Gonbad Kavous University
Journal of New Approaches in
Water Engineering and Environment
Volume 2, Issue 1

Evaluation of CropSyst model in simulation of *Alvand* variety of wheat

Rezvan Yazdani[1] , Homa Razmkhah[2*], Alireza Fararouie[3], Amin Rostamin Ravari[4]

[1] Graduated Master student, Department of Water and Science Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
[2] Assistant professor, Department of Water and Science Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
[3] Assistant professor, Department of Water and Science Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
[4] Assistant professor, Department of Water and Science Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.
Received:13.03.2023; Accepted:17.06.2023

Abstract

Crop modeling as an important tool in the evaluation of product performance under complicated interaction of water, climate, soil, and plant, can be used to determine the optimum date of cultivation, irrigation regime, fertilizer amount, salinity management, and crop productivity. The purpose of this study was to investigate CropSyst model accuracy in simulating winter *Alvand* variety of wheat grain yields under different irrigation regimes. In this study, the CropSyst model was calibrated and evaluated for winter *Alvand* variety of wheat in the Eghlid region, Fars Province, under different irrigation treatments of 50, 75, and 100% of the field capacity. The agreement coefficient and normalized mean square error of calibrated model using Presley-Taylor evapotranspiration (ET) equation were 0.97, 11.4. The performance of the CropSyst was acceptable. Different irrigation regimes resulted in the difference in product performance and the min performance was obtained from the 50 percent regime. The productivity was different every year and the maximum yield was gained from 100% irrigation regime. Simulation error was minimum at 100% regime. Time of maturity was increased from 100 to 75 and 50% regime. Maximum of dry biomass and performance (ton/hectare) was obtained in 100% irrigation regime, and the minimum was obtained from 75% irrigation regime in the third year, so the performance of 50% regime was more than 75% in the third culture year. It could be from the complicated interaction of water, climate, soil, and plant in different years. The CropSyst can be used for winter *Alvand* wheat production simulation under different irrigation regimes (with no fertilizer deficit and no salinity). The results of the study could be used in water and soil management during critical water resources conditions.

Keywords: CropSyst, Wheat product performance, Deficit irrigation, Alvand variety.

[*] Corresponding Author, Email: HomaRazmkhah@gmail.com

دانشگاه گنبد کاووس
نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست"
دوره دوم، شماره اول
http:// Nawee.gonbad.ac.ir

ارزیابی مدل CropSyst در تخمین عملکرد گندم رقم الوند تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری

رضوان یزدانی[1]، هما رزمخواه[2*]، علیرضا فارویی[3] ، امین رستمی راوری[4]

[1] دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
[2] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
[3] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
[4] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۳/۲۷

چکیده

مدل‌سازی رشد گیاه ابزار مهمی در ارزیابی عملکرد محصول می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان در انتخاب تاریخ کشت بهینه، مدیریت آبیاری، الگوی کشت و پیش‌بینی محصول بهره برد. CropSyst از جمله مدل های گیاهی است که می تواند با شبیه سازی واکنش محصول نسبت به تغییر پارامترهایی چون حجم آبیاری، متغیرهای اقلیمی، گیاهی و خاکی، به مدیریت بهتر مزرعه کمک کند. در این تحقیق، CropSyst در منطقه اقلید فارس، برای کشت گیاه گندم زمستانه رقم *الوند* تحت تیمارهای آبی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آب قابل دسترس گیاه، واسنجی و ارزیابی گردید. همچنین دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول توسط معادلات تبخیر و تعرق پنمن-مونتیث و پریسلی- تیلور مقایسه شد. تحلیل آماری نتایج شبیه‌سازی عملکرد گندم توسط مدل نشان داد که معادله پریسلی-تیلور نسبت به پنمن مونتیث از دقت بالاتری برخوردار است، اما تفاوت در حدی بود که آزمون F-test در سطح احتمال ۵٪ در واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی توسط دو روش تفاوت معنی‌داری نشان نداد. دقت واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی نیز قابل قبول بود. تغییر تیمار آبیاری سبب تفاوت مقدار عملکرد شد، بطوریکه کمترین در تیمار آبیاری ۵۰ درصد حاصل شد. عملکرد گیاه در سالهای زراعی مختلف متفاوت بود. بیشترین عملکرد دانه در هر دو روش تبخیر و تعرق، در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد بدست آمد. خطای شبیه سازی در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد در کلیه سالها، در هر دو روش تبخیر و تعرق، کمترین بود. با تغییر تیمار آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ و ۵۰ درصد مدت زمان پر شدن دانه افزایش یافت. در نظر گرفتن این زمان در برنامه ریزی های آبیاری ضروری است. بیشترین مقدار ماده خشک تولیدی و عملکرد (تن بر هکتار)، در هر دو روش تبخیر و تعرق، در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری در سال اول، و کمترین میزان در تیمار ۷۵ درصد در سال سوم حاصل شد. بنابراین مدل در سال سوم در تیمار ۵۰ درصد آبیاری، عملکردی بیشتر از ۷۵ نشان داد. این مساله می تواند به دلیل اندرکنش پیچیده شرایط توامان آب و عوامل اقلیمی بر خاک و گیاه باشد. نتایج حاصل قابل استفاده در مدیریت منابع آب و خاک در شرایط بحران آب می باشد.

کلید واژه: CropSyst، عملکرد گندم، کم آبیاری، گندم رقم *الوند*.

* نویسنده مسئول، Email: HomaRazmkhah@gmail.com

مقدمه

ایران از لحاظ آب و هوایی جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود و منابع آبی یکی از عوامل محدودکننده در بخش کشاورزی می‌باشد. خشکسالی‌های پیاپی در دهه های اخیر از یک سو و عدم توجه به استفاده بهینه و بهره‌برداری صحیح آب از سوی دیگر، بحران آب در کشور را جدی نموده است (Boustani and Mohammadi, 2008). در الگوی فصلی بارندگی مدیترانه‌ای که شامل بسیاری از مناطق ایران نیز می‌شود، قسمت اعظم بارندگی در زمستان اتفاق می‌افتد و محصولات زراعی پائیزه معمولا از زمان گلدهی تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک با خشکی و کم‌آبی مواجه می‌شوند (Dastfal et al., 2009).

از سوی دیگر پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز تغییرات اقلیمی و گرم شدن هوا، موجب افزایش نیاز آبی گیاهان گردد که این مساله موجب محدودیت در استفاده از منابع آبی می‌گردد (Rabiee et al., 2013). در دهه‌های گذشته، مساله‌ی تخصیص بهینه آب از جمله تنگناهای مدیران منابع آب بوده است (Boustani et al., 2012). با توجه به محدودیت عرضه آب و افزایش تقاضای ناشی از رشد جمعیت، برنامه ریزی استفاده بهینه از منابع از اهمیت بسیاری برخوردار می باشد. بنابراین ضرورت استفاده از مکانیزم های مناسب و کاراتر از موارد ضروری تخصیص و بهره برداری از منابع آب به نظر می رسد (Nazarifar and Momeni, 2011). کم آبیاری نوعی روش بهره برداری است که بر مدیریت منابع آب، عملکرد و اقتصاد کشاورزی تاثیرگذار است (Haouari and Azaiez, 2001). کم آبیاری راهکاری بهینه برای کاشت محصولات تحت شرایط کمبود آب است.

امروزه دانش مدیریت در تلاش است که با کاربرد مدل‌های ریاضی، با ارائه الگوی بهینه کشت (Shabani and Honar, 2008)، مدیریت نهاده ها و زمان کشت با این بحران مقابله نماید. مدلها می توانند نقش مهمی در پیش بینی میزان عملکرد، دستیابی به پتانسیل تولید و تامین تقاضای غذایی جهانی داشته باشند (Aalaee Bazkiaei et al., 2021) و قابلیت تولید محصولات مختلف را تحت تاثیر خطرات اقلیمی پیش بینی کنند. در سال‌های اخیر مدل‌های گیاهی بسیاری توسعه داده شدند که در تعیین آبیاری بهینه بکار گرفته می‌شوند. از طرفی مطالعات مزرعه‌ای نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار است، درنتیجه بکارگیری مدل‌ها می‌تواند کارگشا باشد. روش‌های کمی پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد گیاه با استفاده از ضرایب ژنتیکی و متغیرهای محیطی، تعریفی از مدل گیاهی است (Monteith, 1996). این مدل‌ها از نظر ساختاری به دو گروه نظری و تجربی تقسیم می‌شوند. گروه اول بر اساس اصول فیزیکی و فیزیولوژیکی و گروه دوم بر پایه توابع حاصل از اندازه‌گیری صحرایی و یا آزمایشگاهی استوارند. معمولا مدل‌ها ترکیبی از هر دو گروه می‌باشند(Baker, 1996).

در اواخر دهه ۱۹۶۰ کامپیوترها به اندازه کافی تکامل یافته بودند تا به کاربران در تشریح پدیده‌های طبیعی کمک کنند. دی‌ویت یکی از اولین دانشمندانی بود که به توسعه شبیه‌ساز رشد ابتدایی گیاه پرداخت (Boogard et al., 1998).در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی، رشد این مدلها تسریع گردید. با گسترش و توسعه مدل‌های گیاهی، اثر مدیریت‌های آبی و زراعی مختلف، در جهت رسیدن به تولید حداکثر با مقدار بهینه آب و کود نیتروژن بررسی شد. مدل‌ها اطلاعات آب و هوا، خاک و گیاه دریافت می‌کند و در نهایت مقدار محصول، مقدار آب خاک، آبشویی نیتروژن و غیره را پیش‌بینی می‌کنند. شبیه‌سازی عملکرد محصول اجازه می‌دهد تا برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت کارآمد تحت ورودی‌های محیطی مختلف مثل آب و کاربرد نیتروژن انجام شود (Yazdani, 2015).

مدلها رشد قابل ملاحظه ای داشته اند و البته هر یک دارای مزایا و محدودیتهایی است. تلاش برای رفع محدودیت مدلها منجر به توسعه مدل رشد گیاهی CropSyst گردید. این مدل با توجه به مفاهیم مدل EPIC طراحی شد، اما از روش جامع تری برای شبیه سازی رشد گیاه و اثر متقابل آن با محیط استفاده می کند. این مدل موازنه آب خاک، موازنه نیتروژن گیاه-خاک، فنولوژی محصول، تولید و تجزیه باقیمانده گیاهی، فرسایش آبی خاک و شوری را شبیه سازی می کند (Nazarifar and Momeni, 2011). CropSyst که به‌طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته (Confalonieri and

(Bocchi, 2005)، براساس روند رشد، شبیه‌سازی را انجام داده (Stockle et al., 2003; Stockle and Nelson, 1999) دیدگاه یکسانی برای رشد و توسعه گیاهان علفی استفاده می کند.

با انجام ساده‌سازی‌هایی در تشریح برخی فرآیندها (مانند شاخص سطح برگ ثابت و عدم جزءبندی یکسان روزانه) در مدل، واسنجی آن راحت‌تر شد و پارامترهای گیاهی مدل نیز کاهش یافت (Confalonieri and Bechini, 2004). رشد بیوماس در CropSyst ابتدا بدون تنش و بر اساس تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه و مقدار تابش فعال فتوسنتزی روزانه محاسبه می شود. سپس رشد پتانسیل با محدودیت های آبی و نیتروژن تصحیح می شود تا مقدار واقعی بیوماس تعیین شود (Nazarifar and Momeni, 2011). بنابراین امکان شبیه سازی عملکرد تحت محدودیت های مذکور را فراهم می آورد.

در زمینه بررسی تاثیر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاهان تحقیقات عملی و شبیه سازی کامپیوتری مختلفی انجام شده که ابتدا اشاره ای به برخی تحقیقات تاثیر مدیریت آبیاری بر کشت گیاه گندم در مزرعه خواهیم داشت. Zhang and Oweis (1999) در تحقیقی ۱۰ ساله، برنامه‌ریزی آبیاری گندم بر اساس تامین ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب مورد نیاز در شرایط مختلف آب و هوایی را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که با کاهش بیش از ۵۵ درصد رطوبت قابل استفاده خاک، شرایط بروز تنش خشکی و کاهش معنی‌دار عملکرد محصول فراهم می‌گردد. میزان محصول دانه با افزایش آب مصرفی (آبیاری و بارندگی) تا میزان ۴۵۰ میلی‌متر افزایش خطی داشت و پس از آن با افزایش تا ۶۰۰ میلی‌متر شیب افزایش محصول کندتر گردید. Panda et al. (2003) مدیریت آب آبیاری را برای گندم بررسی کردند. در این مطالعه ۵ سطح از تخلیه رطوبت قابل دسترس خاک (۱۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵٪) بررسی شد. بیشترین کارایی مصرف آب در برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس تخلیه ۴۵٪ حاصل شد.

Li et al. (2004) اثر آبیاری و کود را بر کارایی مصرف آب و عملکرد محصول گندم بهاره در یک منطقه نیمه خشک بررسی کردند. مطابق با نتایج کارایی مصرف آب و عملکرد، با افزایش کود مصرفی افزایش یافت. Montajami and Vaziri (2004) اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد دانه، کاه، وزن هزاردانه، درصد پروتئین دانه و کارایی مصرف آب گندم رقم مهدوی در گلپایگان را به صورت طرح بلوک های کامل تصادفی مورد بررسی قرار داد. در شرایط آزمایش آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر از تشت، با مصرف حدود ۶۴۲۰ متر مکعب آب در هکتار در ۹ نوبت آبیاری شامل خاک آب و پی آب با تولید ۷۸۲۵ کیلوگرم دانه و ۱۳۶۲۵ کیلوگرم کاه در هکتار مناسبترین تیمار بود. در این تیمار کارایی مصرف آب بدون احتساب بارندگی برای تولید دانه برابر ۱/۲۲ و برای کاه برابر ۲/۱۱ کیلوگرم به ازای هر متر مکعب آب آبیاری بود.

Sepaskhah et al. (2006) مقدار بهینه آب آبیاری و نیتروژن کاربردی را برای گندم زمستانه، با در نظر گرفتن بارندگی فصل رشد در یک منطقه نیمه خشک تعیین کردند. در تحقیق دیگری روابط آب و نیتروژن برای رشد و بهره‌وری گندم تحت شرایط کاشت دیر هنگام در یک منطقه نیمه خشک بررسی شد. بیشترین نرخ افزایش وزن خشک دانه‌ها ۵۳ کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلیمتر آب مصرفی در دوره ۹۰-۶۰ روز بعد از کاشت بدست آمد. در این دوره بیشترین نرخ افزایش ماده خشک ۷۱ کیلوگرم در هکتار به ازای هر کیلوگرم نیتروژن جذب شده بدست آمد (Kibe et al., 2006). Akbari et al. (2009) تاثیر برنامه‌ریزی آبیاری (زمان و میزان آب) را بر بهره‌وری آب کشاورزی در شبکه آبشار اصفهان بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضمن کاهش ۲۰ درصد میزان آب آبیاری، عملکرد محصول ۱۶ درصد و بهره‌وری مصرف آب ۴۵ درصد افزایش یافته است.

در زمینه مدلسازی گیاهی توسط نرم افزارها می توان به تحقیق Punnkuk et al. (1998) اشاره کرد که مدل CropSyst را برای گندم بهاره و زمستانه در شرق واشنگتن مورد واسنجی و ارزیابی قرار داده، پارامترهای میزان محصول، تبخیر و تعرق و درصد رطوبت پروفیل خاک را بررسی نمودند. مقادیر RMSE مربوط به پارامترها، به ترتیب در بازه‌های۱۴-۷ ، ۹-۵ و ۱۷ درصد قرار داشتند، که نشان دهنده کارایی بالای CropSyst

بود. Stockle et al. (2003) عملکرد مدل را با استفاده از ET و زیر مدل‌های انتقال آب خاک در سطوح مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. شبیه‌سازی شامل تولید ماده خشک، عملکرد دانه و آب مورد استفاده گیاهان ذرت غیر دیم، سویا و سورگوم، در مقایسه با داده‌های آزمایشی جمع‌آوری شده در کشور فرانسه بود. گیاهان تحت آبیاری کامل، کم‌آبیاری و بدون آبیاری کشت شدند. براساس شاخص ویلموت (۰/۹۵۶ تا ۰/۹۹۷)، عملکرد مدل در گستره وسیعی از آب قابل استفاده و در شرایط تنش، مناسب ارزیابی شد.

Mohseni et al. (2009) مدل CropSyst را در شبیه سازی اثر توام آب و نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم در یک منطقه خشک ارزیابی کردند. نتایج نشانگر عملکرد مطلوب مدل در شبیه سازی دانه، با RMSE معادل ۰/۴۱، ۰/۳۳، ۰/۳۱ تن در هکتار در سه فصل رشد بود. تخمین ماده خشک نیز با مقادیر R^2 بزرگتراز ۰/۸ و شاخص مطابقت ویلموت ۰/۹ برای کلیه تیمارها، رضایت بخش بود. مقایسه مقادیر بهره‌وری آب شبیه‌سازی و واقعی نشان داد که برآوردها در تیمارهای تحت تنش آبی، اختلاف بیشتری با مقادیر واقعی دارند. Todorovic et al. (2009) دو مدل CropSyst و WOFOST را با AquaCrop در منطقه حاره‌ای مدیترانه در جنوب ایتالیا، در کشت آفتابگردان تحت سه تیمار آبیاری‌کامل، کم‌آبیاری تنظیم شده و بدون‌آبیاری (دیم) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که AquaCrop زیست توده و عملکرد را در مرحله برداشت، مشابه با دو مدل دیگر شبیه سازی می کند.

در مطالعه دیگری در شمال ایتالیا توانایی مدل های CropSyst، SWAP و MACRO در پیش‌بینی آب‌خاک در دو نوع خاک سنگین و لوم ریز شنی مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی توزیع مجدد آب از معادله ریچاردز استفاده شد. سه مدل مذکور کارایی خوبی از خود نشان‌دادند (Bonfante et al., 2010). در تحقیق دیگری Confalonieri (2010) به آنالیز حساسیت (برپایه واریانس) دو مدل CropSyst و WOFOST پرداختند. سناریوی تعریف شده براساس شبیه‌سازی برنج تحت آبیاری غرقاب در شمال ایتالیا صورت گرفت. در این مطالعه از روش موریس استفاده شد، که در آن میزان تاثیرگذاری پارامترهای ورودی بر متغیرهای خروجی مدل مشخص می‌گردد. مطابق با نتایج ۷ مورد از ۳۴ پارامتر بررسی شده مدل WOFOST، و ۳ مورد از ۱۵ پارامتر CropSyst، شامل ضریب تعرق ماده خشک بالای سطح زمین، دمای پایه و ضریب خاموشی پوشش گیاهی، بر ۹۰ درصد از تغییرپذیری خروجی‌ها موثر بودند. در شرایط عدم محدودیت آب و مواد مغذی، ضریب تعرق ماده خشک روی زمین در مدل CropSyst ، نسبت به دیگر پارامترها نتایج مشابهی نشان نداد و تاثیر این سه پارامتر به‌عنوان پارامترهای حساس یکسان نبود. درحالیکه که در پارامترهای WOFOST، اختلاف چشمگیری دیده نشد.

Nazarifar and Momeni, (2011) تحقیقی در زمینه تعیین سطوح مناسب کم‌آبیاری در محصولات محدوده شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران صورت داده، از توانایی‌های مدل CropSyst، جهت تعیین الگوی کشت مناسب استفاده کردند. نتایج نشان داد که اعمال کم-آبیاری ۱۰٪ در باقلا، سیب زمینی و لوبیا، ۲۰٪ در آفتابگردان و ۳۰٪ در گندم مناسب است. Dastmalchie et al. (2012) با هدف پیش‌بینی نمو، رشد و عملکرد گندم، توانایی CropSyst را در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک روز گرده‌افشانی، روز رسیدگی، تولید ماده خشک در گرده‌افشانی و رسیدگی شاخص سطح برگ در گرده‌افشانی، تجمع نیتروژن در گرده‌افشانی و رسیدگی و عملکرد دانه مورد ارزیابی قرار دادند. مقدار RMSE برای شاخص سطح برگ در گرده افشانی ۱/۲ بدست آمد. برای سایر ویژگی‌های نمو و رشد نیز پیش‌بینی‌های مدل مناسب بودند. Saadati et al, (2013) برای شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج محلی، تحت پنج رژیم آبیاری شامل غرقاب دائم، صفر، سه، شش و نه روز پس از ناپدید شدن آب از سطح زمین، در رشت از CropSyst استفاده کرد. نتایج نشان داد که درسطح اطمینان ۹۹ درصد، اختلاف معناداری در شبیه سازی عملکرد دو رقم بینام و حسنی دیده نشد. شاخص‌های آماری دقت شبیه‌سازی مدل را تایید نمود.

Ansari et al. (2019) به ارزیابی دو مدل AquaCrop و CropSyst در شبیه سازی عملکرد و کارآیی مصرف آب

سیب زمینی پرداختند. در این تحقیق پنج سطح تنش آبی ۱۰۰، ۸۵، ۷۰٪ ۵۰ و ۳۰ درصد تامین نیاز آبی در سه دوره زمانی پس از کشت مورد بررسی قرار گرفت. اگر چه هر دو مدل دقت مطلوبی داشتند ولی AquaCrop کارایی بیشتری نشان داد. بر اساس نتایج، استفاده از AquaCrop در تنش های آبی خفیف (به دلیل شبیه سازی بهتر واکنش گیاه به آب جذب شده) و کاربرد CropSyst در تنش های شدیدتر (به دلیل استفاده از معادله مبتنی بر تابش) توصیه گردید. کاربرد CropSyst در مرحله میانی رشد سیب زمینی بهتر از AquaCrop بود. در مطالعه دیگری مدل AquaCrop برای شبیه سازی کلزا با اطلاعات کشت گیاه در منطقه باجگاه استان فارس، واسنجی و اعتبار سنجی گردید. در این تحقیق مقادیر آب خاک در ناحیه ریشه، تبخیر- تعرق، پوشش سبز، ماده‌خشک و عملکرد دانه واسنجی گردید. نتایج برای شبیه سازی عملکرد، قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به ماده خشک نشان داد (Mousavi Zadeh, 2014).

Sayyahi et al. (2020) به شبیه سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندرقند تحت تیمارهای مختلف آبیاری و دورهای مختلف آبیاری، با استفاده از مدل های AquaCrop و CropSyst پرداختند. نتایج نشان داد دقت مدل AquaCrop بهتر از CropSyst بود. Aalaee Bazkiaei et al. (2021) به ارزیابی و مقایسه Aquacrop و ORYZA2000 در شبیه سازی عملکرد برنج تحت مدیریت های زراعی مختلف پرداختند. طبق نتایج هر دو مدل دقت عملکرد بالایی در شبیه سازی عملکرد دانه و زیست توده در سطوح آبیاری و تاریخ کشت داشتند.

از کاربرهای دیگر مدلسازی شبیه سازی عملکرد گیاهان تحت شرایط تغییر اقلیم است. در این رابطه می توان به تحقیق Koocheki and Nassiri Mahallati (2016) اشاره نمود. در این تحقیق عملکرد ۴ گونه مهم زراعی در شرایط اقلیمی مدلسازی شده سال ۲۰۵۰ میلادی، شبیه سازی و با مقادیر کنونی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که میانگین عملکرد هر ۴ گونه تحت بررسی کاهش خواهد یافت، بطوریکه به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش دما در دوره، مقدار رشد بین ۹ تا ۱۱ درصد کاهش می یابد. Kamkar et al. (2022) به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات عملکرد و موازنه آب برنج در استان گیلان، با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند. بدین منظور با استفاده از مدل LARSWG داده های هواشناسی ۸۳ سال آینده تولید شد. تیمارهای مورد بررسی شامل چهار سطح آبیاری ۵۵،۷۰،۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی، همراه با سه تیمار تاریخ کشت بود. مطابق با نتایج، تحت سناریوهای اقلمی RCP4.5 و RCP8.5 بیشترین عملکرد دانه و زیست توده در آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تاریخ کاشت یکم اردیبهشت حاصل شد.

همانطور که ذکر شد در رشد گیاه عوامل متفاوتی از جمله دما، تاریخ کشت، میزان کود و آب مصرفی تاثیرگذار می‌باشد، که برای مطالعه اثرات این عوامل روی رشد نیاز به انجام تعداد زیادی مطالعه است. با توجه به افزایش جمعیت، نیاز به مواد غذایی و زمان بر بودن و هزینه بر بودن تحقیق های عملی در زمینه تاثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری بر عملکرد گیاه، مدل‌های گیاهی می تواند به عنوان ابزاری مناسب و کم هزینه در تعیین گزینه های مدیریتی بهینه کشت، موقر واقع گردد. این تحقیق با هدف واسنجی و اعتبار سنجی مدل CropSyst جهت کشت زمستانه گیاه گندم رقم الوند، و تعیین تیمار آبیاری بهینه از بین ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آب قابل دسترس، در منطقه اقلید با آب و هوای کوهستانی و خاک Silty clay loam، و پیش بینی مقدار عملکرد دانه ای و ماده‌خشک گندم تحت تیمارهای آبیاری مختلف با استفاده از CropSyst انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

مدل CropSyst

CropSyst یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه در مقیاس روزانه است که برای چندین نوع گیاه قابل کاربرد است. این مدلِ کاربر دوست به مدل دیگری به نام ClimGen که مدلی برای جمع‌آوری و تخمین داده‌های مربوط به آب و هوا می‌باشد، پیوست شده است. هدف از ارائه این مدل ایجاد یک ابزار تحلیلی برای بررسی اثر مدیریت سیستم‌های گیاهی بر تولید و محصول است. برای این منظور CropSyst، بیلان آب خاک، ماده خشک تولیدی، عملکرد دانه، فرسایش آبی و اثر آفت-

کش‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. این موارد با استفاده از داده‌های آب و هوا، مشخصات خاک و گیاه و گزینه‌های مدیریت سیستم گیاهی شامل، تناوب کاشت، رقم گیاه، آبیاری، کوددهی، کاربرد آفت‌کش، کیفیت آب آبیاری، عملیات خاکورزی و مدیریت بقایای گیاهی شبیه‌سازی می‌شوند.

مدل برای شبیه‌سازی رشد گیاه در واحد سطح مزرعه (مترمربع، m^2) به کار گرفته می‌شود. رشد در تمامی قسمت‌ها و اندام‌های گیاه شبیه‌سازی می‌شود. ادغام رشد اندام‌ها با استفاده از روش اولر[1]در گام‌های زمانی روزانه اجرا می‌شود. برای شبیه‌سازی انتقال آب دو روش در نظر گرفته شده است؛ یکی بر اساس حل معادله ریچاردز[2]با استفاده از روش تفاضل جزئی، و دیگری استفاده از دیدگاه حرکت آب مازاد بر ظرفیّت زراعی از لایه بالایی به لایه پایینی خاک (Cascading approach). بیلان آب خاک شامل بارندگی، آبیاری، رواناب، برگاب (Interception)، آب نفوذ یافته، توزیع مجدد آب در نیمرخ خاک، تعرّق گیاه و تبخیر است.

مدل CropSyst برای محاسبه تبخیر و تعرّق گیاه مرجع از دو روش پنمن-مانتیث[3]و روش پریستلی-تیلور[4] استفاده می‌کند. کاربر باید داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای محاسبه تبخیر و تعرّق گیاه مرجع را در مقیاس روزانه در مدل جانبی ClimGen وارد کند. این داده‌ها شامل حداکثر و حداقل دمای روزانه، بارش، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی روزانه، حداکثر و حداقل دمای نقطه شبنم، سرعت باد، تشعشع خورشیدی می‌باشند. مدل ClimGen با توجّه به اطلاعات جغرافیایی وارد شده توسط کاربر حداکثر تشعشع خورشیدی رسیده به جوّ زمین را محاسبه می‌کند.

روش پریستلی-تیلور

در روش پریسلی- تیلور تنها داده‌های ماکزیمم و مینیمم دما روزانه (c^0) و تشعشع خورشیدی (Mj/m^2) مورد نیاز است. معادله ۱ ، به معادله پریسلی- تیلور شناخته می‌شود.

$$RefEt_{Pot} = \frac{PT_c Slope_{vpf}.(Rad_{net} - SoilHeatFlux)}{Slope_{vpf} + \gamma} \quad (۱)$$

در معادله ۱، PT_c ، ثابت پریسلی تیلور می‌باشد و مقدار آن بین ۱ تا ۲ می‌باشد و برحسب kPa است. Rad_{net} تشعشع بر حسب $(MJ/m^2)/day$ است، Slopevef، شیب فشاربخار اشباع که تابعی از دماست و γ نیز ثابت سایکرومتریک بر حسب (kPa/C) و Soil heat flux فلاکس (جریان) حرارت در خاک بر حسب (MJ/m2)/ day می‌باشد.

رشد و تولید

مدل CropSyst مراحل رشد گیاه را بر اساس زمان حرارتی مورد نیاز برای هر مرحله شبیه‌سازی می‌کند. در این مدل چهار عامل می‌تواند رشد گیاه را محدود کند که عبارتند از: آب، نیتروژن، نور و دما. در مدل CropSyst، رشد روزانه گیاه به صورت افزایش در ماده خشک تولیدی بیان می‌شود. بر اساس معادله Tanner and Sinclair (1983) ماده خشک تولیدی در مقیاس روزانه از معادله ۲ قابل محاسبه است:

$$B_T = K_C \frac{T}{VPD} \quad (۲)$$

که در معادله ۲، B_T، ماده خشک تولیدی وابسته به تعرّق بر حسب $kg\ m^{-2}\ day^{-1}$، T، تعرّق واقعی گیاه بر حسب $kg\ m^{-2}\ day^{-1}$، VPD، میانگین روزانه کمبود فشار بخار بر حسب kPa و K_C، ضریب معادله بر حسب kPa می‌باشد. مقادیر گزارش شده ضریب K_C برای گیاه گندم بین ۲/۸ تا ۶/۷ کیلوپاسکال گزارش شده است، مقادیر پایین K_C زمانی اتفاق افتاده است که VPD کمتر از ۱ کیلو پاسکال بوده است (Kemanian et l., 2005). بر اساس روش تانر و سینکلر، روش دیگری برای محاسبه‌ی ماده‌ی خشک از تعرّق گیاه ارائه شده که در آن رابطه‌ی بازده تعرّق (Transpiration use efficiency) یا همان $\frac{B_T}{T}$ و VPD به صورت یک تابع توانی است (معادله ۳):

$$\frac{B_T}{T} = aVPD^b \quad (۳)$$

که در آن، a، بازده تعرّق گیاه بر حسب g BM/kg H_2O (گرم ماده‌ی خشک تولیدی به ازاء یک کیلوگرم آب تعرّق شده) است برای حالتی که VPD برابر kPa ۱

[1]Euler's method
[2]Richards equation
[3]Penman-Monteith
[4]Priestley-Taylor

باشد، b، توان معادله است که مقدار آن منفی می‌باشد. لازم به ذکر است که معادله(۳) معادله ای تجربی است و مقدار VPD در آن بر حسب kPa و مقدار گزارش شده‌ی ضرایب a و b برای آن ۰/۶- و ۰/۷۵- است (Yazdani, 2015). در مدل CropSyst کاربر می‌تواند به جای روش تانر و سینکلر از روش فوق که با عنوان روش منحنی بازده تعرّق شناخته می‌شود استفاده کند. در این حالت کاربر باید ضرایب a و b را به عنوان پارامترهای ورودی در مدل وارد کند.

معادله تانر و سینکلر در VPD پایین، ناپایدار است و در مقادیر VPD نزدیک به صفر، مقدار ماده خشک به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. برای رفع این مشکل از معادله Monteith (1977) استفاده می‌شود. این معادله که مقدار ماده خشک را بر اساس نور محاسبه می‌کند به صورت رابطه ۴ است:

$$B_L = eI_{PAR} \qquad (۴)$$

که B_L ماده خشک تولیدی وابسته به نور بر حسب $kg\ m^{-2}\ day^{-1}$، e بازده مصرف نور(Radiation use efficiency) بر حسب $kg\ MJ^{-1}$ و I_{PAR} مقدار روزانه تابش فعّال فتوسنتزی جذب شده توسط گیاه (Photosynthetically active radiation) بر حسب MJ m-2 day-1 می‌باشد. مدل CropSyst، برای هر روز شبیه‌سازی، حداقل مقادیر B_T و B_L را به عنوان ماده خشک تولید شده انتخاب می‌کند. در پژوهش‌های مختلف مقدار e به دو روش محاسبه شده است: یکی بر اساس تابش خورشیدی و دیگری بر اساس مقداری از تابش خورشیدی که در فتوسنتز گیاه شرکت می‌کند. در معادله‌ی ۴ مقدار e بر اساس تابش فعّال فتوسنتزی جذب شده توسط گیاه می‌باشد. برای گیاه گندم مقدار حداکثر e بر پایه‌ی تابش خورشیدی به $1/69\ g\ MJ^{-1}$ نیز می‌رسد (Yazdani, 2015). حداکثر مقدار e زمانی اتفاق می‌افتد که آب و نیتروژن مورد نیاز گیاه به صورت کامل تأمین شود و VPD پایین باشد. بنابراین تنش آبی و کودی از مقدار حداکثر e می‌کاهد. جهت بررسی بیشتر تئوری مدل می توان به Stockle et al. (1994) و Stockle et al. (2003) مراجعه نمود.

پارامترهای مدل

مهمترین و حسّاس‌ترین پارامترهای دخیل در شبیه‌سازی در فایل گیاهی یک مدل قرار دارند. این قسمت شامل بخش قابل برداشت یک گیاه به عنوان عملکرد، نحوه کاشت، دوره رشد و نوع فتوسنتز گیاه می‌شود. منظور از نوع فتوسنتز، فتوسنتز به شیوه‌ی گیاهان C_3 یا C_4 است. همچنین نحوه محاسبه زمان لازم برای جوانه‌زنی، زمان حرارتی مورد نیاز برای رسیدن به مراحل مختلف رشد که به صورت روزانه یا ساعتی می‌باشد. از جمله پارامترهای مربوط به تعرق، ضریب جذب کل تابش خورشیدی توسط شاخساره است که بدون بعد بوده، و مدل به آن حساسیت نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر بر پایه تابش فعّال فتوسنتزی جذب شده توسط گیاه برای گندم تا ۰/۸۲ نیز گزارش شده که نسبت به حالتی که از کل تابش خورشیدی استفاده شود، بیشتر بوده است (Yazdani, 2015).

از پارامترهای مربوط به رشد و گسترش شاخساره گیاه، مقدار اولیه شاخص سطح برگ سبز گیاه می‌باشد که مدل به آن حساس است و با توجّه به راهنمای مدل مقدار مجاز آن بین صفر تا ۰/۱ متغیّر است. این پارامتر در طول دوره رشد فعّال قسمتی از ماده خشک تولیدی را که به سطح برگ تبدیل می‌شود، تنظیم می‌کند. در قسمت برداشت پارامترهایی نظیر شاخص برداشت و زمان پر شدن دانه در شرایط بدون استرس بر حسب روز، ضریب حساسیت به استرس آب و نیتروژن در دوره گلدهی که مقدار معمول آن بین ۱/۵-۰/۵ است، ضریب حساسیت به استرس آب و نیتروژن در دوره پر شدن دانه که مقدار معمول آن بین صفر و ۱ است، قابل تنظیم می‌باشد.

شاخص‌های ارزیابی

برای مقایسه‌ی دقّت تخمین مدل و CropSyst از شاخص توافق ویلموت (Willmott's index of agreement, d) ، (معادله ۵) و شاخص جذر میانگین مربعات خطای نرمال(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) استفاده شده است (معادله ۸):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|P_i'\right| + \left|O_i'\right|\right)^2} \quad (۵)$$

که در این معادله P_i' و O_i' به ترتیب از معادلات (۶) و (۷) بدست می آیند.

$$P_i' = P_i - P_{Mean} \quad (۶)$$

$$O_i' = O_i - O_{Mean} \quad (۷)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{nO_{average}^2}\right]^{0.5} \quad (۸)$$

در روابط فوق P_i مقادیر شبیه سازی شده، Q_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، n تعداد نمونه‌های به کاررفته، $\overline{O}$ مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده می‌باشد. هر چه d، به ۱ نزدیکتر باشد نزدیکی بیشتری بین نتایج تخمین زده شده توسط مدل و داده‌های اندازه-گیری شده وجود دارد. برعکس هرچه NRMSE به صفر نزدیکتر باشد نزدیکی بیشتری بین نتایج تخمین زده شده توسط مدل و اندازه‌گیری ها وجود دارد. در صورتی که مقدار شاخص NRMSE بین۱۰-۰ درصد باشد دقت مدل خوب و اگر بین ۲۰-۱۰درصد باشد دقت مدل نسبتا خوب و اگر بین ۳۰-۲۰درصد باشد مدل در شبیه‌سازی ضعیف عمل نموده است (Mousavi Zadeh, 2014).

آبیاری

در مدل CropSyst برای شبیه‌سازی بیلان آب خاک از تئوری cascade استفاده شد. بدین معنا که ابتدا لایه اول به حد Fc می‌رسد و سپس رطوبت وارد لایه بعدی می‌شود. در فایل مدیریت آبیاری، مقدار شوری آب آبیاری صفر فرض شد، گیاه از نظر کود مورد نیاز تامین شده و رواناب ناچیز فرض گردید. برنامه ریزی رفع نیاز آبی گیاه به صورتی تنظیم شد که در طول دوره رشد (مرحله کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک) هرگاه درصد تخلیه مجاز در عمق ریشه به ۴۰ درصد رسید، به اندازه‌ای که رطوبت به Fc برسد، آبیاری انجام گردد. در دوره‌ای که هنوز گیاه ریشه‌ای ندارد (کاشت تا جوانه‌زنی)، چنانچه رطوبت کافی نباشد، براساس تخلیه ۴۰ درصد برای عمق تا ۰/۳ متر، رطوبت Fc تامین شود. به این ترتیب تاریخ‌های آبیاری و مقادیر آن در حالت تامین آبی ۱۰۰ درصد در هر سال توسط مدل محاسبه می‌شود. طبیعی است که در هر سال به دلیل بارندگی، مقدار آبیاری متفاوت باشد. برای سایر تیمارهای آبی، مقادیر بدست آمده برای تامین ۱۰۰درصد آب قابل دسترس در ۰/۷۵ و ۰/۵ ضرب شد. جهت استقرار گیاه، آبیاری اول هر سال، برای کلیه تیمارها یکسان بوده است.

در این مطالعه تلاش شد با استفاده از قابلیت‌های مدل، سناریویی برای آبیاری تعریف شود. به عبارت دیگر مدل به گونه‌ای عمل نماید که مدل با استفاده از فایل هواشناسی نیاز آبی گیاه را با درصد تخلیه مجاز ۴۰ درصد آب قابل دسترس انجام دهد و برای سایر تیمارها این مقادیر خروجی در ۰/۷۵ و ۰/۵ ضرب گردد تا بدین صورت برنامه آبیاری برای گیاه ارائه گردد. در شرایطی که اطلاعات مربوط به آبیاری موجود نباشد، می توان با این راهکار در مدل *CropSyst* این کمبود را جبران نمود.

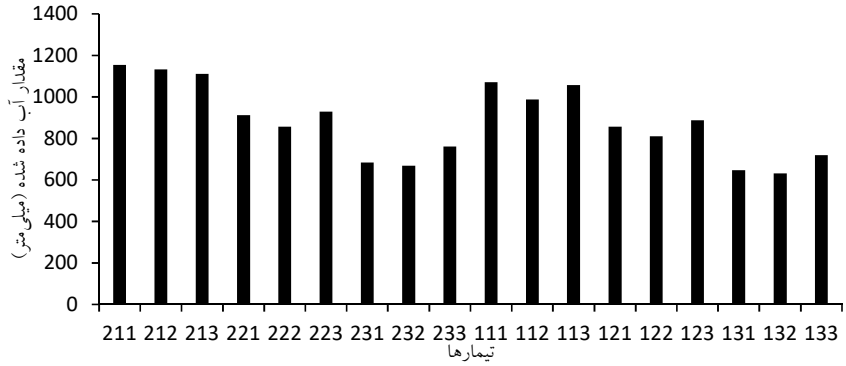
نیاز آبی گیاه به گونه‌ای رفع شد که آبیاری هفته‌ای یکبار صورت پذیرد. بطوریکه برای تیمارهایی که ۱۰۰ درصد نیاز آب آن‌ها تامین شده است (تیمارهایی با عدد وسط ۱)، در طول دوره رشد (مرحله کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک) هرگاه درصد تخلیه مجاز در عمق ریشه به ۴۰ درصد رسید به اندازه‌ای که رطوبت به Fc برسد آبیاری انجام گردد. همچنین در دوره‌ای که هنوز گیاه ریشه‌ای ندارد (کاشت تا جوانه‌زنی)، چنانچه رطوبت کافی نباشد نیز براساس تخلیه ۴۰ درصد برای عمق تا ۰/۳ متر رطوبت Fc تامین شود. به این ترتیب تاریخ‌های آبیاری و مقادیر آن در حالت تامین آبی ۱۰۰ درصد در هر سال توسط مدل محاسبه می‌شود. بنابراین طبیعی است که در هر سال به دلیل وجود بارندگی مقدار آبیاری متفاوت باشد.

در ادامه برای سایر تیمارهای آبی مقادیر بدست آمده برای تامین ۱۰۰درصد در ۰/۷۵ و ۰/۵ ضرب شده است. با این حال جهت استقرار گیاه آبیاری اول در هر سال برای تیمارهای آبی یکسان بوده است. در جدول ۱ برنامه آبیاری مدل در هر سه تیمار، در سال زراعی ۲۰۰۹-۲۰۱۰ با روش پریسلی- تیلور برای نمونه ارائه شده است. بنابراین در قسمت مدیریت زراعی داده‌های مربوط به

آبیاری برای ۱۰۰ درصد نیاز آبی به عنوان داده ورودی وارد مدل شد و برای ۰/۷۵ و ۰/۵ درصد نیاز آبی محاسبه گردید. در شکل ۱ مقدار آبیاری با هر دو روش برای تیمارها در سه سال مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۱- مقدار آبیاری(میلی‌متر) در هریک از تیمارهای ۱۰۰٪ آبیاری(۲۱۱)، ۷۵٪ آبیاری(۲۲۱) و ۵۰٪ آبیاری(۲۳۱) در سال زراعی ۲۰۱۰-۲۰۰۹ با روش پریسلی- تیلور

Date	Treatments		
	۲۱۱	۲۲۱	۲۳۱
۲۰۰۹/۱۱/۱۹	۲۴	۱۸	۱۲
۲۰۱۰/۱/۲۱	۴۲	۳۱	۲۱
۲۰۱۰/۳/۷	۷۰	۵۲	۳۵
۲۰۱۰/۳/۱۷	۹۰	۶۷	۴۵
۲۰۱۰/۳/۳۰	۸۵	۶۳	۴۲
۲۰۱۰/۴/۱۱	۱۰۸	۸۱	۵۴
۲۰۱۰/۴/۲۹	۱۰۲	۷۶	۵۱
۲۰۱۰/۵/۱۴	۱۰۷	۸۰	۵۴
۲۰۱۰/۵/۲۵	۱۰۸	۸۱	۵۴
۲۰۱۰/۶/۳	۱۰۳	۷۷	۵۱
۲۰۱۰/۶/۱۳	۱۰۷	۸۰	۵۴



شکل ۱- مجموع آب داده شده به هریک از تیمارها در طی سه سال فصل زراعی ۲۰۱۰-۲۰۰۹، ۲۰۱۱-۲۰۱۰ و ۲۰۱۲-۲۰۱۱

داده های مزرعه

اطلاعات مورد نیاز از طرح پژوهشی انجام شده در سه سال توسط Bagheri (2013) در سالهای زراعی ۹۱-۱۳۸۸ یا (۲۰۱۲-۲۰۰۹) در شهرستان اقلید، واقع در شمال استان فارس حاصل شد. اقلید واقع در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۳ دقیقه و بلندی ۲۲۳۰ متری از سطح دریا می‌باشد. بلندترین شهرستان فارس و ششمین شهر مرتفع کشور است. ایستگاه هواشناسی اقلید در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی با ۲۳۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا قرار دارد. در این تحقیق از داده های هواشناسی که از سال ۱۳۷۲ در این ایستگاه موجود است، استفاده شد.

مدل CropSyst با توجه به مشخصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی، ماکزیمم ساعات آفتابی و تشعشع خورشیدی ممکن که در معادله پنمن مونتیث مورد نیاز است را محاسبه می‌کند. شکل ۲ میزان بارندگی اقلید را در دوره زمانی مورد بررسی نشان می دهد. گیاه مورد آزمایش، گندم با واریته الوند با تیپ رشد بینابینی،

میانگین ارتفاع ۱۰۷ سانتی متر، نسبتاً دیررس با ۴۰ گرم میانگین هزار دانه، دانه ای با رنگ زرد کهربایی و کیفیت نانوایی خوب، مقاوم نسبت به خوابیدگی و ریزش، میانگین عملکرد ۶/۴ تن در هر هکتار، نسبتا مقاوم به زنگ زرد، مقاوم به سرما و قابل کشت در مناطق سردسیر کشور بخصوص استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، اردبیل، کردستان، همدان، زنجان، و چهارمحال و بختیاری می‌باشد. داده‌های مربوط به خاک تا عمق ۲ متر در قالب یک لایه ۵ سانتی‌متری و یک لایه ۱۹۵ سانتی متری در نظر گرفته شده است. تبخیر از سطح خاک فقط از لایه اول که لایه بالایی می‌باشد بررسی شده است. همانطور که جدول ۲ نشان می دهد خاک منطقه مورد نظر Silty clay loam می‌باشد.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به خاک محل کشت

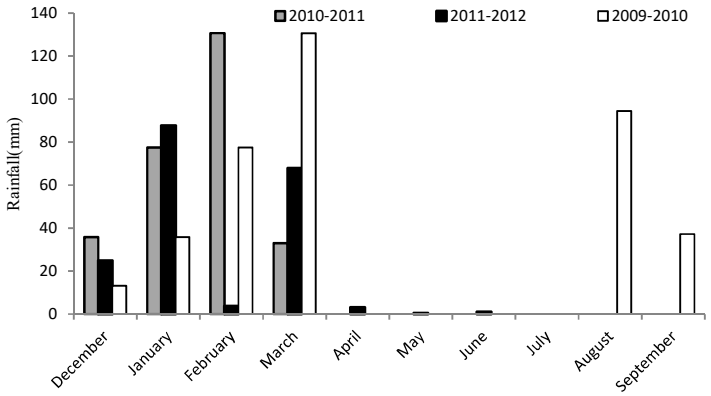
Layer (cm)	%Sand	%Clay	%Silt	pwp (m3/m3)	fc (m3/m3)	θs (m3/m3)
۵-۰	۲۰	۳۰	۵۰	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۴۵
۲۰۰-۵	۲۰	۷۰	۵۰	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۴۵

رطوبت در سطح خاک به صورت هوا خشک در نظر گرفته شد. داده‌های مربوط به خاک به عنوان داده‌های ورودی، به مدل وارد می شوند. در جدول ۳ رطوبت اولیه اندازه گیری شده خاک محل آزمایش (به روش حجمی)، در زمان کشت سال اول، برای نمونه ارائه شده است.

جدول ۳- رطوبت اولیه خاک محل آزمایش در زمان کشت

Layer(cm)	θ(m^3/m^3)	date
۵-۰	۰/۰۵	۱-اکتبر
۲۰۰-۵	۰/۱۲	۱-اکتبر

این طرح به صورت کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفته است. آبیاری به روش غرقاب انجام شده، کشت در تاریخ پنجم آذر ماه (معادل ۱ اکتبر) صورت گرفته و در تاریخ ۱۵ آگوست برداشت صورت گرفته است. تیمارهای آزمایش شامل سه تیمار است؛ I1: آبیاری تا رسیدن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی، I2: آبیاری به اندازه ۷۵٪ ظرفیت زراعی و I3: آبیاری به اندازه ۵۰٪ ظرفیت زراعی.



شکل ۲- میزان بارندگی ماهانه ۳ سال کشت در اقلید

کالیبراسیون و ارزیابی

در تحقیق حاضر برای ارزیابی نتایج شبیه سازی از ترکیب روشهای گرافیکی (نمودار پراکنش داده های شبیه سازی شده و اندازه گیری شده و خطوط ۱:۱ برای نشان دادن تناسب کلی مدل) و شاخص های آماری استفاده شد. مدل CropSyst با توجه به داده‌ها، واسنجی و اعتبارسنجی گردید. برای واسنجی مدل، تبخیر و تعرق گیاه مرجع یک بار از معادله پنمن-مونتیث و بار دیگر از معادله پریستلی- تیلور استفاده شد، تا بهترین روش برای شبیه‌سازی دقیقتر عملکرد انتخاب شود. برای تخمین سرعت باد با معادله پنمن- مونتیث از داده های هواشناسی در تاریخ های مربوط استفاده شد. تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله پریستلی- تیلور با ضریب ۱/۶۵ محاسبه شد.

جهت واسنجی مدل از داده های سال زراعی ۸۹-۹۰ (۲۰۱۰-۲۰۱۱) و برای واسنجی از داده های سال‌های ۸۸-۸۹ (۲۰۰۹-۲۰۱۰) و ۹۰-۹۱ (۲۰۱۱-۲۰۱۲) استفاده شد. مدل شبیه سازی با استفاده از دو معادله پنمن-مونتیث و پریستلی- تیلور اجرا گردید. برای سهولت کار، تیمارها با سه عدد شماره‌گذاری گردید، بدین صورت که عدد اول نشان دهنده معادله ایست که برای تبخیر و تعرق به کار رفته است؛ که عدد ۱ مربوط به معادله پنمن-مونتیث و عدد ۲ مربوط به معادله پریستلی-تیلور می‌باشد. عدد دوم مربوط به میزان آبیاری محصول می‌باشد. بدین ترتیب که عدد ۱ مربوط به ٪۱۰۰ آبیاری مورد نیاز محصول و عدد ۲، آبیاری ۷۵٪، و عدد ۳، ۵۰ ٪ آبیاری مورد نیاز گیاه می‌باشد. رقم سوم نیز مربوط به سال زراعی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب که عدد ۱ مربوط به سال زراعی ۸۹-۸۸ (۲۰۰۹-۲۰۱۰)، عدد ۲ سال ۹۰-۸۹ (۲۰۱۰-۲۰۱۱) و عدد ۳ مربوط به سال زراعی ۹۱-۹۰(۲۰۱۱-۲۰۱۲) می باشد. به عنوان مثال تیمار ۲۳۲ مربوط به تیماری است که خروجی حاصل از مدل با استفاده از معادله پریستلی-تیلور با آبیاری ۵۰٪ در سال زراعی ۹۱-۹۰ می‌باشد.

نتایج

واسنجی (کالیبراسیون) و ارزیابی مدل

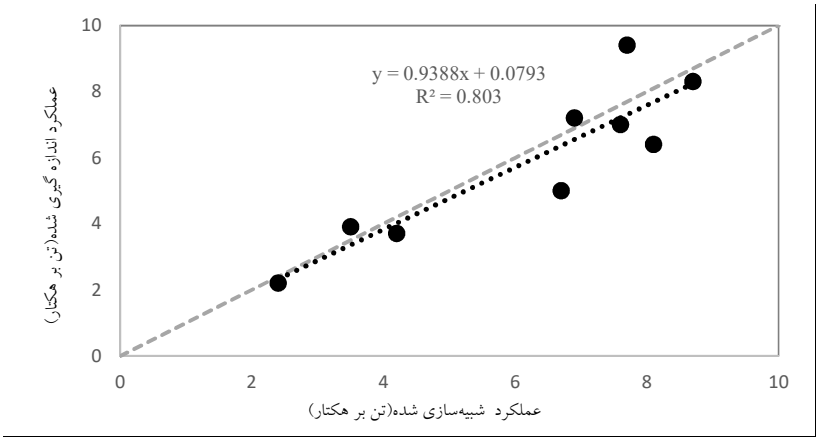
جدول ۴ غالب پارامترهای ورودی مدل را نشان می دهد. مقادیر پارامترهای مربوط به خاک، هواشناسی، فنولوژی و مدیریت زراعی (آبیاری) به عنوان داده ورودی به مدل وارد شدند، بنابراین نیازی به واسنجی این مقادیر نمی‌باشد. ولی ضرایب مربوط به گیاه برای شناساندن دوره رشد گیاه گندم به مدل نیاز به واسنجی دارد. در این جدول ضرایبی که با علامت *(ستاره) مشخص شده است ضرایبی هستند که طبق نتایج حاصل از مزرعه واسنجی شده اند.

شکل های ۳ و ۴ مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را در مقابل یکدیگر، نسبت به خط یک به یک، با استفاده از دو معادله پنمن-مونتیث و پریسلی تیلور نشان می دهند. همانطور که پراکنش نقاط حول خط یک به یک و معادلات رگرسیونی حاصله نشان می دهد، مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از معادله پریسلی- تیلور نسبت به معادله پنمن مونتیث از دقت بالاتری برخوردار می باشد.

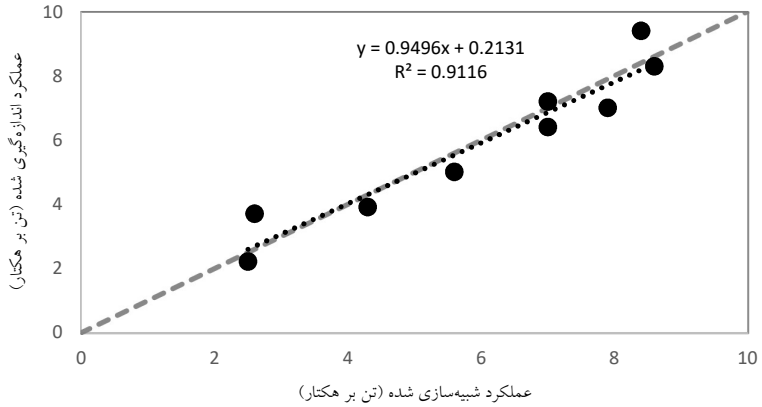
شکل های ۵ و ۶ نیز مقایسه عملکرد اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده تیمارها را با استفاده از معادلات پنمن-مونتیث و پریسلی- تیلور طی سال‌های زراعی مورد بررسی نشان می دهد. مشاهده می شود که مقدار خطای پیش بینی در تیمارهای مختلف متفاوت است. همچنین رابطه پریسلی- تیلور از دقت بالاتری نسبت به معادله پنمن مونتیث برخوردار است.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای گیاهی مدل CropSyst برای گندم زمستانه درمنطقه اقلید

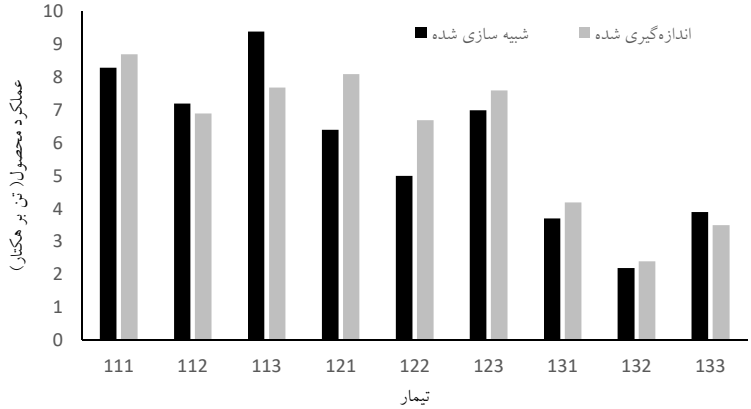
پارامتر		مقدار	پارامتر		مقدار
Thermal time accumulation حرارت تجمعی در زمان	Base temperature دمای پایه	۴ ^{0}C	**Senescence** پیری	Leaf area duration طول عمر سطح برگ گیاه بر حسب درجه روزهای حرارتی	^{0}C-۱۰۰۰ days
	Cut off temperature حد بالایی دما	۲۸ ^{0}C		Leaf area duration sensitivity to water stress اثر تنش آبی بر طول عمر برگ گیاه	۰
Transpiration تعرق	Canopy extinction coefficient for total(global)solar radiation* ضریب جذب کل تابش خورشیدی	۰/۵	**Attainable growth** ماده خشک تولیدی	transpiration use efficiency when VPD is at 1kPa کارایی تبخیر و تعرق در تبدیل به ماده خشک	۴/۵ gBM/kg H2O
	Evapotranspiration crop coefficient at full canopy* حد اکثر ضریب تبخیر و تعرق گیاه	۱/۲		Mean daily temperature that limits early growth متوسط دمای روزانه محدود کننده رشد	۸ ^{0}C
	Leaf water potential at the onset of stomatal closure* پتانسیل برگ هنگام بسته شدن روزنه	-۱۰۰۰ J/kg	**Root** ریشه	Root depth عمق ریشه	۱/۲ m
	Wilting leaf water potential* پتانسیل برگ در نقطه پژمردگی	-۱۶۰۰ J/kg		Root length per unit root mass طول ریشه بر واحد جرم	۹۰ km/kg
	Maximum water uptake حداکثر جذب آب	۱۲ mm/day		Maximum surface root density at full rooting depth حداکثر چگالی ریشه در لایه بالایی هنگام عمق حداکثر ریشه	cm/cm^{3}۶
Canopy growth رشد شاخساره	Specific leaf area at optimum temperature سطح برگ ویژه(سطح بر واحد جرم) در دمای بهینه	m^2/kg۱۸		Curvature of root density distribution پارامتر انحنای ریشه	۱
	Fraction of max. LAI at physiological maturity کسر شاخص برگ در زمان بلوغ فیزیولوژیک	۰/۸		Act. to pot. transpiration ratio that limits root growth نسبت تعرق واقعی به پتانسیل محدود کننده رشد ریشه	۰/۵
	Stem/leaf partition coefficient ضریب ساقه به برگ	۳	**Harvest** برداشت	Duration of grain filling period طول دوره پرشدن داده	۱ day
	Leaf water potential that begins canopy expansion پتانسیل آب برگ در شروع رشد شاخساره	-۴۰۰ J/kg		Unstressed harvest index شاخص برداشت بدون استرس	۰/۴
	Leaf water potential that stops canopy expansion پتانسیل آب برگ در پایان رشد شاخساره	-۱۰۰۰ J/kg		Sensitivity to temperature stress during flowering حساسیت به تنش دما در شرایط گلدهی	۰/۵



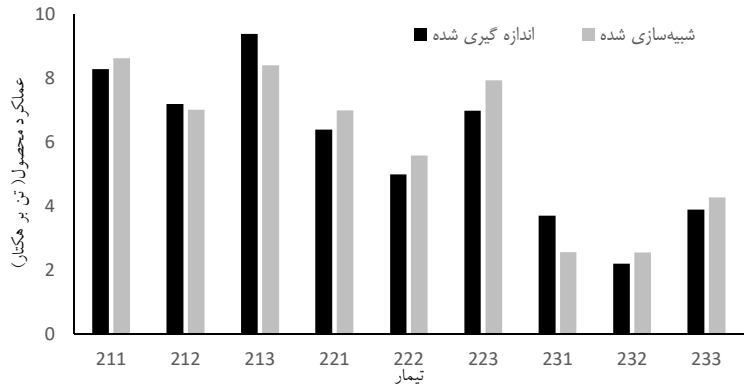
شکل ۳- مقایسه متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم با استفاده از معادله پنمن- مونتیث در سه سال زراعی



شکل ۴- مقایسه متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم با استفاده از معادله پریسلی- تیلور در سه سال زراعی



شکل ۵- مقایسه متوسط عملکرد اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده برای تیمارها بدست آمده از طریق معادله پنمن-مونیث طی سال‌های زراعی مورد بررسی



شکل ۶- مقایسه متوسط عملکرد اندازه گیری شده و شبیه‌سازی شده برای تیمارها بدست آمده از طریق معادله پریسلی- تیلور طی سال‌های زراعی مورد بررسی

تحلیل آماری نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل CropSyst نیز نشان می‌دهد که نتایج حاصل از معادله پریسلی-تیلور نسبت به پنمن مونتیث از دقت بالاتری برخوردار است، زیرا شاخص‌های NRMSE و d با استفاده از معادله پریسلی-تیلور به ترتیب ۱۱/۴ و ۰/۹۷ بدست آمد و این مقادیر با استفاده از معادله پنمن-مونتیث ۱۷/۵ و ۰/۹۴ حاصل شده است (جدول ۵). آزمون F-test نیز در سطح احتمال ۵٪ نشان مداد که در واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی عملکرد گندم توسط مدل CropSyst با استفاده از معادلات پریسلی-تیلور و پنمن مونتیث تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، و دقت واسنجی و اعتبارسنجی در شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از مدل CropSyst قابل قبول می‌باشد، به منظور جلوگیری از تطویل مقاله جداول مرتبط با F-test آورده نشده است.

جدول ۵- مقدار متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم برگرفته از معادله تبخیر و تعرق پریسلی-تیلور و پنمن- مونتیث در سال‌های زراعی (تن بر هکتار)

درصد اختلاف	پریسلی- تیلور		تیمارها
عملکرد	اندازه گیری شده	شبیه سازی شده	
3.6	8.3	8.6	211
-2.8	7.2	7.0	212
-10.6	9.4	8.4	213
9.4	6.4	7.0	221
12.0	5	5.6	222
12.9	7	7.9	223
-29.7	3.7	2.6	231
13.6	2.2	2.5	232
10.3	3.9	4.3	233
	۱۱/۴		NRMSE
	۰/۹۷		d

درصد اختلاف	پنمن- مونتیث		تیمارها
عملکرد	اندازه گیری شده	شبیه سازی شده	
4.8	8.3	8.7	111
-4.2	7.2	6.9	112
-18.1	9.4	7.7	113
26.6	6.4	8.1	121
34.0	5	6.7	122
8.6	7	7.6	123
13.5	3.7	4.2	131
9.1	2.2	2.4	132
-10.3	3.9	3.5	133
	۱۷/۵		NRMSE
	۰/۹۴		d

شبیه‌سازی رشد

جدول ۲ درصد تغییرات عملکرد را در سناریوهای مختلف آبیاری نشان می دهد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود تغییر تیمار آبیاری سبب تفاوت مقدار عملکرد می گردد، بطوریکه کمترین عملکرد حاصل تیمارهای آبیاری ۵۰ درصد بوده است. همچنین عملکرد در سالهای زراعی مختلف متفاوت بوده، بطوریکه بیشترین عمکرد در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد بیشترین عملکردها به ترتیب در سال اول، سوم و دوم زراعی بدست آمده است. این ترتیب در سایر تیمارهای متفاوت است. ترتیب عملکرد اندازه گیری شده نیز کاملا مشابه با شبیه سازی نمی باشد. بیشترین عملکرد دانه در هر دو روش تبخیر و

تعرق را در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد داشته ایم. مقایسه عملکرد دانه شبیه سازی شده و اندازه گیری شده نشان داد که خطای شبیه سازی در تیمار اول در کلیه تیمارها کمترین است.

در روش پریسلی- تیلور از تیمار ۱۰۰ درصد به ۷۵ و ۵۰ درصد خطای شبیه سازی عملکرد غالبا افزایش می یابد. Mohseni et al. (2009) نیز در مقایسه مقادیر بهره‌وری آب شبیه‌سازی و واقعی نشان داند که برآوردها در تیمارهای تحت تنش آبی، اختلاف بیشتری با مقادیر واقعی دارند. در روش پنمن- مونتیث بیشترین خطا مربوط به تیمار ۷۵ درصد است. ترتیب خطا در سالهای زراعی نیز متفاوت است. با توجه به تغییرات میزان بارش در ماه های متفاوت در سالهای مورد بررسی (شکل ۱)، تفاوت ها می تواند به دلیل اندرکنش عوامل متفاوت اقلیمی با خاک و گیاه باشد که تبیین آنها نیازمند بررسی های بیشتر است. جدول ۶ نتایج پیش‌بینی زمان‌های مربوط به جوانه زنی، گل‌دهی و پرشدن دانه توسط مدل را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با تغییر تیمار آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ و ۵۰ درصد مدت زمان پر شدن دانه افزایش می یابد. در نظر گرفتن این زمان در برنامه ریزی های آبیاری ضروری است.

جدول ۶- زمان مراحل رشد شبیه سازی شده توسط مدل CropSyst با استفاده از معادلات پنمن-مونتیث و پریسلی-تیلور در سال‌های زراعی

	تیمار	تاریخ کاشت	تاریخ جوانه زنی	تاریخ گل‌دهی	تاریخ پرشدن دانه
پریسلی- تیلور	۲۱۱	۵-نوامبر-۲۰۰۹	۱۴-نوامبر-۲۰۰۹	۲۱-می-۲۰۱۰	۱۳-ژوئن-۲۰۱۰
	۲۱۲	۵-نوامبر-۲۰۱۰	۲۴-نوامبر-۲۰۱۰	۲۶-می-۲۰۱۱	۱۸-ژوئن-۲۰۱۱
	۲۱۳	۵-نوامبر-۲۰۱۱	۱۵-نوامبر-۲۰۱۱	۴-ژوئن-۲۰۱۲	۲۹-ژوئن-۲۰۱۲
	۲۲۱	۵-نوامبر-۲۰۰۹	۱۴-نوامبر-۲۰۰۹	۲۱-می-۲۰۱۰	۱۳-ژوئن-۲۰۱۰
	۲۲۲	۵-نوامبر-۲۰۱۰	۲۴-نوامبر-۲۰۱۰	۲۶-می-۲۰۱۱	۱۸-ژوئن-۲۰۱۱
	۲۲۳	۵-نوامبر-۲۰۱۱	۱۵-نوامبر-۲۰۱۱	۴-ژوئن-۲۰۱۲	۲۹-ژوئن-۲۰۱۲
	۲۳۱	۵-نوامبر-۲۰۰۹	۱۴-نوامبر-۲۰۰۹	۲۱-می-۲۰۱۰	۱۳-ژوئن-۲۰۱۰
	۲۳۲	۵-نوامبر-۲۰۱۰	۲۴-نوامبر-۲۰۱۰	۲۶-می-۲۰۱۱	۱۸-ژوئن-۲۰۱۱
	۲۳۳	۵-نوامبر-۲۰۱۱	۱۵-نوامبر-۲۰۱۱	۴-ژوئن-۲۰۱۲	۲۹-ژوئن-۲۰۱۲
پنمن- مونتیث	۱۱۱	۵-نوامبر-۲۰۰۹	۱۴-نوامبر-۲۰۰۹	۲۱-می-۲۰۱۰	۱۳-ژوئن-۲۰۱۰
	۱۱۲	۵-نوامبر-۲۰۱۰	۲۴-نوامبر-۲۰۱۰	۲۶-می-۲۰۱۱	۱۸-ژوئن-۲۰۱۱
	۱۱۳	۵-نوامبر-۲۰۱۱	۱۵-نوامبر-۲۰۱۱	۴-ژوئن-۲۰۱۲	۲۹-ژوئن-۲۰۱۲
	۱۲۱	۵-نوامبر-۲۰۰۹	۱۴-نوامبر-۲۰۰۹	۲۱-می-۲۰۱۰	۱۳-ژوئن-۲۰۱۰
	۱۲۲	۵-نوامبر-۲۰۱۰	۲۴-نوامبر-۲۰۱۰	۲۶-می-۲۰۱۱	۱۸-ژوئن-۲۰۱۱
	۱۲۳	۵-نوامبر-۲۰۱۱	۱۵-نوامبر-۲۰۱۱	۴-ژوئن-۲۰۱۲	۲۹-ژوئن-۲۰۱۲
	۱۳۱	۵-نوامبر-۲۰۰۹	۱۴-نوامبر-۲۰۰۹	۲۱-می-۲۰۱۰	۱۳-ژوئن-۲۰۱۰
	۱۳۲	۵-نوامبر-۲۰۱۰	۲۴-نوامبر-۲۰۱۰	۲۶-می-۲۰۱۱	۱۸-ژوئن-۲۰۱۱
	۱۳۳	۵-نوامبر-۲۰۱۱	۱۵-نوامبر-۲۰۱۱	۴-ژوئن-۲۰۱۲	۲۹-ژوئن-۲۰۱۲

در جدول ۷ مقدار ماده خشک، عمق ریشه، تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی در هر تیمار و عملکرد شبیه سازی شده مدل در پایان دوره رشد ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج تبخیر و تعرق محاسباتی با روش پریسلی- تیلور بیشتر از پنمن-مونتیث است، که با توجه به نزدیکی مقادیر با مقادیر اندازه‌گیری شده، قابل اعتمادتر می‌باشد. بیشترین مقدار ماده خشک تولیدی و عملکرد (تن بر هکتار)، در هر دو روش تبخیر و تعرق، در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری در سال اول، و کمترین میزان در تیمار ۷۵ درصد آبیاری در سال سوم حاصل شد. بنابراین مدل در سال سوم در تیمار ۵۰ درصد

آبیاری عملکردی بیشتر از ۷۵ نشان داد. این مساله می تواند به دلیل اندرکنش پیچیده شرایط توامان آب و عوامل اقلیمی بر خاک و گیاه باشد. Dagdelen et al. (2005) در بررسی تاثیر کم آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت نشان دادند که بیشترین مقدار تغییر آن مربوط به تیمار کم آبیاری می باشد.

جدول ۷- نتایج شبیه سازی مدل CropSyst با استفاده از معادلات پنمن-مونتیث و پریسلی-تیلور در سال‌های زراعی

	تیمار	ماده خشک ($T\ ha^{-1}$)	عمق ریشه(m)	تبخیر و تعرق پتانسیل(mm)	تبخیر و تعرق واقعی(mm)	عملکرد ($T\ ha^{-1}$)
پریسلی تیلور	۲۱۱	۲/۲	۱/۳	۱۰۷۴/۶	۱۰۰۹/۲	۸/۶
	۲۱۲	۱/۸	۱/۳	۱۲۱۶/۱	۱۰۰۶/۵	۷/۰
	۲۱۳	۲/۱	۱/۳	۱۱۷۶/۹	۱۰۵۸/۹	۸/۴
	۲۲۱	۲/۰	۱/۳	۱۰۴۷/۴	۸۸۹/۹	۷/۰
	۲۲۲	۱/۶	۱/۳	۱۲۱۵/۹	۹۰۰/۱	۵/۶
	۲۲۳	۲/۰	۱/۳	۱۱۷۶/۸	۹۳۹/۹	۷/۹
	۲۳۱	۱/۴	۱/۳	۱۰۳۷/۵	۶۴۲/۵	۲/۶
	۲۳۲	۱/۲	۱/۳	۱۲۱۴/۲	۶۶۲/۵	۲/۵
	۲۳۳	۱/۶	۱/۳	۱۱۷۶/۴	۷۶۲/۳	۴/۳
پنمن- مونتیث	۱۱۱	۲/۲	۱/۲۵	۱۰۴۴/۸	۸۲۹/۹	۸/۷
	۱۱۲	۱/۷	۱/۲۵	۱۰۸۶/۲	۸۴۰/۲	۶/۹
	۱۱۳	۱/۹	۱/۲۵	۱۰۹۳/۰	۸۴۰/۵	۷/۷
	۱۲۱	۲/۱	۱/۲۵	۱۰۴۴/۴	۸۴۴/۷	۸/۱
	۱۲۲	۱/۷	۱/۲۵	۱۰۸۶/۱	۸۱۳/۲	۶/۷
	۱۲۳	۱/۹	۱/۲۵	۱۰۹۳/۰	۸۳۱/۳	۷/۶
	۱۳۱	۱/۳	۱/۲۵	۱۰۳۸/۷	۶۴۷/۳	۴/۲
	۱۳۲	۱/۲	۱/۲۵	۱۰۸۴/۹	۶۴۲/۶	۲/۴
	۱۳۳	۱/۵	۱/۲۵	۱۰۹۲/۴	۶۹۲/۴	۳/۵

در این تحقیق شبیه‌سازی گندم زمستانه در منطقه اقلید با مدل CropSyst با استفاده از معادلات تبخیر و تعرق پنمن-مونتیث و پریسلی-تیلور صورت گرفت. داده های اقلیمی در سال های مختلف به عنوان ورودی داده های اقلیمی، به مدل وارد شد. شرایط خاک به عنوان فرضیات مدل ثابت در نظر گرفته شده است. آبیاری در سالهای مختلف با توجه به میزان بارش، دما، سرعت باد و سایر پارامترهای موثر بر تبخیر و تعرق متفاوت بود، که برای مدل تعریف شده است و در قسمت آبیاری توضیحات بیشتر آورده شده است. شرایط کوددهی در سه سال یکسان در نظر گرفته شده، با توجه به اینکه در کشت مزرعه نیز در سالهای مختلف، یکسان بوده است. نتایج به دست آمده از مدل، با در نظر گرفتن فرضیات گفته شده، و محدودیت های مدلسازی همراه با خطا بوده است، اما با توجه به مقادیر شاخص های آماری محاسبه شده در حد قابل قبولی بوده است.

بحث و نتیجه گیری

به منظور مدیریت منابع آب در شرایط کمبود آب، لازم است که چگونگی تاثیر تنش کم آبیاری بر محصول سنجیده شود. با توجه به اینکه انجام آزمایش مزرعه ای در فصل ها و موقعیت های مختلف دشوار است، تکنیک مدلسازی به شخص تصمیم گیرنده امکان می دهد تا تاثیر فوق را شبیه سازی و کم آبیاری را با دقت برنامه ریزی کند. مدل شبیه سازی راهکاری است که امکان بررسی فرآیندهای زنجیره خاک-گیاه-اتمسفر، بیلان آبی، شبیه سازی فرآیند رشد و مطالعه سناریوهای مختلف مدیریتی را فراهم می آورد. همچنین با توانایی پیش بینی پارامترهای محیطی می توانند احتمال خطر در آینده را برآورد نمایند(Nazarifar and Momeni, 2011) .

مدل‌های گیاهی ابزاری برای پژوهش‌های کشاورزی، کمک به تفسیر نتایج و مدیریت تصمیم‌گیری برای سیستم‌های گیاهی مزرعه و همچنین تجزیه و تحلیل روش‌های سیاست‌گذاری در امور تغییر آب و هوا، مصرف آب، فرسایش، عناصر غذایی خاک و مصرف سموم دفع آفات نباتی می‌باشد (Boote et al., 1996). در شرایط کمبود آب، شناخت حد بحرانی آب که با حداقل مصرف آن بتوان به حداکثر عملکرد قابل قبول دست یافت، ضروری است. محصولات مختلف در برابر تنش های مختلف عکس العمل متفاوتی نشان می دهند که تعیین آن در مزرعه امری وقت گیر و پرهزینه است. بنابراین استفاده از مدلهای گیاهی می تواند موثر واقع گردد. همچنین اعمال کم آبیاری منجر به باقی ماندن حجم آب مازاد می شود که می تواند به افزایش کشت بیانجامد.

تحلیل آماری نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل CropSyst نشان داد که نتایج حاصل از معادله پریسلی-تیلور نسبت به پنمن مونتیث از دقت بالاتری برخوردار است، اما تفاوتها در حدی بود که آزمون F-test در سطح احتمال ۵٪ در واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی عملکرد گندم با استفاده از معادلات پریسلی-تیلور و پنمن مونتیث تفاوت معنی‌داری نشان نداد. همچنین دقت واسنجی و اعتبارسنجی در شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از مدل CropSyst قابل قبول می‌باشد.

تغییر تیمار آبیاری سبب تفاوت مقدار عملکرد شد، بطوریکه کمترین عملکرد حاصل تیمارهای آبیاری ۵۰ درصد بود. عملکرد گیاه در سالهای زراعی مختلف متفاوت بود، و بیشترین عملکرد دانه در هر دو روش تبخیر و تعرق در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد بدست آمد. مقایسه عملکرد دانه شبیه سازی شده و اندازه گیری شده نشان داد که خطای شبیه سازی در تیمار اول در کلیه تیمارها کمترین است. با تغییر تیمار آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ و ۵۰ درصد مدت زمان پر شدن دانه افزایش یافت. در نظر گرفتن این زمان در برنامه ریزی های آبیاری ضروری است.

بیشترین مقدار ماده خشک تولیدی و عملکرد (تن بر هکتار)، در هر دو روش تبخیر و تعرق، در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری در سال اول، و کمترین میزان در تیمار ۷۵ درصد آبیاری در سال سوم حاصل شد. بنابراین مدل در سال سوم در تیمار ۵۰ درصد آبیاری عملکردی بیشتر از تیمار ۷۵ درصد نشان داد. این مساله می تواند به دلیل اندرکنش پیچیده شرایط توامان آب و عوامل اقلیمی بر خاک و گیاه باشد. در کل می توان گفت مدل CropSyst با دقت قابل قبولی توانست محصول گیاه گندم را در منطقه اقلید با دقت نسبتا خوب شبیه‌سازی نماید. بنابراین می توان از آن برای شبیه سازی عملکرد محصول در شرایط مختلف کمی و کیفی آب و عملیات زراعی استفاده کرد. این مدل با اعمال ضرایب واسنجی شده بدست آمده جهت فایل گیاهی این قابلیت را دارد که بتوان با آن مدیریت‌های مختلف آبیاری را در منطقه اقلید برای گیاه گندم بررسی نمود (با فرض تامین بودن کود و عدم شوری آب). نتایج حاصل قابل استفاده در مدیریت منابع آب و خاک در شرایط بحران آب می باشد.

جهت ادامه کار انجام شبیه سازی توسط مدل تحت مدیریت های مختلف کود و شوری آب، شبیه سازی و پیش بینی عملکرد با لحاظ سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و لحاظ شرایط مختلف اقلیمی شامل بارندگی، دما و سناریوهای مختلف آبیاری اعم از مقدار و شوری متفاوت آب، بررسی سطح افزایش یافته کشت در هر سناریو، و محاسبه توجیه اقتصادی کم آبیاری با توجه به تغییر سطح زیر کشت، کاهش راندمان محصول، هزینه آب و آبیاری، بررسی تغییر عملکرد سایر محصولات رایج در منطقه به ازاء سناریوهای مختلف کم آبیاری و انتخاب سناریوی مطلوب برای سایر محصولات و تعیین اولویت نوع و سطح کشت گیاهان (الگوی کشت) برای محصولاتی با شاخص بهره وری آب بالاتر، مقایسه عملکرد مدلهای متداول دیگر با CropSyst و انتخاب مدل بهینه، و واسنجی مدل در مناطق مختلف برای محصولات متفاوت، تعیین الگوی کشت بهینه و استفاده از نتایج در برنامه ریزی های استفاده از منابع آب و خاک، پیشنهاد می گردد.

منابع

Aalaaee Bazkiaei P., Kamkar B., Amiri E., Kazemi H., Rezaei M. 2021. Evaluation of plant models in simulating rice yield under crop management in Rasht. Iranian J. of Field Crops Research, 18(4), pp. 401-412. (In Persian).

Ansari M.A., Egdernezhad A., Ebrahimipak N.A. 2019. Simulating of potato (Solanum tuberosum L.) yield under different irrigation conditions using AquaCrop and Cropsyst models. J. of Crop Ecophysiology, 13, 2(50), pp. 287-304. (In Persian).

Agricultural statistics. 2014. Ministry of Agriculture-Jahad (In Persian).
Akbari, M., Dehghani, S. H., Mirlatifi, S.M. 2009. Impact of irrigation scheduling on agriculture water productivity. Iranian J. of Irrigation and Drainage, 3(1), pp. 69-79. (In Persian).

Bagheri A.R. 2013. The research report, Eghlid University. (In Persian).

Baker J. M. 1996. Use and abuse of crop simulation models. Agronomy J., 88, pp. 689-689.

Bonfante A., Basile A., Acutis M., De. Mascellis R., Manna P., Perego A., Terrible F. 2010. SWAP, CropSyst, and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in northern Italy. Agricultural Water Management, 97, pp. 1051-1062.

Boogard H.L., Van Diepen C.A., Rotter R.P., Cabrera J.C.M.A., Van Laar H.H. 1998. WOFOST 7.1 User Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 5.1. Techn. Doc. 52, Alterra, WUR, Wageningen.

Boote K.J., Jones J.W., Pickering N.B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. Agronomy J., 88, pp. 407-416.

Boustani F., Mohammadi H. 2008. Studying productivity of and demand for water in sugar beet production in Eghlid district. J. of Sugar Beet, 23(2), pp. 185-196. (In Persian).

Boustani F., Mohammadi H., Mir B. 2012. The effect of deficit irrigation on cultivation pattern of crops in water crisis condition: case study: Fars province. Water Resources Engineering, 4(10), pp. 63-74. (In Persian).

Confalonieri, R. 2010. Monte Carlo based sensitivity analysis of two crop simulators and considerations on model balance. European J. of Agronomy, 33, pp. 89-93.

Confalonieri R., Bocchi S. 2005. Evaluation of CropSyst for simulating the yield of flooded rice in northern Italy. European J. of Agronomy, 23: 315-326.

Confalonieri R., Bechini L. 2004. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. European J. of Agronomy, 21, pp. 223–237.

Dagdelen N., Yilmaz E., Sezgin F., Gurbuz T. 2005. Water yield relation and water use efficiency of cotton and second crop corn in western Turkey. Agricultural Water Management, 82(1-2), pp.63-85.

Dastfal M., Barati V., Navabi F., Haghighat Nia H. 2009. Effect of terminal drought stress on grain yield and its components in bread wheat (Triticum Aestivum L.) genotypes in dry and warm conditions in south of Fars province. Seed and Plant Production, 25(3), pp. 329-344. (In Persian).

Dastmalchi A., Soltani A., Latifi N., Zeinali E. 2012. Parameter estimates and evaluation of CropSyst-Wheat for Golestan province cultivars. J. of Crop Production, 4(2), pp. 63-80 (In Persian).

Haouari M., Azaiez M.N. 2001. Optimal cropping pattern under water deficits. Europian J. of Operational Research, 130, pp. 133-146.

Kamkar B., Bazkiaee P.A., Dehkordi P.A., Amiri E. 2022. Studying the changes in rice yield and water balance in Guilan province affected by climate changes. Environmental Sciences, 20(2), pp. 61-80. (In Persian).

Kemanian A.R., Stockle C.O., Huggins D.R. 2005. Transpiration-use efficiency of barley. Agricultural and Forest Meteorology, 130, pp. 1–11.

Kibe A.M., Singh S., Kalra N. 2006. Water–nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions. Agricultural Water Management, 84, pp. 221-228.

Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. 2016. Climate change effects on agricultural production of Iran: II. Predicting productivity of field crops and adaptation strategies. Iranian J. of Field crops Research, 14(1), pp. 1-20. (In Persian).

Li W.L., Li W.I., Li Z.Z. 2004. Irrigation and fertilizer effects on water use and yield of spring wheat in semi-arid regions, Agricultural Water Management, (67), pp. 35-46.

Mohseni M., Montazar A.A., Rahimi Khoub A. 2009. Evaluation of CropSyst model for water-nitrogen interactions in wheat yield and water productivity. Iranian J. of Irrigation and Drainage, 3(1), pp. 113-125. (In Persian).

Montajami N., Vaziri J. 2004. Iranian J. of Soil and Water Use Efficiency, 18(1), pp. 52-62. (In Persian).

Monteith J.L. 1977. Climate and crop efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of Landan, Series B, Biological Sciences, 281(980), pp. 277-294.

Monteith J.L. 1996. The quest for balance in

crop modeling. Agronomy J., 88, pp. 695-697.

Mousavi Zadeh S.F. 2014. Evaluation of different irrigation managements on Canola production, using AquaCrop. M.S. Thesis, Agronomy, Shiraz University (In Persian).

Nazarifar M.H., Momeni R. 2011. Validation and evaluation of CropSyst crop growth model for determinating suitable cropping pattern under water deficit: a case study in Shahid Chamrans drainage and irrigation network. Water and Soil Science, 15(56), pp. 49-60 (In Persian).

Panda P.K., Behera S.K., Kashyap P.S. 2003. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions, Agricultural Water Management, (63), pp. 37-56.

Pannkuk C.D., Stockle C.O., Papendick R.I. 1998. Evaluating CropSyst simulations of wheat management in a wheat-fallow region of the US Pacific Northwest. Agricultural Systems. 57(2), pp. 121-134.

Rabiee Z., Honar T., Kazemi A.R. 2013. Optimal, simultaneous land and water allocation under resource limitation conditions, using soil water balance, (Case study of Doroudzan dam irrigation and drainage network). Iranian J of Irrigation and Drainage, 7(2), pp. 159-166. (In Persian).

Saadati Z., Pirmoradian N., Rezaei M. 2013. Yield response simulation of two local rice varieties to irrigation management using CropSyst model. J of Water and Soil Science, 16(64), pp. 69-81. (In Persian).

Sayyahi H. E., Egdernezhad A., Ebrahimipak N.A. 2020. Simulation of sugar beet yield and water efficiency under different irrigation period. J. of Water Management in Agriculture, 7(1), pp. 11-22. (In Persian).

Sepaskhah A. R., Rezaee-Pour Sh., Kamgar-Haghighi A. A. 2006. Water budget approach to quantify Cowpea yield using crop characteristic equations. Biosystem Engineering, 95(4), pp. 583-596.

Shabani M.K., Honar T. 2008. Optimal management of Irrigation Water Allocation and Cropping Pattern Utilizing Conjunctive Use of Surface and Subsurface Water Resources. J. of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 44, pp. 53-68. (In Persian).

Singh A.K., Tripathy R., Chopra U.K. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. Agricultural Water Management, 95, pp. 776-786.

Stockle C.O., Martin S.A., Campbell G.S. 1994. CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. Agricultural systems, 46, pp. 335-359.

Stockle C.O., Nelson R.L. 1999. CropSyst User's Manual. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.

Stockle C.O., Donatelli M., Nelson R. 2003. CropSyst, A cropping system simulation model. European J. of Agronomy, 18(3-4), pp. 289-307.

Tanner C.B., Sinclair T.R. 1983. Efficient water use in crop production: Research or Re-search?, In Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (eds.). Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.

Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abi Saab M. Th., Stockle C., Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy J., 101(3), pp. 509-521.

Yazdani R. 2015. Calibration and validation of CropSyst model under different irrigation management for growth simulation of Alvand variety of wheat plant in Eghlid. M.S. Thesis, Water Science and Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University. (In Persian).

Zhang H., Oweis T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region, Agricultural Water Management, 38, pp. 195-211.