

شبیه‌سازی عملکرد جو در سطوح مختلف آبیاری با مدل AquaCrop

معصومه رضانی^۱، حسین بابازاده^{۲*} و مهدی سرائی تبریزی^۳

۱- دانش آموخته آبیاری و زهکشی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

h_babazadeh@srbiau.ac.ir

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

پذیرش: ۹۶/۲/۲۰

بازنگری: ۹۶/۲/۱۷

دریافت: ۹۵/۱۲/۱۵

چکیده

امروزه مدیریت بهینه آب آبیاری بسیار ضروری می‌باشد و ابزارهای ارزشمندی به نام مدل‌های مدیریتی آبیاری این بهینه‌سازی را تسهیل کرده و بهبود بخشیدند. بدین منظور، در آزمایشی دو ساله ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۵-۱۳۸۴ به واسنجی مدل AquaCrop و بررسی دقت آن در شبیه‌سازی شاخص‌های محصول جو در منطقه داراب پرداخته شد. واسنجی مدل از طریق مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعات صحرایی و شبیه‌سازی انجام شد. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال اول برای واسنجی مدل و در سال دوم برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر ماده خشک قسمت هوایی گیاه شبیه‌سازی شده توسط مدل با شاخص‌های آماری d و NRMSE در سال اول کشت به ترتیب برابر ۰/۹۸۲ و ۰/۰۹۴ و در سال دوم ۰/۹۳۵ و ۰/۱۹۸ و مقدار عملکرد دانه برآورد شده توسط مدل در سال اول کشت به ترتیب برابر ۰/۹۸۱ و ۰/۱۷۲ و در سال دوم برابر ۰/۹۹۲ و ۰/۱۰۳ بود. نتایج آزمون‌های آماری نشان دادند که مدل AquaCrop از دقت بالایی برخوردار بوده است.

کلید واژه‌ها: بهره‌وری آب، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک، ماده خشک، مدل AquaCrop.

مقدمه

با رشد جمعیت و ارتقای سطح زندگی مردم، تقاضای جهانی برای مصرف آب شیرین به‌طور دائم افزایش می‌یابد. کشاورزی نه تنها بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در دنیا می‌باشد، بلکه یکی از ارزان‌ترین و کم‌کارایی‌ترین مصرف‌کنندگان با بالاترین میزان اختصاص یارانه به آن است (Alizadeh et al., 2010).

بسیاری از کشورها به‌خصوص کشورهای خشک و نیمه‌خشک قرار دارند برای تولید محصولات کشاورزی به آب نیاز دارند و بسیاری از تولیدات زراعی و باغی کشور ما نیز حاصل کشت آبی می‌باشد (Zand-Parsa, 2002). با تخصیص بیش از ۷۰ درصد منابع آب به بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا، کشاورزی فاریاب اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب می‌باشد (Fereris and Soriano, 2007). تأکید بر کشاورزی فاریاب به این علت است که آبیاری نقشی بسیار مهم در افزایش تولید مواد غذایی دارد. این امر برای تأمین مواد غذایی جمعیت جهان که به سرعت رو به گسترش است، بسیار حیاتی می‌باشد. در شرایط کمبود آب با کیفیت خوب، بهبود کارایی مصرف آب که مبتنی بر تولید بیش‌تر به ازای هر واحد آب مصرفی است، بسیار با اهمیت می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، آگاهی دقیق از مصرف آب و عملکرد

محصول ضروری است (Babazadeh and Sarai Tabrizi, 2012). گزینه‌های مدیریتی که به‌وسیله مطالعات صحرایی بررسی می‌شوند، به‌دلیل زمان‌بر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌گردند (Shahroukhnia, 2008). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی را تا حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و آن‌ها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (Moradi, 2012). در سال‌های گذشته مدل‌های زیادی برای مطالعه مدیریت آبیاری در سطح مزرعه معرفی و به کار برده شده‌اند که می‌توان به مدل کراپ وات (CROPWAT) (Kuo et al., 2006) و مدل باجت (Budget) اشاره نمود که نظریه پایه‌ای این مدل‌ها (نشریه ۳۳ فائو و معادله بیلان جرمی آب)، پیکربندی و الگوریتم آن‌ها بسیار مشابه با مدل آکوآکراپ (AquaCrop) می‌باشد. تنها فرق بین آن‌ها این است که مدل آکوآکراپ از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به‌دست آمده است و الگوریتم اصلی به‌کار رفته در مدل (Raes et al., 2009) ارائه شده است. هم‌چنین مدل SWAP که براساس معادلات جریان آب و املاح در خاک (معادله ریچاردز) عمل می‌کند یکی دیگر از مدل‌های بسیار کاربردی می‌باشد که برای مطالعه توازن

کم‌آبی به خوبی شبیه‌سازی شد. تحلیل حساسیت نشان داد که مدل نسبت به ضریب گیاهی مربوط به تعرق، بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت، رطوبت در ظرفیت زراعی، رطوبت اشباع و دمای هوا حساس‌تر از سایر پارامترهاست (Mohammadi et al., 2015).

هدف از این مطالعه ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی واکنش عملکرد جو در سطوح مختلف آبیاری از طریق مقایسه نتایج مدل با نتایج حاصل از مطالعات صحرائی بوده است. نتایج این ارزیابی می‌تواند در اتخاذ راهکارهای مدیریتی بهینه آبیاری جو در شرایط اقلیمی منطقه یاری رساند.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل آکواکراپ

اهمیت و پیچیدگی عملکرد گیاه نسبت به آب مصرفی منجر به ارائه توابع فراوانی در تعیین این عامل کرده است. در نشریه آبیاری و زهکشی شماره ۳۳ و ۶۶ فائو به ترتیب توسط Dorenbas and Kasam و Steduto et al. تابع پایه عملکرد گیاه نسبت به کمبود آب را معرفی کرده است. این رابطه به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

که در آن Y_x و Y_a به ترتیب حداکثر عملکرد و عملکرد واقعی، ET_x و ET_a به ترتیب حداکثر تبخیر-تعرق و تبخیر-تعرق واقعی گیاه و K_y ضریب تناسب بین کاهش محصول نسبی و کاهش تبخیر-تعرق نسبی است.

درک متقابل روابط آب-خاک-عملکرد از سال ۱۹۷۹ به‌طور محسوسی توسعه یافت و اهمیت ویژه بهره‌وری آب، سازمان خوار و بار کشاورزی ملل متحد FAO را به بازسازی و ارزیابی نشریه ۳۳ ترغیب کرد و این امر منجر به توسعه مدل آکواکراپ شد. شکل ۳-۱ محیط کار مدل گیاهی آکواکراپ را نشان می‌دهد.

این مدل به وسیله تفکیک تبخیر-تعرق به تعرق از سطح برگ و پوشش گیاهی (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E) بنا شده است و این از نقاط قوت مدل می‌باشد زیرا آب تبخیر شده از سطح خاک در محاسبات آب مصرف شده (تعرق) در فرایند رشد و نمو گیاه اعمال نمی‌شود. در این مدل رشد و پیری تاج پوشش گیاهی به‌عنوان پایه برآورد تعرق و تفکیک آن از تبخیر، شبیه‌سازی عملکرد نهایی (Y) به‌عنوان تابعی از ماده خشک نهایی (B) و شاخص برداشت (HI) و تفکیک اثرات تنش آبی در چهار قسمت: رشد تاج پوشش، بسته شدن روزنه‌ها، تسریع پیری تاج پوشش و شاخص برداشت، توسعه یافته است.

آب و املاح در شرایط وجود پوشش گیاهی و همچنین برای مدیریت آبیاری استفاده می‌شود (Marinov et al., 2005). مدل‌های زراعی پویایی مانند SOYMOD (Meyer et al., 1981)، مدل CERES (Jones et al., 1986)، مدل SOYGRO (Egli and Bruening, 1992) و مدل APSIM (Marinov et al., 2005) و برخی دیگر از مدل‌ها مانند CropSyst (Todorovic et al., 2009) هم وجود دارند که به صورت تک گیاهی عمل می‌کنند و در سطح جهان تحقیقاتی روی این مدل‌ها انجام شده است.

مطالعه‌ای در منطقه کرج برای تعیین کارایی مدل آکواکراپ و بر روی گیاه گندم پرداخته شد. به این صورت که کارایی مدل در پیش‌بینی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در شش تیمار آبیاری (تیمارهای ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تیمار تک آبیاری) مطالعه گردید (Alizadeh et al., 2010). نتایج نشان داد که برای دور آبیاری ۷ روزه، مدل در پیش‌بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر-تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب قابلیت خوبی داشته است، در حالی که کارایی مدل در پیش‌بینی این عوامل در دور آبیاری ۱۴ روزه کم‌تر بود (Mousavizadeh, 2014).

در اهواز به واسطی مدل آکواکراپ در بررسی دقت آن در شبیه‌سازی شاخص‌های محصول آفتابگردان پرداختند. این واسطی از طریق مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعات صحرائی و شبیه‌سازی انجام شد. نتایج آزمون‌های آماری نشان دادند که مدل از دقت بالایی برخوردار بوده است. درصد خطای پیش‌بینی برای شاخص‌های بهره‌وری آب محصول، بهره‌وری آب زیست‌توده، محصول و زیست‌توده به ترتیب ۴/۳، ۷/۲۴، ۲۰/۸۵ و ۲۴/۶۶ می‌باشند (Heydarinia et al., 2012).

پژوهشی به‌منظور تعیین عمق بهینه آبیاری و تحلیل اقتصادی آن برای محصول گندم و گوجه‌فرنگی در مزارع خراسان رضوی به کمک مدل AquaCrop انجام شده است. با محاسبه منحنی توابع تولید و محاسبه ۴ سطح از آبیاری توانستند عمق بهینه آبیاری متناسب با حداکثر سود را تعیین نمایند. میزان سود حاصله در هر هکتار از محصولات گندم آبی و گوجه‌فرنگی برای حداکثر عمق آبیاری در شرایط بهینه به ترتیب برابر با ۵۱/۰۱ و ۱۱۷/۸ میلیون ریال به‌دست آمد (Ansari et al., 2014).

به‌منظور اعتبارسنجی مدل AquaCrop در منطقه بیرجند بر روی گندم، آزمایشی در قالب طرح کرت‌های خرد شده به‌صورت فاکتوریل انجام شد که در آن سه فاکتور شوری آب آبیاری در سه سطح به‌عنوان کرت‌های اصلی و دو رقم گندم و مقدار ۴ سطح آب آبیاری به‌عنوان کرت‌های فرعی اجرا گردید. در ابتدا مدل به‌طور جداگانه برای هر تیمار شوری و سپس به‌طور هم‌زمان برای تیمارهای شوری واسطی و اعتبارسنجی شد. عملکرد محصول، زیست‌توده و کارایی مصرف آب برای دو رقم در شرایط شوری و

چهار متغیر اول از ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی واقع در منطقه مطالعه قابل دسترسی است و برای غلظت دی اکسید کربن از اطلاعات موجود در رصدخانه Manaloa در هاوایی استفاده می‌شود. مقادیر تبخیر- تعرق مرجع به صورت جداگانه از روش فائو-پنمن-مانیتیت محاسبه شده است.

داده‌های مربوط به خاک

مؤلفه‌ی خاک در مدل آکواکراپ به گونه‌ای طراحی شده است که در آن عمق خاک می‌تواند به لایه‌های مختلف تقسیم‌بندی شود و پارامترهای خاک هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت‌های اشباع، ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، را تخمین می‌زند. البته کاربر می‌تواند خصوصیات خاک را به صورت دستی نیز وارد کند. در نیم‌رخ خاک اشغال شده توسط ریشه گیاه، بیلان آب خاک با استفاده از رواناب، نفوذ (آبیاری و بارندگی)، توزیع مجدد یا زهکشی داخلی، نفوذ عمقی، صعود مویینگی، جذب و تبخیر-تعرق به صورت روزانه محاسبه می‌شود. یک ویژگی ممتاز مدل در بیلان آب خاک جداسازی تبخیر از تعرق است. مدل در شبیه‌سازی تبخیر اثر خاکپوش، پوشش گیاهی پژمرده، خیس شدگی جزئی و سایه‌اندازی کانوپی را در نظر می‌گیرد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

پارامترها و داده‌های گیاهی

داده‌های مربوط به گیاه و روابط آن با وضعیت آب در خاک و نیاز تبخیری اتمسفر به وسیله تأثیرات تنش آب که با چهار عامل تأثیر تنش بر رشد تاج پوشش گیاهی، هدایت روزانه‌ای از طریق باز و بسته نگه داشتن روزنه‌ها، پیری تاج پوشش گیاهی و شاخص برداشت بیان می‌شوند، متمایز هستند. داده‌های گیاهی ورودی شامل پارامترهای ثابت و داده‌های ویژه کاربر می‌باشند.

پارامترهای ثابت

مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای اکثر گیاهان زراعی به عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان با موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. این پارامترها با استفاده از داده‌های رشد گیاهان در شرایط مطلوب و بدون محدودیت و برای کاربرد آن‌ها در این شرایط واسنجی شده‌اند و برای کاربرد آن‌ها در شرایط وجود تنش آبی از طریق تأثیر ضریب پاسخ به تنش تعدیل می‌شوند. این پارامترها به عنوان پیش‌فرض در مدل و برای گونه‌های زراعی مهم (مانند گندم، ذرت و پنبه) وجود دارد. بنابراین در این مطالعه برای ارزیابی مدل از پارامترهای پیش‌فرض استفاده شد. در مورد رقم‌ها فرض شده است که اختلاف رقم‌ها فقط در مراحل فنولوژیکی آن‌هاست. در حالی که احتمالاً اختلاف‌های دیگری به ویژه در مقاومت به تنش وجود دارند. با این وجود این اختلافات معمولاً

تفکیک تبخیر- تعرق به تبخیر و تعرق باعث در نظر نگرفتن تبخیر از سطح خاک به عنوان قسمتی از آب مصرفی می‌شود. همچنین شبیه‌سازی عملکرد، ماده خشک و شاخص برداشت بصورت جداگانه باعث بررسی اثرات محیطی بر روی این پارامترها می‌گردد. دلایل نام برده شده باعث استفاده از معادله ریاضی زیر در مدل آکواکراپ به جای رابطه (۱) شده است:

$$B = WP \Sigma Tr \quad (2)$$

که در آن WP بهره‌وری آب تعرق شده توسط گیاه برحسب کیلوگرم در مترمکعب، ΣTr مجموع تعرق گیاه در کل فصل رشد بر حسب میلی‌متر، B ماده خشک بر حسب کیلو گرم در مترمربع می‌باشد.

$$Y = HI \times (B) \quad (3)$$

که در این رابطه Y عملکرد گیاه، B ماده خشک بالای سطح خاک و HI شاخص برداشت. از بارزترین نقاط قوت رابطه (۲) نسبت به رابطه (۱) در نظر گرفتن آب مصرفی گیاه (Tr) به جای تبخیر- تعرق (ET) در محاسبات عملکرد می‌باشد.

با اصلاح نمودن مناسب WP برای شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل خواهد شد (Todorovic et al., 2009). بنابراین رابطه (۱) دلالت بر صحت و عمومیت مدل دارد. برتری دیگر معادله مورد استفاده در آکواکراپ این است که شبیه‌سازی فرایند رشد گیاه در آن با مقیاس روزانه صورت می‌گیرد که این مقیاس زمانی نزدیک‌تر به مقیاس زمانی عکس‌العمل شبیه‌سازی در مقیاس زمانی طولانی عکس‌العمل گیاه نسبت به کمبود آب است ولی در رابطه (۱) شبیه‌سازی در مقیاس زمانی طولانی‌تری (ماهانه یا فصلی) انجام می‌پذیرد.

داده‌های ورودی

داده‌های اقلیمی

در مدل آکواکراپ، آب و هوا در فایل climate قرار می‌گیرد. متغیرهای مورد نیاز در این قسمت از مدل عبارتند از: بیشینه و کمینه دمای روزانه (T) بر حسب درجه سانتی‌گراد، بارندگی (R)، تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) و متوسط غلظت سالیانه دی اکسیدکربن CO_2 . مدل از داده‌های بیشینه و کمینه دمای روزانه به منظور محاسبه درجه روز رشد برای تعیین مراحل رشد و عملکرد و همچنین تعدیل ماده خشک در هنگام سرمازدگی استفاده می‌کند. بارندگی و تبخیر تعرق نیز تعیین‌کننده بیلان آب خاک در ناحیه ریشه است و غلظت CO_2 بر WP و رشد برگ اثرگذار می‌باشد. آمار مربوط به

در کویر، ریحان، EB-79-4، EB-80-9، EB-80-7، جنوب و شانه‌ای که در ایستگاه تحقیقاتی بختاجرد، واقع در استان فارس، شهرستان داراب کیلومتر ۲۵۳ جاده شیراز، با طول جغرافیایی "۵۴' ۱۷' ۴۶^۰ و عرض جغرافیایی "۲۸' ۴۷' ۲۸^۰ و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۹۸/۲ متر، طی دو سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۵-۱۳۸۴ کشت نمودند. شهرستان داراب یکی از شهرستان‌های گرمسیری بوده و با توجه به وسعت اراضی حاصلخیز و شرایط مطلوب و متنوع آب و هوایی از جایگاه ویژه‌ای در سطح استان و کشور برخوردار است. کم‌تر شهرستانی در کشور وجود دارد که دارای چنین تنوع چشمگیری در تولید محصولات زراعی و باغی باشد. بخش کشاورزی مهم‌ترین بخش در اقتصاد شهرستان داراب محسوب می‌شود، به طوری که امرار معاش بیش از ۹۰ درصد جمعیت به‌طور مستقیم و غیر مستقیم از بخش کشاورزی تأمین می‌گردد. روش آبیاری این پژوهش بارانی خطی بوده و آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در کرت آزمایشی هر یک به مساحت ۴/۵ مترمربع انجام شد. تیمارهای انتخابی با نام‌های T1، T2، T3 و T4 انتخاب شدند که به‌ترتیب ۴ خط هر یک به فاصله سه متر نسبت به خط اصلی قرار داشتند. مقدار آب آبیاری در سال اول و دوم کشت به‌ترتیب در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند.

کوچک بوده و انتظار می‌رود امکان به‌کارگیری پارامترهای ثابت بدون واسنجی برای هر رقم وجود داشته باشد. مقدار WP با استفاده از داده‌های نیاز تبخیری، مراحل فنولوژیکی و میانگین غلظت CO₂ در سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۹۵، لحاظ شد.

داده‌ها و پارامترهای مخصوص کاربر

همه پارامترهای مربوط به مکان و پارامترهای ویژه گیاهی طرح از قبیل ویژگی‌های آب و خاک، حداکثر عمق ریشه، تراکم گیاه، زمان کاشت و مدیریت آبیاری در گروه پارامترهای مخصوص کاربر طبقه‌بندی می‌شوند. ضریب گیاهی پایه حداکثر مقدار ۱/۱ و حداکثر عمق مؤثر ریشه یک متر و حداقل آن ۰/۷ متر در نظر گرفته شد. مقدار WP* برابر ۱۷ گرم بر متر مربع و HI₀ مقدار ۳۲ درصد لحاظ شد. قسمت مربوط به شوری نیز در مدل غیر فعال گردید.

مدیریت مزرعه‌ای

در این تحقیق حداقل به دو سال داده مزرعه‌ای نیاز است. اگر نتایج واسنجی و اعتبارسنجی قابل قبول باشد می‌توان از مدل‌ها در سطح وسیع استفاده کرد. لذا برای انجام این پژوهش، از نتایج اندازه‌گیری شده‌ی کشت گیاه جو استفاده شده است. در آن تحقیق این کار ۱۰ نوع رقم جو شامل: ایزه، محلی گچساران، والفجر، کارون

جدول ۱- داده‌های ورودی مربوط به خاک برای مدل آکواکراپ

مقدار	پارامتر مربوطه
لوم	بافت خاک
۱۷۲۸	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی متر در روز)
۴۰-۵۰	رطوبت اشباع (درصد حجمی)
۱۴-۱۶	رطوبت ظرفیت زراعی (درصد حجمی)
۷-۹	رطوبت نقطه پژمردگی (درصد حجمی)

جدول ۲- مقدار آب آبیاری در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳

تاریخ	روز پس از کاشت	تیمار ۱	تیمار ۲	تیمار ۳	تیمار ۴
۱۳۸۳/۱۱/۰۷	۱	۳۸	۲۵/۶	۱۳/۷	۱/۸
۱۳۸۳/۱۲/۲۴	۴۸	۴۱/۲	۱۶/۲	۱۳/۷	۸/۷
۱۳۸۴/۰۱/۰۷	۶۰	۴۷/۴	۳۳/۷	۲۳/۷	۱۰
۱۳۸۴/۰۱/۱۲	۶۵	۳۵	۲۰	۱۰	۱/۳
۱۳۸۴/۰۱/۲۰	۷۳	۶۲/۴	۲۳/۷	۴۲/۴	۳/۷
۱۳۸۴/۰۱/۲۹	۸۲	۷۴/۸	۷۳/۶	۴۴/۹	۱۸/۷
۱۳۸۴/۰۲/۰۵	۸۹	۲۵	۲۳/۷	۱۲/۵	۷/۵

جدول ۳- مقدار آب آبیاری در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴

تیمار ۴	تیمار ۳	تیمار ۲	تیمار ۱	روز پس از کاشت	تاریخ
۷/۱	۲۱/۳	۲۹/۴	۴۵	۱	۱۳۸۴/۱۱/۱۳
۸/۵	۲۵/۶	۳۵/۴	۵۴/۲	۱۶	۱۳۸۴/۱۱/۲۸
۱۰	۳۳/۷	۳۳/۷	۴۷/۴	۲۶	۱۳۸۴/۱۲/۰۸
۸/۷	۲۶/۲	۳۶/۲	۵۵/۳	۳۷	۱۳۸۴/۱۲/۱۹
۷/۶	۲۲/۹	۳۱/۷	۴۸/۴	۴۶	۱۳۸۴/۱۲/۲۸
۹/۱	۳۷/۳	۳۷/۷	۵۷/۷	۶۳	۱۳۸۵/۰۱/۱۶
۱۸/۷	۴۵	۷۳/۶	۷۵	۷۱	۱۳۸۵/۰۱/۲۴
۸/۴	۲۵/۱	۳۴/۷	۵۳	۸۰	۱۳۸۵/۰۲/۰۲
۷/۵	۱۲/۵	۲۳/۷	۲۵	۹۰	۱۳۸۵/۰۲/۱۲

تجزیه و تحلیل داده‌ها

خروجی مدل شامل مقدار رطوبت خاک، تبخیر از سطح خاک، تعرق از پوشش گیاهی، ماده خشک و عملکرد گیاهی می‌باشد. برای تحلیل بهتر نتایج خروجی مدل از شاخص‌های آماری d و $NRMSE$ به شکل زیر استفاده می‌گردد. اولین شاخص آماری که برای برآورد کردن عملکرد مدل بکار گرفته می‌شود شاخص توافق (d) می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \right] \quad (4)$$

که در آن p_i مقدار برآورد شده توسط مدل و o_i مقدار اندازه‌گیری شده واقعی و \bar{o} میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. شاخص d بین صفر و یک متغیر است و زمانی توافق بهتری را بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان می‌دهد که به یک نزدیک‌تر باشد. (Meyer et al., 1981).

پارامتر آماری دیگری که برای ارزیابی صحت مدل به کار گرفته می‌شود عبارت است از مقدار نرمال شده جذر میانگین مربعات خطا ($NRMSE$) که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}}{\bar{o}} \quad (5)$$

که در این روابط p_i و o_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده پارامترها، n تعداد کل داده‌ها و \bar{o} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند. $NRMSE$ تفاوت نسبی داده‌های برآورد شده را در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. مقادیر برآورد شده شامل بسیار خوب با $NRMSE$ کم‌تر از ۰/۱، خوب با $NRMSE$

بین ۰/۱ الی ۰/۲، نسبتاً خوب با $NRMSE$ بین ۰/۲ الی ۰/۳ و بد با $NRMSE$ بزرگ‌تر از ۰/۳ می‌باشند.

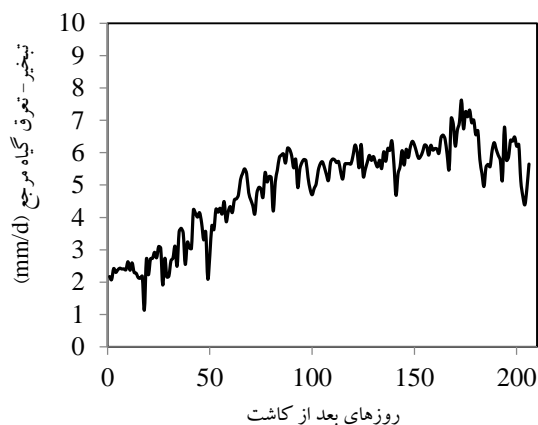
نتایج و بحث

در این پژوهش مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع، توسط روش پنمن- مانتیت محاسبه شده و نتایج آن طی دو سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۵-۱۳۸۴ به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع در سال اول با مقدار ۱۰۱۴/۷۷ میلی‌متر کمتر از مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع در سال دوم با مقدار ۱۰۲۷/۷۳ میلی‌متر می‌باشد. حداکثر تبخیر- تعرق گیاه مرجع در سال اول ۷/۶۳ و حداقل آن ۱/۱۳ میلی‌متر در روز می‌باشد. همچنین حداکثر تبخیر- تعرق گیاه مرجع در سال دوم ۷/۶۷ و حداقل آن ۲/۲۹ میلی‌متر در روز حاصل شده است.

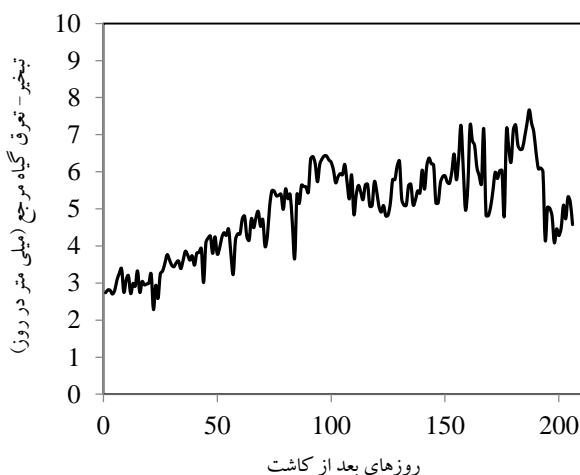
برای ارزیابی صحت مدل، در برآورد تبخیر- تعرق گیاهی، ماده خشک گیاهی و عملکرد دانه گیاهی از شاخص‌های آماری d ، R^2 و $NRMSE$ استفاده شد. نتایج آن در سال اول و در سال دوم کشت در جداول (۴، ۵ و ۶) نشان داده شده است.

مقدار شاخص d در سال اول و دوم کشت به ترتیب برابر ۰/۹۰۶ و ۰/۹۳۰ برآورد شده که نشان می‌دهد مدل، در برآورد تبخیر- تعرق گیاهی در سال اول و دوم کشت دقت خوبی داشته و مدل در هر دو سال مقدار این پارامتر را به خوبی برآورد نموده است (جدول ۴). مدل در سال اول کشت با $NRMSE$ برابر ۰/۱۵۱ و در سال دوم کشت با مقدار ۰/۱۳۸ برآورد خوبی از تبخیر- تعرق گیاهی نشان می‌دهد. مقدار تبخیر- تعرق گیاهی ماده خشک گیاهی و عملکرد دانه اندازه‌گیری شده در برابر داده‌های برآورد شده نسبت به خط یک به یک در سال اول و دوم کشت به ترتیب در شکل‌های (۳) تا (۸) نشان داده شده است.

رضانی و همکاران: شبیه‌سازی عملکرد جو در سطوح مختلف...



شکل ۱- مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع طی سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ از روز بعد از کاشت (۷ بهمن ماه ۱۳۸۳)



شکل ۲- مقدار تبخیر- تعرق گیاه مرجع طی سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ از روز بعد از کاشت (۱۳ بهمن ماه ۱۳۸۴)

جدول ۴- آزمون آماری تبخیر- تعرق گیاهی طی دو سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۵-۱۳۸۴

شاخص آماری			سال زراعی
R^2	NRMSE	d	
۰/۹۵۴	۰/۱۵۱	۰/۹۰۶	۱۳۸۳-۸۴
۰/۹۴۷	۰/۱۳۸	۰/۹۳۰	۱۳۸۴-۸۵

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های آماری d ، R^2 و NRMSE در برآورد ماده خشک و عملکرد دانه گیاهی

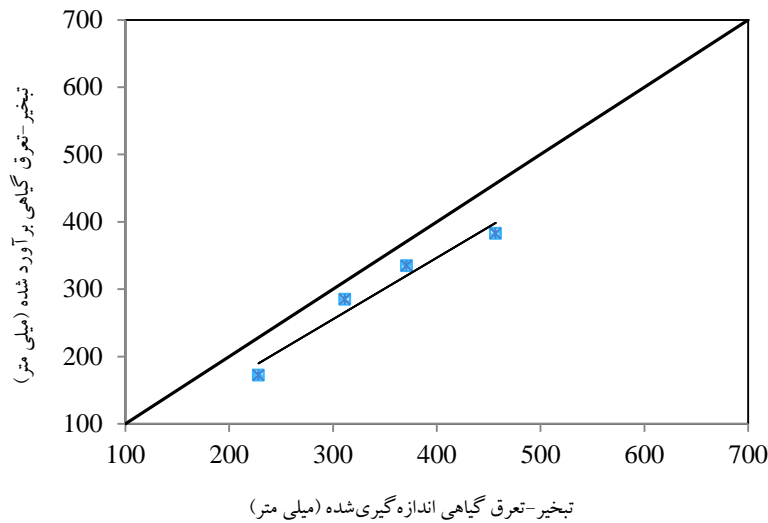
سال ۸۴-۱۳۸۳

عملکرد دانه گیاهی (تن در هکتار)	ماده خشک گیاهی	پارامتر آماری
۰/۹۸۱	۰/۹۸۲	d
۰/۹۲۸	۰/۹۸۶	R^2
۰/۱۷۲	۰/۰۹۴	NRMSE

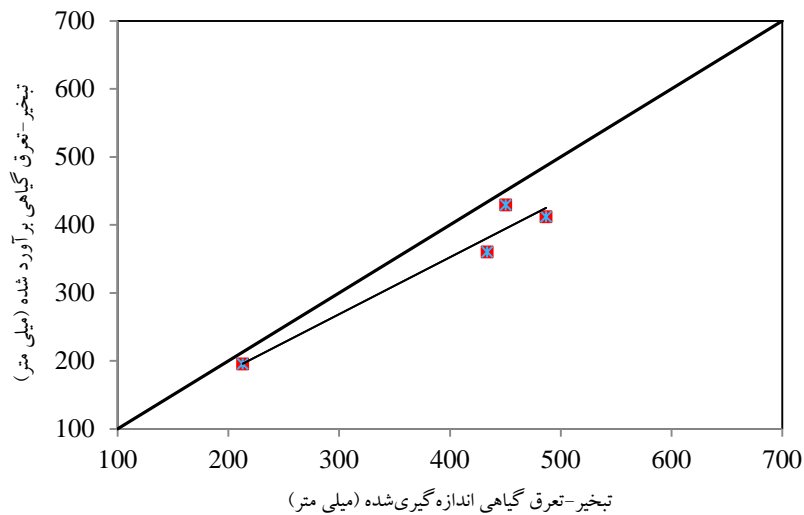
جدول ۶- مقایسه شاخص های آماری d ، R^2 و NRMSE در برآورد ماده خشک و عملکرد دانه گیاهی

سال ۸۵-۱۳۸۴

پارامتر آماری	ماده خشک گیاهی	عملکرد دانه گیاهی (تن در هکتار)
d	۰/۹۳۵	۰/۹۹۲
R^2	۰/۹۷۴	۰/۹۸۶
NRMSE	۰/۱۹۸	۰/۱۰۳

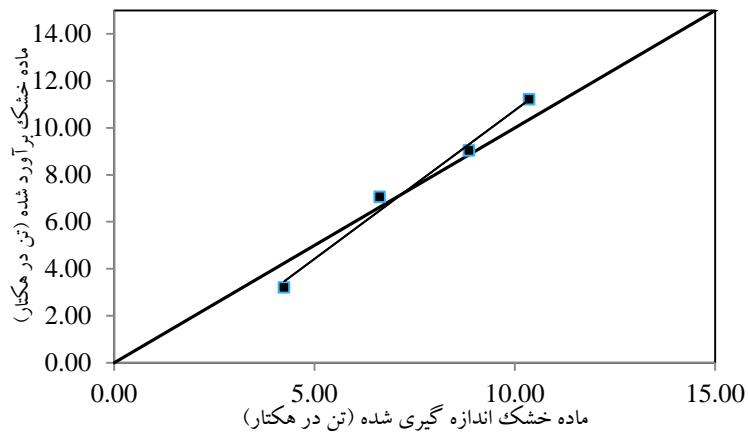


شکل ۳- تبخیر- تعرق گیاهی اندازه گیری شده و برآورد شده در مقایسه با خط یک به یک طی سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳

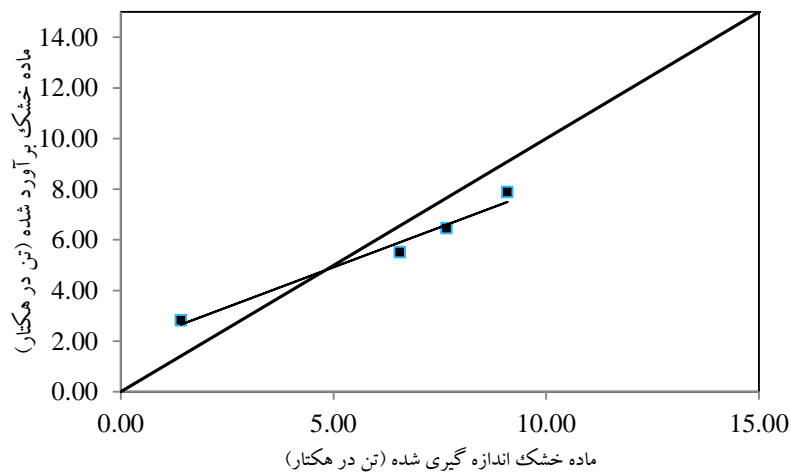


شکل ۴- تبخیر- تعرق گیاهی اندازه گیری شده و برآورد شده در مقایسه با خط یک به یک طی سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴

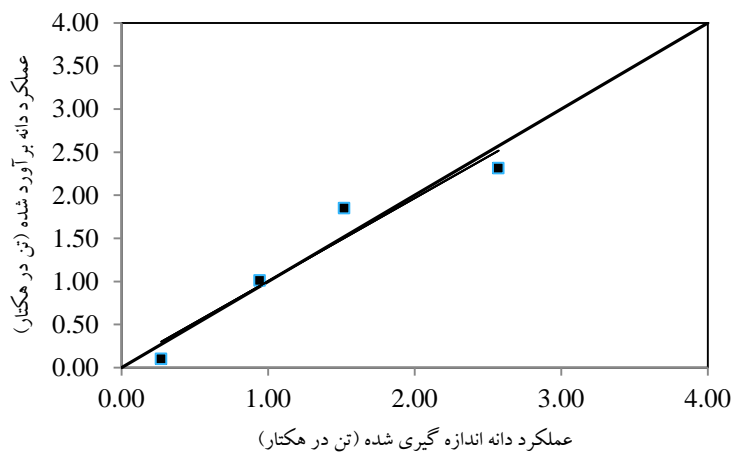
رضانی و همکاران: شبیه‌سازی عملکرد جو در سطوح مختلف...



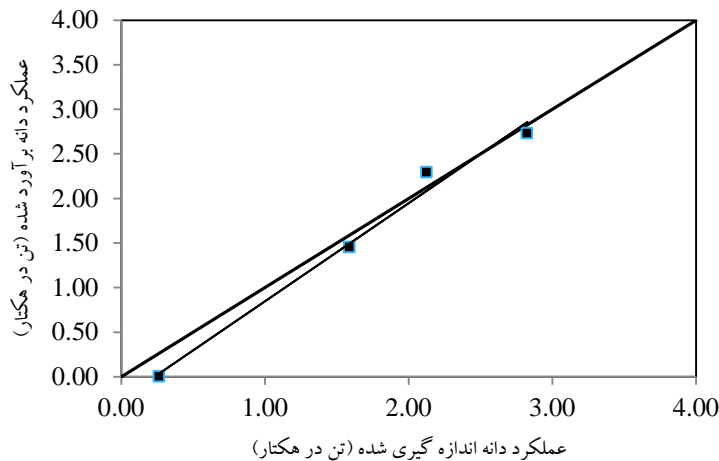
شکل ۵- مقدار ماده خشک گیاهی اندازه‌گیری و برآورد شده در مقایسه با خط یک به یک طی سال زراعی ۸۴-۸۳



شکل ۶- مقدار ماده خشک گیاهی اندازه‌گیری و برآورد شده در مقایسه با خط یک به یک طی سال زراعی ۸۴-۸۵



شکل ۷- مقدار عملکرد دانه گیاهی اندازه‌گیری و برآورد شده در مقایسه با خط یک به یک طی سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳



شکل ۸- مقدار عملکرد دانه گیاهی اندازه گیری و برآورد شده در مقایسه با خط یک به یک طی سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴

پیشنهاد می‌شود کارایی آن برای سایر محصولات نیز مورد بررسی قرار گرفته و همچنین میزان دقت مدل در تنش‌های کم، متوسط و شدید به‌طور جداگانه مورد بحث واقع شود. یکی از دلایلی که می‌توان برای دقت بالای شبیه‌سازی در این طرح برشمرد، ایجاد کامل فایل اطلاعات گیاهی به‌وسیله کاربر و انطباق کامل اطلاعات موجود در مدل با شرایط منطقه می‌باشد. لذا توجه به این نکته در سایر تحقیقات نیز حائز اهمیت بسیار است که در هر منطقه، با توجه به تأثیرات اقلیم بر رشد و نمو محصول، فایل اطلاعات گیاهی مطابق با رقم و اقلیم مورد نظر ساخته شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از زحمات و همکاری صمیمانه جناب آقای دکتر علی‌اکبر کامگار حقیقی و سرکار خانم مهندس سعیده پرویزی سپاسگزاری می‌نمایند.

نتیجه‌گیری

هدف فائو از توسعه مدل آکواکراپ، فراهم کردن ابزاری برای کمک به طراحان، کشاورزان و مدیران کشت صنعت‌ها جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری در سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در سراسر جهان است. بنابراین ارزیابی و اعتباربخشی مدل به ویژه برای محصول‌های استراتژیک ضروری است. نتایج این بررسی نشان داد که مدل آکواکراپ قادر است مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب را در اکثر موارد به خوبی شبیه‌سازی کند. مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد به آب قابل وصول نسبت به سایر مدل‌های شبیه‌سازی به تعداد پارامترهای ورودی کمتر و قابل وصول‌تری نیاز دارد. اما این سادگی باعث کاهش دقت و توانمندی مدل نشده است. با توجه به خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌های صحرائی، خطاهای مدل و مقادیر شاخص‌های آماری می‌توان اظهار داشت که این مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی برخوردار می‌باشد، اما جهت بررسی بهتر و دقیق‌تر کارایی مدل،

منابع

- 1- Alizadeh, H. A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani Etedali, H. and Janbaz, H. R. 2010. Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4 (2), pp. 273-283 (In Persian).
- 2- Ansari, H., Salarian, M., Takarli, A. and Bayram, M. 2014. Determining Optimum Irrigation Depth for Wheat and Tomato Crops Using Aquacrop Model (A case study in Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8 (1), pp. 86-95 (In Persian).
- 3- Babazadeh, h. and Sarai Tabrizi, M. 2012. Assessment of AquaCrop Model under Soybean Deficit Irrigation Management Conditions. *Journal of Water and Soil*, 26 (2), pp. 329-339 (In Persian).

- 4- Egli, D.B. and W. Bruening. 1992. Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO, *Agricultural and Forest Meteorology Journal*, 62, pp. 19-29.
- 5- Fereres E., and M. A. Soriano. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58, pp. 147-159.
- 6- Heydarinia, M., Nasser, A. and Boroumandnasab, S. 2012. Investigating the possibility of sunflower irrigation planning in using the aquacap model. *Journal of Water Resources Engineering*, 5 (3), pp. 154-161 (In Persian).
- 7- Jones, C.A. Kiniry, J.R. and P.T. Dyke. 1986. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development, User's guide of CERES-Maize. Texas University Press College Station (USA), 435 pp.
- 8- Kuo Sh.F., Lin B.J., and Shieh H.J. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural Water Management*, 82, pp. 433-451.
- 9- Marinov, D. Querner, E. and J. Roelsma. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. *Journal of Contaminant Hydrology*, 77, pp. 145-164.
- 10- Meyer, G.E. Curry, R.B. Streeter, J.G. and C.H. Baker. 1981. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. *Transactions of the ASABE*, 24 (2), pp. 421- 429.
- 11- Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davary, K., Ansari, H. and Shahidi, A. 2015. Validation of AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Yield and Water Use Efficiency under Simultaneous Salinity and Water Stress. *Journal of Water and Soil*, 29 (1), pp. 67-84 (In Persian).
- 12- Moradi, M. 2012. Evaluation of aquacap model in autumn wheat wheat estimation with supplemental irrigation in Bajgah area of Fars province. M.Sc. Thesis, 115 pp. Water Engineering Department, Agriculture College, Shiraz University, Shiraz, Iran (In Persian).
- 13- Mousavizadeh, F. 2014. Evaluation of the effect of different irrigation management on canola production using the aquacap model. M.Sc. Thesis, 124 pp. Water Engineering Department, Agriculture College, Shiraz University, Shiraz, Iran (In Persian).
- 14- Raes D. 2002. Reference manual of Budget model. K. U. Leuven, Faculty of Agricultural and Applied Biological sciences, Institute for Land and Water Management, Leuven, Belgium, 356 pp.
- 15- Raes, D., Steduto, P. Hsiao, T.C. and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, pp. 438-447.
- 16- Shahroukhnia, M. H. 2008. Determination of vegetation coefficients and potential evapotranspiration of two wheat and corn plants using weights of Lysimeter in Kushkar region of Fars. M.Sc. Thesis, 131 pp. Water Engineering Department, Agriculture College, Shiraz University, Shiraz, Iran (In Persian).
- 17- Todorovic, M. Albrizio, R. Zivotic, L. Abi Saab, M. Stöckle, C. and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101, pp. 509-521.
- 18- Zand-Parsa, Sh. 2002. The future of Computer models of plants growth, Agricultural Sminar, Shiraz University, 5-6 August, Shiraz, Iran (In Persian).