (ed.), *Plant Canopies: Their Growth, Form and Function*. Cambridge University Press.

40. Sinclair, T.R. 2006. A reminder of the limitations in using Beer's law to estimate daily radiation interception by vegetation. *Crop Science*. 46: 2343-2347.
41. Sinclair, T.R., Kitani, S., Hinson, K., Bruniard, J., and Horie, T. 1991. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. *Crop Science*. 31: 786-790.
42. Soltani, A. 2009. Mathematical modeling in filed crops. Jihad-e-Daneshgahi of Mashhad University Publications. 175 p. (In Persian).
43. Soltani, A., Alimaghani, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadras, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M.K., and Sinclair, T.R. 2020. SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*. 182: 102855.
44. Soltani, A., and Hoogenboom, G. 2007. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*. 103: 198-207.
45. Soltani, A., and Sinclair, T. 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.
46. Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*. 124: 252-260.
47. Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2012. *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABI Publishing, Wallingford, UK. 322 p.
48. Soltani, A., Ghassemi-Golezani, K., Rahimzadeh-Khooie, F., and Moghaddam, M. 1999. A simple model for chickpea growth and yield. *Field Crops Research*. 62: 213-224.
49. Soltani, A., Gholipour, M., and Hajizadeh, H. 2005. SBEET: A simple model to simulate growth and yield of sugar beet. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 19: 11-26.
50. Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J., and Zeinali, E. 2006. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. *Field Crops Research*. 99: 1-13.
51. 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.
52. Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, J., and Beernaert, F. 1985. Land evaluation. State University of Ghent, International Training Centre for postgraduate soil scientists.
53. Tan, S., Wang, Q., Zhang, J., Chen, Y., Shan, Y., and Xu, D. 2018. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-

- mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*. 196: 99-113.
54. The Ministry of Agriculture- Jahad. 2017. (<https://www.maj.ir/>).
55. Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R., and Spanel, D.A. 1989. The EPIC crop growth model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 32: 497-510.
56. Zabihi, H.R., Ramazani moghaddam, M.R., and Nouri hosseini, S.M. 2013. Effects of different amount of nitrogen and irrigation water on yield and yield components of cotton. *Iranian Journal of Cotton Researches*. 1(2): 43-55. (In Persian with English abstract).
57. Zhang, L., Van Der Werf, W., Cao, W., Li, B., Pan, X., and Spiertz, J.H.J. 2008. Development and validation of SUCROS Cotton: a potential crop growth simulation model for cotton. *Wageningen Journal of Life Sciences*. 56: 59-83.