

شبیه‌سازی عملکرد دانه و ماده خشک کلزا در شرایط تنش آبی با استفاده از مدل SWAP

سیدفرشید موسوی‌زاده^{۱*}، تورج هنر^۲ و حسین رحمتی^۳

^{۱*} نویسنده مسئول، دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

farshid.mousavi89@gmail.com

^۲ دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

^۳ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۲۴

چکیده

در سال‌های اخیر به منظور حل مشکلات بخش کشاورزی راه کارهایی ارائه شده است. از جمله آن‌ها استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی به منظور مدیریت آب در این بخش بود که با استفاده از این مدل‌ها تا حدودی می‌توان مشکلات آب را بهبود بخشید. مزیت اصلی استفاده از مدل‌ها توانایی تعیین برنامه آبیاری بهینه از نظر اقتصادی است. مدل SWAP از جمله مدل‌هایی می‌باشد که در تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان و در طیف وسیعی از گیاهان نتایج مطلوبی از خود نشان داده است. هم‌چنین در این پژوهش با استفاده از اطلاعات دو دوره کشت در منطقه باجگاه استان فارس عملکرد این مدل در زمینه شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا مورد بررسی قرار گرفت و مقدار رطوبت خاک، تبخیر و تعرق، ماده خشک و عملکرد دانه مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل در بخش عملکرد در دو مرحله واسنجی و ارزیابی به ترتیب دارای میانگین خطای نرمال شده ۸/۰ و ۱۴/۲ و در بخش شبیه‌سازی ماده خشک دارای میانگین خطای نرمال شده ۳/۹ در مرحله واسنجی و ۱۰/۸ در مرحله ارزیابی است.

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی عملکرد دانه، مدل SWAP، کلزا.

Simulation of Seed Yield and Dry Matter of Canola Under The Condition of Water Stress Using SWAP Model

S.F. Mousavizadeh^{1*}, T. Honar² and H. Rahmati³

1*- Corresponding Author, MSc Irrigation and Drainage, Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Shiraz, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Shiraz, Iran.

3- Ph.D. Candidate, in Irrigation and Drainage, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 13 February 2016

Accepted: 19 April 2016

Abstract

In recent years, in order to solve problems were presented the way tasks in the agricultural sector. Among these, growth simulation models have been provided for water management, which it possible to reduce the difficulties in agricultural water. The main advantage of these models is that, they can optimize irrigation schedule economically. SWAP model is of the most widely used models in the world which has shown good results for variety of crops. So that, in this practice the performance of this model for simulating the growth of Canola was evaluated according to the data relating to two cultivation periods in Badjgah. The studied parameters consist of soil water content, evapotranspiration, dry matter, and seed yield. The results indicated that, in the calibration and evaluation phases for seed yield respectively, mean normalized error was 8.0 and 14.2. What is more, mean normalized error for simulation of dry matter was 3.9 and 10.8 in calibration and evaluation periods, respectively.

Keywords: Seed yield simulation, SWAP model, Canola.

مقدمه

کلزا گیاهی روغنی که شامل ۴۰ درصد روغن می‌باشد و در سال ۱۹۷۰ کشت آن توسعه یافته است. کلزا با نام علمی *Brassica napus*^۱ گیاهی یک‌ساله است و در دو فصل بهار و پاییز کشت می‌شود. این گیاه قابلیت رویش در اغلب خاک‌ها را دارد ولی خاک رسی لومی به دلیل زهکش سطحی کامل و داخلی نسبتاً خوب بهترین نوع خاک محسوب می‌شود. کلزا گیاه خاص مناطق سرد است و به تغییرات دمایی نیز حساس و به شدت واکنش نشان می‌دهد و در مناطق اقلیمی مختلف نسبت به شرایط محیط واکنش‌های متفاوتی از خود بروز می‌دهند. این گیاه به ریزش دانه حساس است بنابراین در فصل زراعی بعد مجدداً رشد می‌نماید، لذا پیشنهاد می‌گردد که غلات دانه‌ای در تناوب زراعی بعد از کلزا مورد کشت قرار گیرد (موسوی‌زاده، ۱۳۹۳). خواب بذر کلزا را می‌توان با بذرافشانی در سرما شکست تا بعد از مساعد شدن هوا رشد خود را شروع کند. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته روی کلزا در مناطق سرد، نیمه‌سرد، خشک و نیمه‌خشک در ایران مشخص شد که واکنش این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک در مقایسه با مناطق سرد و نیمه‌سرد متفاوت و معنی‌دار می‌باشد. شاید بتوان علت این اختلاف را به عدم توانایی تحمل گیاه در برابر تنش خشکی هوا نسبت داد. در مناطق سرد و نیمه‌سرد دامنه تغییرات دمایی در محدوده مطلوب گیاه قرار دارد و البته تغییرات شدید نیست که منجر به تنش گرمایی یا سرمایگی برای گیاه گردد که مسلماً این موضوع نیاز به پژوهشی مستقل دارد. در سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰، سطح کشت کلزا در کشور حدود ۸۷ هزار هکتار برآورد شده است که معادل ۰/۶۸ درصد از کل سطح کشت محصولات زراعی و ۱۵/۴ درصد از کل سطح کشت محصولات صنعتی می‌باشد. ۷۲/۹ درصد سطح کشت کلزا به صورت کشت آبی و ۲۷/۱ درصد به صورت کشت دیم بوده است. میزان تولید کلزا در کشور حدود ۱۹۰ هزار تن برآورد شده است که معادل ۰/۲۲ درصد از میزان تولید محصولات زراعی و ۱/۷ درصد از کل میزان تولید محصولات صنعتی می‌باشد. ۷۷/۳ درصد آن از طریق کشت آبی و ۲۲/۷ درصد از کشت دیم تولید شده است. عملکرد محصول کلزا در اراضی آبی و دیم به ترتیب برابر با ۲۳۰۵ کیلوگرم در هکتار ۱۸۲۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (جاویدفر و همکاران^۲، ۲۰۰۴). رشد گیاه از عواملی هم‌چون دما، تاریخ کشت، تراکم کشت، فواصل و ردیف‌های کشت، میزان آب مصرفی و نحوه تغذیه متاثر می‌باشد. به منظور بررسی اثر این عوامل بر رشد گیاه انجام پژوهش‌های گسترده مزرعه‌ای اجتناب‌ناپذیر است اما به علت زمان‌بر بودن انجام هر کشت، عدم امکان ثابت در نظر گرفتن برخی از عوامل در مزرعه و یا عدم توانایی تهیه برخی از آن‌ها این کار به سادگی میسر نمی‌باشد. به همین منظور استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی می‌تواند ابزار مناسبی به منظور بررسی رفتار گیاه در شرایط متفاوت مدیریتی

باشد. بسته به اهداف متفاوت در گذر زمان مدل‌های متفاوتی از جمله *آکواکراپ*^۳ و *سرس*^۴ پدید آمده‌اند که اساس کار تمامی آن‌ها تقریباً یکسان است و ابتدا برخی از پارامترهای ورودی مدل مورد نظر با استفاده از اطلاعات مزرعه‌ای در یک سال واسنجی و سپس با اطلاعات مستقل دیگر ارزیابی می‌گردند (هنر و همکاران، ۱۳۹۰). هرچه در یک مدل از روابط تحلیلی بیشتری برای فیزیک و فیزیولوژی گیاه استفاده گردد، نیاز مدل به واسنجی کمتر ولی در مقابل این مدل کامل‌تر و تهیه آن مشکل‌تر می‌گردد (کومار و همکاران^۵، ۲۰۱۵) البته در برخی از شرایط که با فقدان اطلاعات کامل رو به رو هستیم، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی با پیچیدگی کمتر ترجیح داده می‌شود. مدل‌های گیاهی اطلاعاتی در خصوص آب و هوا، خاک و گیاه دریافت کرده و در نهایت مقدار محصول، آب خاک، آیشویی نیتروژن را پیش‌بینی می‌کنند (سپاسخواه و همکاران^۶، ۲۰۱۱). در دهه اخیر با گسترش و توسعه مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی می‌توان اثر روش‌های مدیریتی مختلف در بخش آبی و زراعی را به منظور دست‌یابی به حداکثر تولید با مقدار بهینه آب و کود نیتروژن بررسی و در صورت نیاز اصلاح نمود (زندپارسا، ۱۳۸۱). از مدل SWAP در تحقیقات گسترده‌ای با اهداف متفاوت استفاده شده است که در ادامه تعدادی از آن‌ها بررسی خواهد شد. در پژوهشی بنفانته و همکاران^۷ (۲۰۱۰) اقدام به بررسی عملکرد مدل‌های SWAP، CropSyst و MACRO در شبیه‌سازی فرآیند خشک شدن خاک نمودند که نتایج تحقیق آنان نشان داد مدل SWAP به دلیل استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد در وایادولید^۸ اسپانیا نیز ضرایب گیاهی و حساسیت در دوره‌های مختلف رشد برای چغندر قند تحت تیمارهای مختلف آبیاری واسنجی شد، و نتایج نشان داد که این مدل عملکرد نسبی، تبخیر و تعرق و عمق توسعه ریشه را با دقت خوبی تخمین می‌زند و مقادیر به دست آمده نزدیکی زیادی به مقادیر اندازه‌گیری شده دارد (اوتست و همکاران^۹، ۲۰۰۷). در تحقیقی در غرب ترکیه به منظور شبیه‌سازی بیلان آبی باغ انگور و مزارع پنبه و ذرت با مدل SWAP، مطالعه‌ای صورت گرفت. هدف تحقیق آن‌ها شبیه‌سازی تبخیر و تعرق و عملکرد نسبی بود که نتایج نشان داد با توجه به ضریب تعیین، ۰/۶۷ و ۰/۸۴ برای رطوبت، نتایج رطوبت دارای دقت بالایی می‌باشد، و همچنین ضرایب عملکرد و تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده از دقت مناسبی برخوردار بوده است (دروگرز و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۰). فدس و همکاران^{۱۱} (۱۹۷۸) در پژوهشی به

3- AquaCrop

4- CERES

5- Kumar *et al.*6 - Sepaskhah *et al.*7- Bonfante *et al.*

8- Valladolid

9- Utset *et al.*10 - Droogrs *et al.*11 - Feddes *et al.*

1- Brassica napus

2 - Javidfar *et al.*

کلزا در منطقه باجگاه استان فارس بررسی شده است. به منظور واسنجی و ارزیابی مدل از اطلاعات دو پژوهش شعبانی (۱۳۸۵) و ثابت (۱۳۸۸) که در مزرعه کشاورزی دانشگاه شیراز صورت پذیرفته است استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

برای واسنجی مدل SWAP و شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا در اثر تنش آبی از اطلاعات پژوهش شعبانی (۱۳۸۵) و به منظور ارزیابی مدل از داده‌های پژوهش ثابت (۱۳۸۸) استفاده شد. این تحقیقات در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه صورت گرفته است. منطقه باجگاه در ۱۶ کیلومتری شمال شرق شیراز قرار دارد و ارتفاع آن ۱۸۱۰ متر از سطح دریا، و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه می‌باشد این منطقه بر اساس روش دو مارتن، ناحیه‌ای نیمه خشک است که میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۴۲۰ میلی‌متر می‌باشد (فولادمند و سپاسخواه، ۱۳۸۶). براساس نتایج شعبانی (۱۳۸۵)، بافت خاک مزرعه سیلتی شنی لوم و ظرفیت زراعی خاک مزرعه در عمق‌های مختلف ۴۰-۳۱ درصد حجمی و چگالی ظاهری ۱/۴۱ گرم بر سانتی متر مکعب گزارش شده است. همچنین متوسط شوری عصاره اشباع خاک با توجه به تحلیل شیمیایی خاک مزرعه ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شده است. این پژوهش در هر دو سال اجرا دارای تیمارهای تنش آبی بوده است. طرح مورد نظر به صورت بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار و پنج تیمار آبیاری انجام شده است (آبیاری سطحی در هر کرت با لوله انجام شد). در این تحقیقات کرت‌های آزمایشی دارای طول ۱۰ متر و عرض ۳ متر و فاصله بین پشته‌ها ۵۰ سانتی‌متر بوده است. تیمارهای آزمایشی شامل تنش آبی در مراحل مختلف رشد گیاه بوده که قبل از اعمال تنش همه تیمارها دارای شرایط برابر بوده و آبیاری تا شروع رشد رویشی مجدد در اواخر اسفند و اوایل بهار در همه یکسان، ولی در حین اعمال تیمارها، تیماری تحت تنش، آبیاری نگردیده و سایر تیمارها به اندازه رسیدن رطوبت ظرفیت زراعی خاک تا عمق ریشه گیاه، آبیاری صورت گرفته است. در تیمار شاهد در تمام مراحل رشد به اندازه نیاز و بدون محدودیت آب دریافت نموده. کشت محصول در تاریخ یک مهر بعد از شخم، انجام و قبل از کاشت زمین به میزان ۱۰۰ میلی‌متر آبیاری گردیده است. بنابراین تاریخ کاشت هر سال اول مهر، در نظر گرفته می‌شود و دوره‌های مختلف رشد با توجه به روز درجات رشد در هر سال تعیین گردید. اندازه‌گیری رطوبت خاک با دستگاه نوترون‌متر در طول دوره کشت صورت گرفته است. محاسبات تبخیر و تعرق مرجع به روش پنمن-مونتیت به صورت روزانه وارد مدل شد. اطلاعات مربوط به خاک محل آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است و تیمارهای مورد آزمایش عبارت بودند از: 1: تیمار شاهد یا تیمار آبیاری در کل دوره رشد، 2: تیمار تنش آبی در مرحله رشد رویشی مجدد در بهار، 3: تیمار تنش آبی در مرحله گلدهی و

بررسی عملکرد مدل SWAP به منظور محاسبه تبخیر و تعرق و عملکرد نسبی پرداختند که نتایج نشان داد رطوبت شبیه‌سازی شده، ضرایب عملکرد و تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده دقت قابل قبولی دارند. با توجه به تحقیقات صورت گرفته می‌توان دریافت که مدل SWAP در شبیه‌سازی میزان عملکرد، رطوبت خاک، بیلان آبی در شرایط مختلف دارای دقت مناسبی است. همچنین با بازاده و سرائی تبریزی (۱۳۹۱) مدل SWAP را در برآورد عملکرد محصول و عملکرد بیولوژیک سویا و درصد رطوبت موجود در خاک طی فصل کشت مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق ابتدا مدل SWAP بر اساس نتایج مزرعه‌ای حاصل از کشت سویا برای چهار سناریوی آبیاری شیری در سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷ تحلیل حساسیت و واسنجی شد، سپس بر اساس نتایج مزرعه‌ای سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ مورد اعتباریابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که این مدل عملکرد دانه را بهتر از عملکرد بیولوژیکی سویا شبیه‌سازی می‌کند. همچنین نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل SWAP نسبت به داده‌های ورودی رطوبت باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار حساس است و با کوچکترین تغییر در داده‌های ورودی خاک شامل ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت باقی‌مانده نتایج خروجی به شدت تغییر می‌کند. به استناد تحلیل‌های آماری با وجود متغیرهای متعدد ورودی، مدل SWAP مقدار رطوبت خاک، شاخص سطح برگ، کارایی مصرف آب و عملکرد محصول را به خوبی برآورد می‌کند، زیرا در همه موارد ضریب تبیین بالاتر از ۰/۸ (به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۸۷، ۰/۸۹ و ۰/۹۳) و میانگین مربعات خطا کمتر از انحراف معیار داده‌ها می‌باشد و آزمون مقایسه میانگین تفاوت معنی‌دار را بین مقادیر شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده نشان نداد به منظور به روزرسانی مدل‌های رشد می‌توان از اطلاعات ماهواره‌ای جهت شبیه‌سازی محصول استفاده نمود که در همین راستا تحقیقی در سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ در سه سامانه آبیاری عقربه‌ای، واقع در شبکه آبیاری قزوین، تحت کشت گیاهان ذرت علوفه‌ای و چغندر قند، صورت گرفت. در این تحقیق مدل SWAP در دو مرحله بدون به‌روزرسانی و با به‌روزرسانی با شاخص سطح برگ ماهواره‌ای اجرا شد. برآورد عملکرد محصول چغندر قند و ذرت با مدل SWAP به‌روزرسانی‌شده به ترتیب ۱۳/۷ و ۱۴/۵ درصد در مقدار درصد خطا و ۳/۳۲۱ و ۱/۶۲۱ تن بر هکتار در مقدار مجذور میانگین مربعات خطا بهبود یافت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد با به‌روزرسانی شاخص سطح برگ ماهواره‌ای می‌توان خطاهای داده‌های ورودی مدل و عدم قطعیت موجود در آن‌ها را به میزان زیادی کاهش داد و با دقت مطلوبی عملکرد را در سطح وسیع و با تفکیک مزرعه به مزرعه برآورد کرد (بادیه‌نشین و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به کشت کلزا در استان فارس این ضرورت وجود دارد که با استفاده از مدل‌های گیاهی بتوان برنامه‌ای مناسب جهت مدیریت آبیاری‌ها به کار گرفت. در این تحقیق کارایی مدل SWAP در شبیه‌سازی میزان آب‌خاک منطقه ریشه، تبخیر و تعرق، عملکرد و ماده خشک گیاه

پارامترها می‌توان مقادیر h و k را تعیین نمود. با در اختیار داشتن منحنی مشخصه خاک منطقه که بر اساس معادله ونگنوختن به دست می‌آید وضعیت رطوبتی خاک توسط کاربر به مدل معرفی می‌شود. معادله ونگنوختن به صورت رابطه (۲) می‌باشد (ونگنوختن، ۱۹۸۰):

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} + \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

که در آن، θ_{sat} رطوبت اشباع خاک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) و θ_{res} رطوبت باقی‌مانده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) می‌باشد. مقدار m از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3)$$

در معادله فوق α ، n و m : فاکتورهای شکل این معادله هستند که n و m بی‌بعد و α دارای واحد (یک بر سانتی‌متر) است. با استفاده از رابطه (۱) و استفاده از تئوری هدایت هیدرولیکی غیراشباع (معلم، ۱۹۷۶)، معادله‌ای به منظور برآورد $k(\theta)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$k = k_{sat} S_e^{\lambda} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (4)$$

که در آن، k_{sat} : هدایت هیدرولیکی در ناحیه اشباع (سانتی‌متر بر روز)، λ : پارامتر شکل و S_e : نسبت اشباع، که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (5)$$

برنامه ای به نام RETC به منظور تخمین پارامترهای $\theta(h)$ و $k(\theta)$ توسط ون گنوختن و همکاران ارائه شد (ونگنوختن و همکاران، ۱۹۹۱؛ رادسر و زندپارسا، ۱۳۸۵). از جمله ضرایب قابل واسنجی در مدل SWAP ضرایب مربوط به بخش آب می‌باشد. ضریب مربوط به میزان به دست آوردن تبخیر از تبخیر و تفرق مرجع^۷ و همچنین ضریبی که مربوط به تفاوت منحنی ترشونده و خشک شونده در پدیده پسماند^۸ می‌باشد. در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی توسط برنامه RETC تخمین زده شد.

تشکیل غلاف، I4: تیمار تنش آبی در مرحله رسیدن دانه، S5: تیمار دیم با آبیاری تکمیلی در اول رشد در مرحله کاشت و جوانه‌زنی. در جدول (۱)، PWP: نقطه پژمردگی دائم، FC: رطوبت ظرفیت زراعی، ps: چگالی ظاهری خاک، θ_s : رطوبت اشباع و Ks: هدایت هیدرولیکی خاک می‌باشد.

تئوری و مبنای کار مدل SWAP

مدل SWAP نسخه اصلاح شده‌ای از مدل‌های SWATR، SWACROP و SWAP93 است که به ترتیب توسط فدس و همکاران (۱۹۷۸)، کابات و همکاران^۱ (۱۹۹۲) و ون-دن-بروک و همکاران^۲ (۱۹۹۴) توسعه یافته است. همچنین نسخه اصلاح شده SWAP2.0 توسط ون-دم و همکاران^۳ (۱۹۹۷) و کروس و همکاران^۴ (۲۰۰۱) توسعه یافته است. از جمله تفاوت‌های عمده دو نسخه ۲ و ۳ مدل SWAP می‌توان به کدهای بازسازی شده در ورودی و خروجی و مشخص نمودن خطاهای کاربر، به اجرا در آمدن گزینه‌های برف و جنگل، گزینه‌های گسترده به منظور تعامل با مدل‌های کیفیت آب، گزینه‌های گسترده برای شرایط مرزی پایین، رهگیری با توجه به خطاهای موجود آمده، تسهیل برای به اجرا درآوردن در مناطق شیب‌دار اشاره نمود. لازم به ذکر است مدل SWAP در دانشگاه واشینگتن^۵ هلند توسعه داده شده است. این مدل شامل یک برنامه اصلی است و چند زیربرنامه فرعی است.

هسته اصلی مدل SWAP، شامل توصیف ریاضی جریان آب، املاح و درجه حرارت در خاک با تاکید ویژه بر ناهمگنی آن است. این مدل با هدف شبیه‌سازی بیلان آب در خاک با توانایی در نظریه انواع مختلف شرایط مرزی و شرایط زهکشی و مدیریت‌های مختلف آبیاری به کار برده می‌شود. یکی از قابلیت‌های این مدل در نظریه برف و تاثیر ذوب آن در رشد محصول است بنابراین از این مدل می‌توان در کشورهایی با بارش برف زیاد استفاده کرد. مدل SWAP انتقال عمودی آب، املاح و گرما را در خاک مزرعه و طی دوره رشد شبیه‌سازی می‌نماید. به منظور بررسی جریان یک بعدی آب خاک در ناحیه اشباع از معادله ریچاردز استفاده می‌شود (ریچاردز، ۱۹۳۱):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S_a(h) \quad (1)$$

در این معادله، c : ظرفیت آب خاک (یک بر سانتی‌متر) و S_a : جذب آب خاک توسط ریشه (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بر روز) می‌باشد. با در نظرگیری شرایط مرزی، شرایط اولیه و سایر

- 1- Kabat et al.
- 2 - Van Den Broek et al.
- 3 - Van Dam et al.
- 4 - Kroes et al.
- 5 - Wageningen

6 - Mualem

7- Coefficient to derive Epot from ETref(CFBS)

8- Minimum pressure head difference to change wetting-drying

Y_a : عملکرد واقعی محصول (کیلوگرم بر هکتار)، Y_p : حداکثر عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار)، T_a و T_p : به ترتیب تبخیر واقعی و حداکثر تبخیر برحسب سانتی متر می باشد. از آن جایی که در مدل تفصیلی به صورت جامع به فرآیند شبیه سازی محصول پرداخته می شود در این تحقیق از این مدل استفاده گردید. مدل تفصیلی رشد بر اساس تجمع نور، کربن دی اکسید، فنولوژی و فیزیولوژی گیاه، توسعه و فرآیندهای کنترلی رشد و دما مقدار محصول پتانسیل را شبیه سازی می نماید. بنابراین در مدل تفصیلی، با استفاده از پارامترهای بیشتر، شبیه سازی با دقت بالاتری انجام می شود.

روابط محاسبه شاخص های آماری

به منظور ارزیابی کارایی مدل از معیارهایی چون حداکثر خطا^۳، مجذور میانگین مربعات خطا^۴، خطای نرمال شده^۵ و شاخص سازگاری^۶ استفاده شد:

$$MAE = n^{-1} |p_i - Q_i| \quad (10)$$

$$NRMSE = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n \times \bar{O}^2}} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n}} \quad (12)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i - \bar{O}| + |Q_i - \bar{O}|)^2} \quad (13)$$

در روابط فوق، p_i : مقادیر پیش بینی شده، Q_i : مقادیر مشاهده شده، n : تعداد نمونه های به کاررفته و \bar{O} : مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده می باشد. حداقل مقدار دو معیار حداکثر خطا و مجذور میانگین مربعات خطا صفر است. مقدار زیاد حداکثر خطا نشان دهنده عدم کارایی مدل است. چنانچه تمام مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده باهم برابر شوند، شاخص های مجذور میانگین مربعات خطا، خطای نرمال شده و حداکثر خطا صفر و شاخص d برابر یک می شود (موسوی زاده، ۱۳۹۳).

مقادیر ورودی در فایل گیاهی

اطلاعات ورودی مدل تفصیلی در ۱۳ بخش ضریب گیاهی و ارتفاع گیاه، توسعه محصول، مقادیر اولیه، پوشش سطح زمین، جذب مواد غذایی، تبدیل فتوسنتز به ماده خشک، تنفس گیاه، میزان از بین

روابط مربوط به محاسبه تبخیر

در فرآیند تبخیر و تعرق سه شرط در خاک، گیاه و اتمسفر باید رعایت شود: عرضه مداوم آب، انرژی موجود برای تغییر آب مایع به بخار و اختلاف فشار بخار برای حفظ جریان تبخیر از سطح به اتمسفر. در این مدل حداکثر آب استخراج شده در ناحیه ریشه (S_p) برابر است با حداکثر تعرق واقعی (T_p) (سانتی متر بر روز) که براساس شرایط جوی محاسبه می شود. بنابراین مقدار آب خارج شده در عمق مشخصی از ریشه به تراکم طولی ریشه (L_{root}) و حداکثر تبخیر واقعی وابسته است که طبق رابطه (۸) تعیین می گردد:

$$S_p(z) = \frac{l_{root}(z)}{\int_{-D_{root}}^0 l_{root}(z) dz} T_p \quad (6)$$

در این معادله، D_{root} : ضخامت لایه ای از خاک است که ریشه در آن وجود دارد. در ادامه با مساوی قرار دادن نسبت کسری با معکوس عمق ریشه، S_p به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{l_{root}(z)}{\int_{-D_{root}}^0 l_{root}(z) dz} = \frac{1}{D_{root}} \quad (7)$$

و نهایتاً S_p با استفاده از رابطه ارائه شده توسط فدس و همکاران (۱۹۷۸) محاسبه می شود:

$$S_p(z) = \frac{T_p}{D_{root}} \quad (8)$$

مدل SWAP به منظور شبیه سازی محصول در فایل گیاهی از سه نوع مدل شبیه سازی ساده^۱، تفصیلی رشد^۲، تفصیلی رشد چمن استفاده می نماید. در مدل ساده با در نظر گرفتن اطلاعات کمتر روند شبیه سازی رشد انجام می شود. این اطلاعات شامل طول دوره رشد، شاخص سطح برگ، عمق توسعه ریشه و رطوبت اولیه خاک است. اما در مدل تفصیلی رشد با استفاده از دمای لازم جوانه زنی و رسیدن دانه، درصد زردشدن برگ در مراحل مختلف رشد و سطح ویژه برگ، مقدار عملکرد و ماده خشک شبیه سازی شده را انجام می دهد (شیرشاهی و همکاران، ۱۳۹۲). بنابراین مدل SWAP با استفاده از تابع عملکرد محصول شبیه سازی ساده رشد را انجام می دهد:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_p} = K_y \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (9)$$

موسوی زاده و همکاران: شبیه‌سازی عملکرد دانه و ماده خشک کلزا در...

به ماده خشک و مقدار تنفس برگ ساقه و ریشه وارد مدل می‌شود که این ضرایب خاص گیاه مربوطه می‌باشد. در قسمت هشتم مواردی مانند اختصاص ماده خشک به برگ، ساقه و ریشه وارد مدل می‌شود. قسمت نهم شامل پارامترهای تأثیرگذاری است که تنش‌های مختلف گیاهی در آن لحاظ می‌گیرد. در این قسمت تنش آبی در از بین رفتن برگ‌ها، ساقه و ریشه از طریق DVS وارد مدل می‌شود که بدلیل در اختیار داشتن تیمارهای تنش آبی این ضرایب قابل واسنجی خواهند بود. در جدول (۲) ضرایبی که در مدل SWAP مورد واسنجی قرار گرفت، نشان داده شده است. این ضرایب در فایل گیاهی مدل در قسمت توسعه گیاه قرار دارد که به کاربر این امکان را می‌دهد تا با در نظر گرفتن دوره رشد گیاه به صورت ثابت یا متغیر، مجموع دمای لازم تا مرحله گلدهی و رسیدگی دانه کلزا را وارد نماید.

رفتن برگ و ساقه، آب زراعی مورد استفاده، تنش شوری، محدودیت‌ها، رشد ریشه و مشخصات تراکم وارد مدل می‌گردند. در بخش اول کاربر می‌تواند ضریب گیاهی و یا ارتفاع گیاه را نیز وارد نماید، که در صورت وارد نمودن ارتفاع گیاه مدل تغییرات تبخیر و تعرق را در فایل خروجی در نظر نمی‌گیرد. در مدل SWAP پارامتری به نام DVS تعریف می‌شود که این پارامتر کل دوره رشد را به صفر تا دو تقسیم می‌نماید تا ضرایب گیاهی مربوطه با استفاده از این پارامتر وارد مدل شود. در قسمت توسعه گیاه، کاربر باید شبیه‌سازی را براساس دما و یا روز رشد (تقویم رشد) انجام دهد. که در این قسمت درجه روز رشد در مرحله جوانه‌زنی و رسیدن دانه قابل دریافت می‌باشد. در قسمت سوم شرایط اولیه گیاه وارد مدل می‌گردد که این شرایط شامل میزان وزن خشک اولیه محصول و شاخص سطح برگ در زمان جوانه‌زنی می‌باشد. در قسمت چهارم درصد پوشش سطح زمین توسط برگ و ساقه و در قسمت‌های بعدی میزان جذب گیاه در جذب مواد غذایی و میزان تبدیل فتوسنتز

جدول ۱- مشخصات رطوبتی خاک محل آزمایش مزرعه

عمق (سانتی‌متر)	نقاط رطوبتی		
	۰-۳۰	۳۰-۹۰	۹۰-۱۲۰
نقطه پژمردگی (درصد)	۱۴	۱۸	۲۰
ظرفیت زراعی (درصد)	۳۳	۳۵	۳۸
چگالی ظاهری (درصد)	۱/۳۱	۱/۴۶	۱/۴۶
رطوبت اشباع (درصد)	۴۱	۴۲	۴۴
هدایت هیدرولیکی (میلی متر بر روز)	۱۳۷/۸	۴۴/۲	۴۴/۲
بافت خاک	سیلتی شنی لوم	سیلتی شنی لوم	سیلت لوم
قدرت یونی آب	۷/۶۵		
هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	۰/۶۷۹		

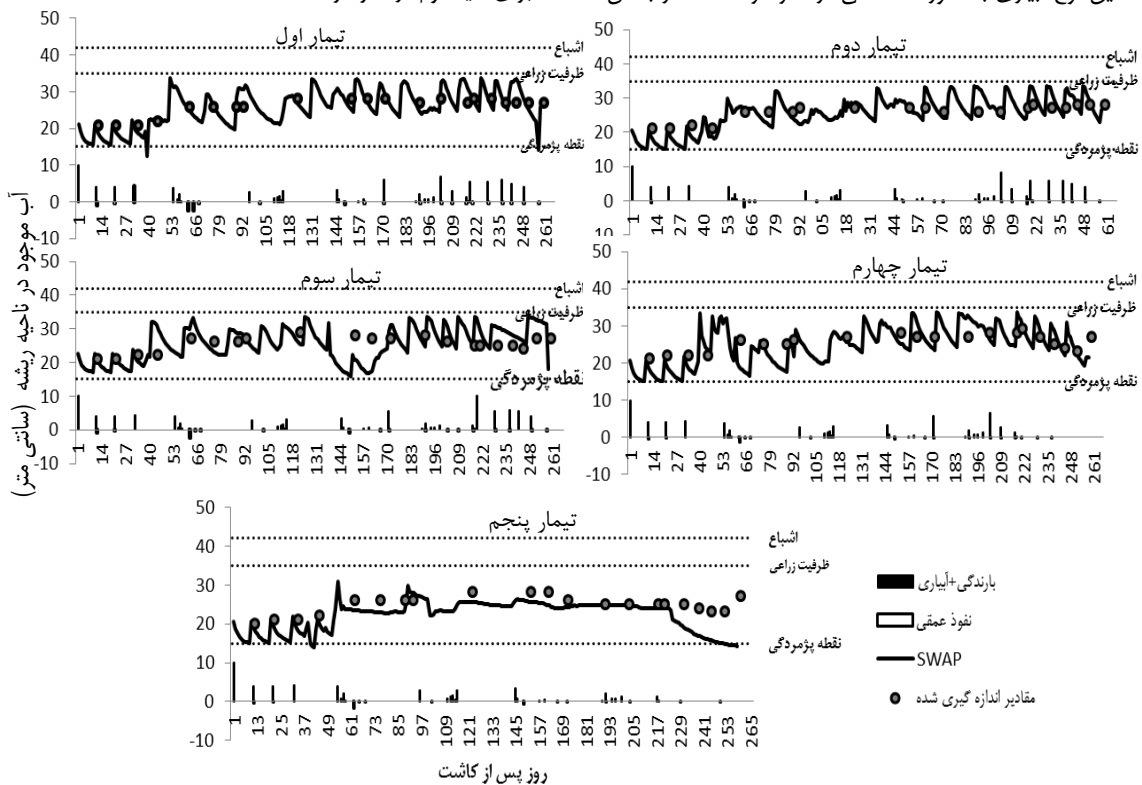
جدول ۲- ضرایب واسنجی شده در مدل SWAP برای شبیه‌سازی کلزا با اطلاعات شعبانی (۱۳۸۵)

مقدار	ضرایب مدل SWAP
۰/۱	ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی (KDIF)
۰/۴۵	ضریب خاموشی برای هدایت نور مرئی (KDIR)
۱۰۵۰	دمای تجمعی از مرحله سبزیگی تا گلدهی (درجه سانتی‌گراد) TSUMEA
۱۰۰۰	دمای تجمعی از مرحله گلدهی تا رسیدگی (درجه سانتی‌گراد) TSUMAM
۰/۴	راندمان مصرف نور (کیلوگرم ثانیه بر هکتار ساعت ژول متر مربع) ۴
۴۳	حداکثر میزان همانند سازی دی اکسید کربن (کیلوگرم بر هکتار ساعت) Amax

مقادیر ورودی در فایل هواشناسی

آب خاک نیز در قسمت اول وضعیت رطوبت اولیه خاک مشخص می‌شود که می‌تواند براساس ارتفاع سطح ایستابی و یا به صورت مقدار مکش آب خاک در عمق‌های مختلف وارد شود (لازم به توضیح است که ذکر شود رطوبت اولیه به صورت نمونه برداری با اگر صورت گرفته است). که در این مطالعه براساس سطح ایستابی در نظر گرفته شد. در بخش توابع هیدرولیکی خاک نیز با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به بافت خاک در اعماق مختلف، چگالی ظاهری، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی، خاک منطقه به دو لایه ۳۰ سانتی‌متر و ۹۰ سانتی‌متر تقسیم گردید و هر کدام نیز به دو زیر لایه تقسیم شد، که دو زیر لایه ۱۰ سانتی متری و ۲۰ سانتی متری برای لایه اول و دو زیر لایه ۳۰ سانتی متری و ۶۰ سانتی متری برای لایه دوم در نظر گرفته شد.

با استفاده از اطلاعات ایستگاه هواشناسی باجگاه، فایل هواشناسی مقدار بارندگی، سرعت باد، تبخیر در دوره کشت طی سال‌های ۸۵-۱۳۸۴ و ۸۷-۱۳۸۶ تکمیل گردید. این فایل شامل بخش عمومی اطلاعات، بخش هواشناسی، بخش گیاهی، آب خاک، بخش زهکشی، معرفی شرایط مرزی و بخش چگونگی جریان بخار در خاک می‌باشد. در قسمت گیاهی دوره رشد را از شروع تا برداشت به صورت تاریخ میلادی و در بخش هواشناسی تاریخ‌های مربوط به استفاده از اطلاعات هواشناسی در طی دوره رشد استفاده می‌شود. در بخش زیر برنامه آبیاری، روزهای آبیاری به صورت میلادی و مقدار آبیاری به سانتی‌متر برای هر تیمار در نظر گرفته شد. در این تحقیق نوع آبیاری به صورت سطحی در نظر گرفته شد. در بخش



شکل ۱- آب موجود در ناحیه ریشه شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در طول دوره رشد در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده و آبیاری، بارندگی و نفوذ عمقی در ۵ تیمار با سری اطلاعات مستقل شعبانی ۱۳۸۵

جدول ۳- محاسبه شاخص‌های آماری برای آب خاک شبیه‌سازی شده در

مرحله واسنجی توسط مدل SWAP

تیمار	شاخص	
	ضریب تبیین	مجدور خطای نرمال شده
تیمار یک	۰/۶۴	۷/۷۰
تیمار دو	۰/۶۰	۱۲/۶۹
تیمار سه	۰/۶۰	۶/۰۲
تیمار چهار	۰/۵۳	۱۵/۲۸
تیمار پنج	۰/۶۰	۱۱/۰۴

نتایج و بحث

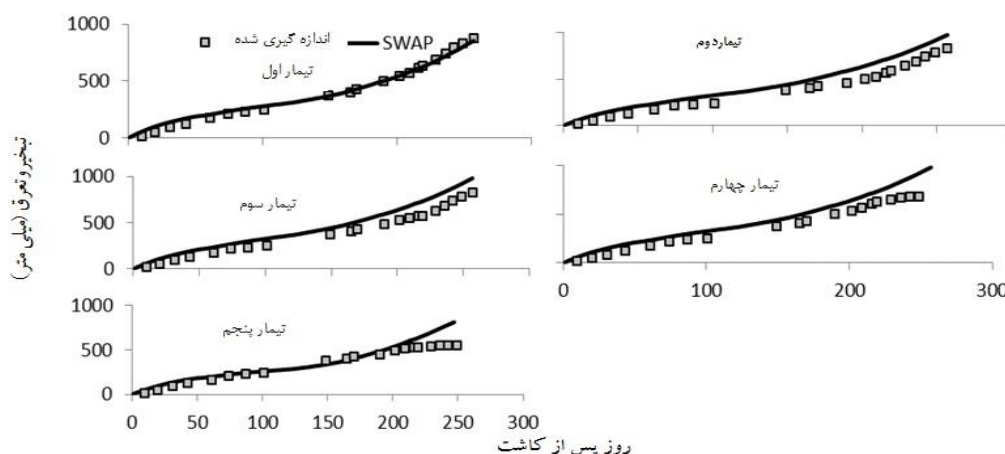
بوده است. دلیل آن هم می‌توان به استفاده مدل از معادله ریچاردز و ضرایبی مانند متنوع ارتباط داد. این ضریب با استفاده از ضریب اختلاف نمودار خشک شدن و تر شدن زمانی را که پدیده پسماند رخ می‌دهد مشخص می‌نماید. هم چنین مدل با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از معادله ونگنوختن بدست می‌آید، دقت زیادی در قسمت آب خاک نشان می‌دهد. در ادامه با استفاده از ضریب SWBOTB می‌توان شرایط مرزی پایین را انتخاب نمود. در نظر گرفتن عمق سطح ایستابی و یا زهکشی آزاد یکی از این موارد است که در این مطالعه سطح ایستابی در عمق ۸۰ متر استفاده گردید. نتایج معیارهای ارزیابی مدل در بخش شبیه‌سازی رطوبت در سایر تیمارها در جدول (۳) ارائه شده است.

نتایج مربوط به تبخیر و تعرق مدل در مرحله واسنجی

در مدل تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از معادله پنمن-مونتیث در فایل هواشناسی وارد گردید که در شکل (۲) تبخیر و تعرق تجمعی برای هر تیمار ارائه شده است. اطلاعات مربوط به تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از معادله بیلان آبی از مزرعه بدست آمده است.

با محاسبه خطای نرمال شده و ضریب تعیین مشاهده می‌شود که مدل تبخیر و تعرق تیمار شاهد را به خوبی پیش‌بینی نموده است اما در ادامه تیمارهایی که تحت تاثیر تنش قرار گرفتند دارای دقت کمتری می‌باشند دلیل آن هم می‌توان به ضعف مدل در استفاده از پارامترهای تبخیر آب از خاک اشاره نمود که سبب می‌شود در شرایطی که آب موجود در ناحیه ریشه کاهش می‌یابد، رطوبت هم چنان بالا بماند. از جمله ضرایبی که در این قسمت استفاده می‌شود می‌توان به ضریب مربوط به اختصاص تبخیر پتانسیل از تبخیر و تعرق مرجع اشاره کرد که با استفاده از روش داری برای کاهش تبخیر از سطح خاک به کار برده شده است. نتایج مربوطه در جدول (۴) آمده است.

مدل SWAP شبیه‌سازی را براساس روز رشد و روز درجات رشد انجام می‌دهد ولی مراحل رشد را از جوانه‌زنی تا گلدهی و گلدهی تا رسیدن در نظر می‌گیرد. در این مطالعه دمای تجمعی تا گلدهی و تا رسیدگی دانه ۱۰۵۰ و ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد در حالی که در تحقیقی مشابه برای گندم به ترتیب ۱۳۰۰ و ۷۵۰ ارائه شد (شیرشاهی و همکاران، ۱۳۹۲). هم‌چنین مدل این امکان را به کاربر می‌دهد تا با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر عمق ریشه دقت شبیه‌سازی را افزایش دهد که در این پژوهش زهکشی آزاد به عنوان شرایط مرزی پایین انتخاب شد. در این مدل اعمال تنش‌های آبی مربوط به فایل hupsel.SWP می‌باشد. البته دقت مدل برای در نظر گرفتن دوره‌های رشد مناسب نمی‌باشد از همین رو واسنجی آن دشوار است. لذا از ضرایب مربوط به بخش آب‌خاک استفاده شد. در قسمت بعد ضریب مربوط به میزان به دست آوردن تبخیر از تبخیر و تعرق مرجع برابر ۰/۹ در نظر گرفته شد. در بخش‌های بعدی با تعریف لایه‌های خاک و در نظر گرفتن پارامترهای محاسبه شده با استفاده از برنامه RETC که در جدول (۱) نشان داده شد شرایط هیدرولیکی خاک منطقه برای مدل تعریف و پدیده پسماند مربوط به منحنی خشک‌شدن در نظر گرفته شد. هم‌چنین ضریب مربوط به تفاوت منحنی ترشونده و خشک شونده در پدیده پسماند که مربوط به اختلاف منحنی ترشدن و خشک‌شدن می‌باشد در مرحله واسنجی برابر با ۰/۲ گردید. در نهایت با در نظر گرفتن این ضرایب مقدار آب موجود در ناحیه ریشه و محصول شبیه‌سازی شد که در شکل (۱) مقدار آب شبیه‌سازی شده در ناحیه ریشه توسط مدل و مقدار بارندگی، آبیاری و نفوذ عمقی در تیمارها نشان داده شده است. در این شکل تیمار اول تا پنجم معرف تیمار اول تا پنجم می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود مدل دقت بالایی در شبیه‌سازی آب خاک دارد. در تیمار شاهد در شرایطی که رطوبت در کل دوره رشد نسبت به سایر تیمارها بیشتر است مدل دارای عملکرد قابل قبولی



شکل ۲- تبخیر و تعرق تجمعی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در طول دوره رشد برای ۵ تیمار برای گیاه کلزا با سری اطلاعات مستقل شعبانی (۱۳۸۵)

گونه‌ای بود که در تمام تیمارها تا اواخر مهرماه به مقدار مساوی آب در اختیار گیاه قرار گرفت و آبیاری تا اواخر بهمن ماه قطع شد و مجدد آبیاری تا انتهای دوره رشد صورت گرفت و زمان‌هایی که گیاه به مرحله‌ای از رشد می‌رسید برای اعمال تنش آبیاری قطع می‌گردید. بنابراین این امکان وجود دارد که مدل و برنامه آبیاری در تیماردوم همخوانی نداشته است که منجر به شبیه‌سازی ضعیف‌تری شد. لذا در کل می‌توان گفت مدل به جز تیمار دوم در شبیه‌سازی آب‌خاک قابل اعتماد است.

ارزیابی نتایج مربوط به تبخیر و تعرق مدل

در مرحله اعتبارسنجی با توجه به شکل (۴) و نتایج به دست آمده از تبخیر - تعرق مشخص می‌گردد که در تیمار یک، سه و چهار مدل دقت خوبی نسبت به سایر تیمارها دارد علت آن هم می‌توان به عدم به کارگیری پارامترهای مناسب برای تعریف دوره‌های مختلف رشد به مدل ذکر کرد (جدول ۷). همچنین می‌توان بیان کرد که مدل تا زمانی که در شرایط رطوبتی مناسبی از رشد برخوردار است دقت مناسبی در روند شبیه‌سازی از خود نشان می‌دهد ولی در شرایطی که آب کافی در اختیار گیاه نیست (تیماردوم)، مدل با خطاهایی روبرو می‌شود. در تحقیقی مشابه مسعودی و همکاران (۱۳۹۰) نیز به این نتیجه دست یافتند.

نتایج مربوط به واسنجی عملکرد دانه و ماده خشک مدل
با تشکیل فایل هواشناسی، فایل گیاهی و فایل Hupsel عملکرد و ماده خشک محصول نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. هر چند به دلیل پارامترهای ورودی زیاد، واسنجی مدل دشوار می‌باشد اما نتایج ارائه شده در جدول (۵) نشان داد که مدل از دقت خوبی (با خطای نرمال شده برابر ۸/۰۸) در بخش شبیه‌سازی عملکرد دانه و ماده خشک برخوردار است.

نتایج مربوط به مدل در مرحله ارزیابی

به منظور اعتبارسنجی مدل بدون تغییر ضرایب، مدل بر اساس اطلاعات سال دوم (۸۷-۱۳۸۶) اجرا گردید که در شکل (۳) نتایج آب خاک مربوطه ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی آب خاک با دقت عمل نموده و در تمامی تیمارها نتایج قابل قبول است. در جدول (۵) نتایج مربوط به محاسبه شاخص‌ها آمده است. جدول (۶) نشان می‌دهد آب موجود در ناحیه ریشه در تمام تیمارها با دقت خوبی شبیه‌سازی شده و تنها در تیمار دوم نتایج ضعیف می‌باشد (با خطای نرمال شده برابر ۲۲/۴). دلیل آن هم می‌توان به عدم همخوانی برنامه آبیاری با زمان بارندگی‌ها دانست که پیشنهاد می‌شود برای رفع این مشکل، از پارامترهای بیشتری در دوره‌های رشد در مدل استفاده گردد تا تسلط کاربر به کل دوره بیشتر شود. برنامه آبیاری تیمارها به

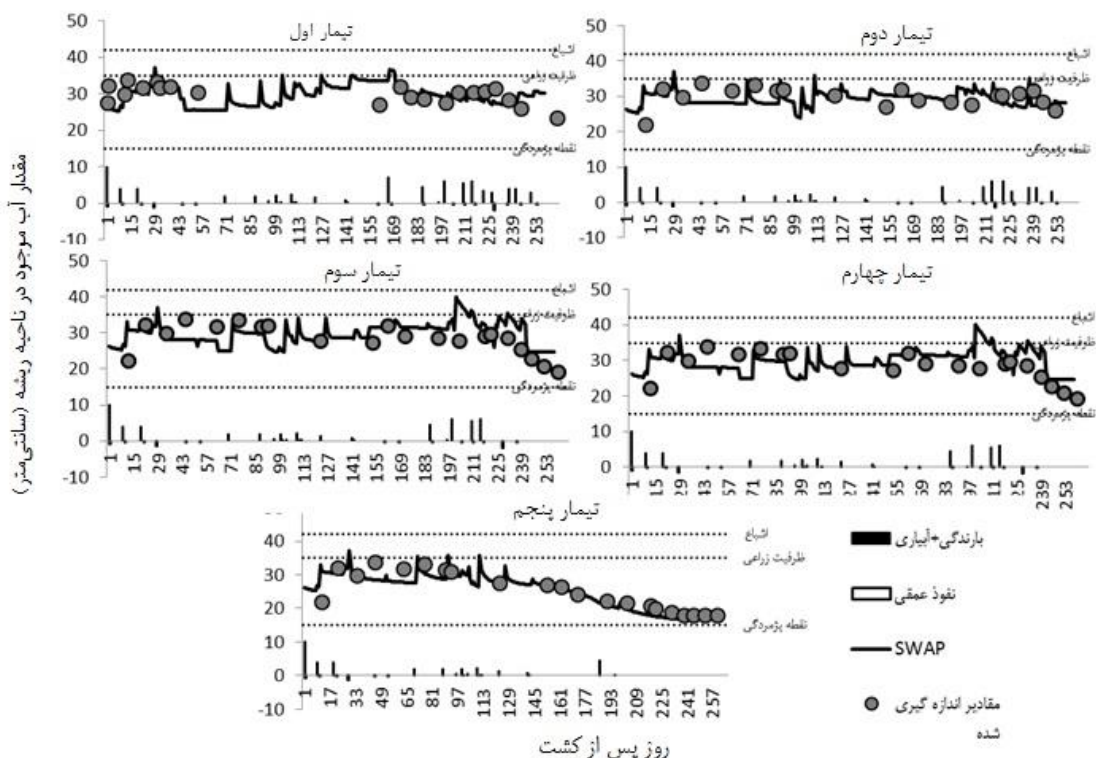
جدول ۴- نتایج مربوط به تبخیر و تعرق تجمعی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در مرحله واسنجی

تیمار	I1	I2	I3	I4	I5
خطای نرمال شده	۴/۱	۱۸/۶	۲۵/۹	۲۸/۸	۲۹/۰

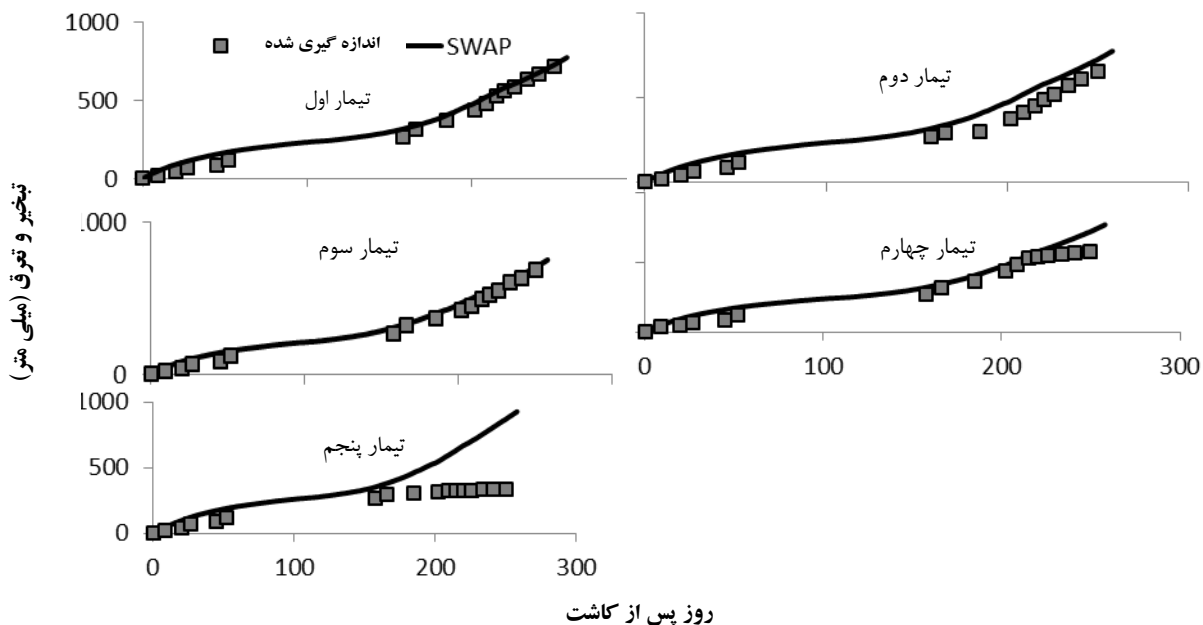
جدول ۵- عملکرد و ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و محاسبه شاخص‌های آماری گیاه کلزا در استان فارس با اطلاعات شعبانی (۱۳۸۵)

تیمار	عملکرد					ماده خشک				
	I1	I2	I3	I4	I5	I1	I2	I3	I4	I5
اندازه‌گیری شده (مگاگرم بر هکتار)	۳/۵۶	۳/۲۷	۳/۰۸	۲/۶۴	۰/۹۸	۸/۹۲	۹/۱۹	۷/۸	۸/۰۲	۳/۳۸
شبیه‌سازی شده (مگاگرم بر هکتار)	۳/۵۰	۳/۲۳	۲/۷۱	۲/۸۶	۱/۲۰	۸/۷۳	۸/۷۳	۷/۷۴	۸/۲۲	۳/۰۲
مجذور میانگین مربعات خطا	۰/۲۱							۰/۲۸		
خطای نرمال شده	۸/۰۸							۳/۸۵		
حداکثر خطا	۰/۱۷							۰/۲۵		
شاخص سازگاری	۰/۹۸							۰/۹۹		
ضریب تبیین	۰/۹۵							۰/۹۸		

موسوی زاده و همکاران: شبیه‌سازی عملکرد دانه و ماده خشک کلزا در...



شکل ۳- آب موجود در ناحیه ریشه شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در طول دوره رشد در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده و آبیاری، بارندگی و نفوذ عمقی در پنج تیمار با سری اطلاعات مستقل ثابت ۱۳۸۸



شکل ۴- تبخیر و تعرق تجمعی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP در تیمارهای مختلف در طول دوره رشد گیاه کلزا ارزیابی با سری اطلاعات مستقل ثابت (۱۳۸۸)

جدول ۶- محاسبه شاخص‌های آماری برای آب‌خاک شبیه‌سازی شده در مرحله ارزیابی توسط مدل SWAP

تیمار	شاخص		
	مجدور خطای نرمال شده	مجدور میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین
I1	۵/۰۸	۱/۵۴	۰/۵۶
I2	۲۲/۳۶	۶/۶۹	۰/۵۶
I3	۱۰/۲۶	۲/۹۸	۰/۶۴
I4	۹/۸۵	۲/۸۳	۰/۳۴
I5	۹/۶۴	۲/۴۵	۰/۸۶

جدول ۷- محاسبه مجدور خطای نرمال شده تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده برای ۵ تیمار در طول دوره رشد گیاه کلزا

تیمار	I1	I2	I3	I4	I5
مجدور خطای نرمال شده	۹/۹۶	۲۳/۱	۹/۹۱	۱۸/۳۵	۳۰/۳

جدول ۸- عملکرد و ماده خشک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و محاسبه شاخص‌های آماری گیاه کلزا در استان فارس با اطلاعات ثابت (۱۳۸۸)

تیمار	عملکرد					ماده خشک				
	I1	I2	I3	I4	I5	I1	I2	I3	I4	I5
اندازه‌گیری شده (مگاگرم بر هکتار)	۳/۵۸	۲/۶۶	۲/۹۸	۳/۰۵	۰/۷۵	۷/۳۵	۵/۲۱	۷/۲۲	۵/۹۸	۲/۴۵
شبیه‌سازی شده (مگاگرم بر هکتار)	۳/۳۶	۲/۳۶	۲/۷۱	۲/۴۵	۰/۴۰	۷/۰۸	۶/۰۸	۷/۹۰	۶/۱۰	۳/۱۰
مجدور میانگین مربعات خطا	۰/۳۷							۰/۶۱		
مجدور خطای نرمال شده	۱۴/۲۲							۱۰/۸۲		
حداکثر خطا	۰/۲۸							۰/۵۵		
شاخص سازگاری	۰/۹۷							۰/۹۷		
ضریب تبیین	۰/۹۸							۰/۹۷		

است. در واقع می‌توان اینطور بحث نمود که مدل با قابلیت در نظر گرفتن زهکشی آزاد و ضریب اختلاف منحنی ترشونده و خشک شونده در بخش آب، توانست دقت شبیه‌سازی را برای رطوبت بالا ببرد که همین عامل سبب شد در کل نتایجی با رضایت‌مندی مناسب به‌دست آید.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل SWAP در شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا در منطقه باجگاه در دو سال ۸۵-۱۳۸۴ و ۸۷-۱۳۸۶ می‌توان نتیجه گرفت که مدل در شبیه‌سازی آب‌خاک

نتایج مربوط به ارزیابی عملکرد دانه و ماده خشک مدل

نتایج عملکرد و ماده‌خشک شبیه‌سازی شده در جدول ۸ نشان می‌دهد که مدل توانسته عملکرد و ماده خشک گیاه کلزا را با دقت خوبی شبیه‌سازی نماید. در تحقیق‌های مشابه نیز این مدل عملکرد گیاه جو و پنبه و آفتابگردان را حدود ۱۰ تا ۱۸ درصد (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹)، ذرت علوفه ای و گندم را حدود ۱۳ تا ۲۰ درصد (نوری و همکاران^{۲۶}، ۲۰۱۱) بیشتر از واقعیت برآورد کرده است و این در حالی است که در این تحقیق مجدور خطای نرمال شده حدود ۱۴ درصد برای عملکرد بدست آمده

تبخیر و تعرق ضریب مربوط به میزان به دست آوردن تبخیر از تبخیر و تعرق مرجع در مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که برای تمام مراحل رشد ثابت فرض می‌گردد. این عامل سبب شد نتایج در تمام تیمارها به جز تیماردیم مطلوب باشد. اما ضرایبی که در بخش آب خاک مدل ارائه شد توانست توانایی مدل را در شبیه‌سازی مناسب این بخش به خوبی نمایش دهد.

در طول دوره رشد از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. در مدل‌های گیاهی باید از پارامترها به گونه‌ای استفاده شود تا کاربر بتواند به تمام مراحل رشد تسلط یابد که با استفاده از اطلاعات مناسب حاصل از کشت کل مراحل مختلف رشد مانند رشد رویشی مجدد در بهار، پرشدن دانه و گل‌دهی و یا مراحل تأثیرگذار برای گیاهان دیگر، را شبیه‌سازی نماید. در این مطالعه نیز در قسمت مربوط به

منابع

- ۱- بابازاده، ح. و م. سرائی تبریزی. ۱۳۹۱. واسنجی مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب سویا، مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری (۴): ۹۳-۸۶.
- ۲- بادیه نشین، ع.ر.، نوری، ح. وظیفه‌دوست. ۱۳۹۳. بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، (۴): ۳۸۸-۳۷۹.
- ۳- ثابت، ع. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه کلزا بوسیله مدل‌های گیاهی CropSyst و CRPSM تحت تیمارهای تنش آبی در مراحل مختلف رشد، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ۱۹۸ صفحه.
- ۴- رادسر، ع. و ش. زندپارسا. ۱۳۸۵. اصلاح مدل ونگنختن - معلم درپیش‌بینی توابع هدایت هیدرولیکی رطوبت خاک و مقایسه نتایج آن و دیگر مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده در برخی از خاک‌های موجود در بانک اطلاعاتی UNSODA، اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز. اریبهشت ماه.
- ۵- زندپارسا، ش. ۱۳۸۱. آینده مدل‌های کامپیوتری رشد گیاهان، سمینار دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- ۶- شعبانی، ع. ۱۳۸۵. بررسی اثر تنش آبی در مراحل مختلف رشد بر گیاه کلزا. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ۲۱۳ صفحه.
- ۷- شیرشاهی، ف.، بابازاده، ح.، کاوه، ف.، امیری، ا. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل SWAP در شرایط مدیریت آبیاری گندم (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی سد درودزن). دومین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا، کرمان - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.
- ۸- فولادمند، ح. و ع.ر. سپاسخواه. ۱۳۸۶. تجزیه و تحلیل مدل بیان آب خاک برای انگور دیم در ریز حوضه‌های کشت، مجله علوم کشاورزی ایران، (۱۳): ۹۴-۸۵.
- ۹- مسعودی، ع.ر.، شاهرخیان قهفرخی، ز.، کریمی، ع.ر. و ف. میرزایی اصل. ۱۳۹۰. اعمال مدیریت‌های آبیاری تحت سناریوهای SWAP. نخستین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی، تهران، دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری، ۱۹ صفحه.
- ۱۰- موسوی‌زاده، س.ف. ۱۳۹۳. ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری بر تولید کلزا با استفاده از مدل AquaCrop. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ۱۹۸ صفحه.
- ۱۱- وردی نژاد، و.ر.، سهرابی، ت.، فیضی، م.، حیدری، ن. و ش. عراقی نژاد. ۱۳۸۹. الگوبندی عملکرد محصولات مختلف در شرایط شوری آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP. مجله دانش آب و خاک. (۲۰): ۱۱۱-۹۷.
- ۱۲- هنر، ت.، ثابت سروستانی، ع.، کامگارحقیقی، ع.ا. و ش. شمس. ۱۳۹۰. واسنجی مدل گیاهی CropSyst جهت تخمین عملکرد و شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا، نشریه آب و خاک، (۳): ۶۰۵-۵۹۳.
- 13- Bonfante, A. Basil, A. Acutis, M. De Mascellis, R. Manna, P. Perego, A., and F. Terribile. 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in northern Italy. *Agricultural Water Management*, 97: 1051-1062.
- 14- Droogrs, p., Bastiaanssen, W., Beyazagul, M., Kayam, Y., Kite, G. and H. Murray-Rust. 2000. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in western Turkey. *Agricultural Water Management*, 43(2): 183-202.

- 15- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 189 p.
- 16- Huygen, J. Van Dam, J.C. Kroes, J. and C. Wesseling. 1997. SWAP 2/0: Users guide: Input and output manual. Wageningen Agricultural University and DLO, Staring Centrum Wageningen, 211 p.
- 17- Javidfar, F. Talebnezhad, A. Paseban Islam, B. Shariaty, A. Yazdandost, M. Khiavi, M. Naser Ghadimi, F. Hashemi Jezi, M. and A. Falah Tosi. 2004. Evaluation of advanced rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties in adaptability to cold and temperate regions. Publication of Annual Rapeseed and Safflower Congress, Seed and Plant Improvement Institute, Oilseeds Research Division, Karaj, Iran.
- 18- Kabat, P. Broek, B.J. van dem, J.C. and R.A. Feddes. 1992. SWACROP: A water management and crop production simulation model. ICID Bulletin. 92, 41(2): 61-84.
- 19- Kroes, J. and J. Van Dam. 2003. Reference manual SWAP version 3.0.3. Alterra, Green World Research, Wageningen, Available at: www.alterra.nl/models/swap, 284 p.
- 20- Kroes, J. van Bakel, P.J.T. Huygen, J. Kroon, T. and R. Pastoors. 2001. Actualization van de hydrologie voor STONE 2.0. Rapport 298, Alterra, Wageningen, 68 p.
- 21- Kumar, P., Sarangi, A. Singh, D.K. Parihar, S.S. and R.N. Sahoo. 2015. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. *Agricultural Water Management*, 148: 72-83.
- 22- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resource. Res.*, 12: 513-522.
- 23- Noory, H. Van Der Zee, S. E. Liaghat, A.T.M. Parsinejad, A. and J. C. Van Dam. 2011. Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir Irrigation and Drainage Network in Northern Iran. *Agricultural Water Management*, 98(6): 1062-1070.
- 24- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5): 318-333.
- 25- Sepaskhah, A. R. Saadi, S. and Sh. Zand parsia. 2011. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management. *Agricultural Water Management*, 99: 51-57.
- 26- Utset, A. Velicia, H. Rio, B. and R. Morillo. 2007. Calibrating and validating an agro hydrological model to simulate sugarbeet water use under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*. 94: 11-21.
- 27- Van Dam, J.C. Huygen, J. Wesseling, J.G. Feddes, R.A. Kabat, P. Van Walsum, P.E.V. Groenendijk, P. and C.A. van Diepen, 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil Water Atmosphere Plant environment. Wageningen University and Alterra, Technical Document 45.
- 28- Van Den Broek, B.J. Van Dam, J.C. Elbers, J.A. Feddes, R.A. Huygen, J. Kabat, P. and J.G. Wesseling, 1994. Input instructions manual. Report 45, Dep. Water Resources, Wageningen Agricultural University.
- 29- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44 (5): 892-898.
- 30- Van Genuchten, M.Th. Leij, F.J. and S.R. Yates, 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions for unsaturated soils. U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California, 93 p.