ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد دانه گندم زمستانه رقم شیراز با استفاده از مدل‌های WSM و AquaCrop

شاهرخ زندپارسا[1*]، سعیده پرویزی[1]، علیرضا سپاس‌خواه[1] و مهدی مهبد[2]

(تاریخ دریافت:۱۳۹۴/۴/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۱۶)

چکیده

در توسعه کشاورزی، عوامل زیادی مانند شرایط آب و هوایی، خاک، کود، زمان و مقدار آبیاری دخالت دارند که برای منظور کردن آنها لازم است از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه استفاده نمود. لذا در این پژوهش، مقادیر رطوبت خاک در عمق‌های مختلف، ماده خشک و عملکرد دانه گندم زمستانه در پنج تیمار آبیاری دیم، ۰/۵، ۰/۸، ۱/۰ و ۱/۲ برابر آبیاری کامل طی دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ واقع در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در استان فارس، توسط مدل‌های AquaCrop و WSM شبیه‌سازی شد. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال اول زراعی برای واسنجی مدل‌ها و در سال دوم برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. صحت برآورد رطوبت خاک توسط مدل‌ها، مبنای مقایسه دقت برآورد مقادیر شبیه‌سازی‌شده تبخیر- تعرق واقعی گیاه قرار گرفت. براساس نتایج، در مدل WSM، مقدار رطوبت خاک در لایه‌های مختلف عمق ریشه در سال اعتبارسنجی با مقدار نرمال شده ریشه متوسط مربع خطا (NRMSE) برابر ۰/۱۴ خوب برآورد شده، ولی مدل AquaCrop در برآورد آن دقت کمتری داشت (NRMSE=۰/۲۶). مقادیر برآورد تبخیر- تعرق گیاهی در تیمار آبیاری کامل، در هر دو مدل نزدیک به هم بوده ولی با افزایش تنش رطوبتی، از دقت برآورد مدل AquaCrop کاسته شد. مدل WSM مقدار ماده خشک و عملکرد دانه را با NRMSE به‌ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۱۸ خوب برآورد کرده و مدل AquaCrop با NRMSE به‌ترتیب برابر ۰/۱۹ و ۰/۳۹ در برآورد آنها دقت کمتری داشت.

واژه‌های کلیدی: واسنجی، تبخیر- تعرق، تیمار آبیاری، دیم، اعتبارسنجی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zandparsa@yahoo.com

مقدمه

آب، عناصر غذایی خاک، کود و شرایط آب و هوایی از عواملی هستند که در رشد گیاه مؤثرند. در غالب طرح‌های تحقیقاتی، با متغیر گرفتن یک یا چند عامل و ثابت درنظر گرفتن بقیه عوامل، اثرهای عوامل متغیر در رشد محصول بررسی می‌شود. مشخص است که واکنش‌های بررسی‌شده برای تغییرات یک یا چند عامل تحت اثر دیگر عوامل قرار می‌گیرند که در یک طرح نمی‌توان این اثرها را بررسی کرد. برای مطالعه آثار این عوامل روی رشد گیاه، لازم است تعداد زیادی طرح تحقیقاتی اجرا شود که به علت وقت‌گیر بودن انجام هر طرح، عدم امکان ثابت گرفتن برخی از عوامل در مزرعه یا عدم امکان تهیه برخی از آنها، این کار میسر نمی‌باشد. لذا لازم است با تهیه برنامه‌های کامپیوتری، رشد گیاه شبیه‌سازی شود تا برای بهبود آبیاری و مدیریت تولید گیاه بتوان با تغییر عوامل مؤثر بر رشد آن، با اجرای یک برنامه کامپیوتری، تأثیر عوامل مختلف را به‌دست آورد (۱۴).

از جمله مدل‌های گیاهی، می‌توان به مدل CROPWAT، Budget، AquaCrop، SWAP ، WSM و MSM ۲ اشاره نمود (۴، ۵، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱). در مدل AquaCrop، برای جداسازی تبخیر از تعرق، به‌جای استفاده از شاخص سطح برگ، از سایه‌انداز (کنوپی) گیاهی (بخشی از سطح زمین که توسط گیاه پوشیده شده) استفاده می‌گردد. فراهانی و همکاران (۶) مدل AquaCrop را برای گیاه پنبه تحت شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری در یک منطقه گرم، خشک و باد خیز در شمال سوریه پارامتر گذاری و ارزشیابی کردند. نتایج مقدار خطای برآورد تبخیر- تعرق را کمتر از ۱۳ درصد برآورد نمودند. Katerji و همکاران (۷) مدل AquaCrop را به‌عنوان ابزاری مفید برای شبیه‌سازی پوشش سبز، ماده خشک و تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس روزانه و ماده خشک نهایی و عملکرد و بهره‌وری آب، در مقیاس فصلی دانستند. در این مطالعه، آزمایش‌ها بر روی ذرت و گوجه‌فرنگی، در منطقه‌ای مدیترانه‌ای در سه سطح تنش آبی صورت گرفت. تبخیر- تعرق به‌خوبی با اجرای مدل شبیه‌سازی گردید. موسوی‌زاده (۲) تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری بر تولید کلزا را با استفاده از مدل AquaCrop ارزیابی نمود. او ذکر کرد که نتایج حاصل از مدل واسنجی شده با شرایط تأثیرگذار بر روی رشد، برای عملکرد قابل اعتماد می‌باشد ولی برای ماده خشک از اعتماد کمتری برخوردار است.

بهادری (۱) در بررسی ۳۳ سال اثر مدیریت‌های مختلف آب بر محصول گندم زمستانه در پایین دست سد درودزن، با استفاده از مدل‌های AquaCrop و CropSyst بیان کرد که مدل CropSyst، به‌دلیل ضعف در برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع، اختلاف بین محصول تولیدی در سال‌های تر و خشک را به‌خوبی نشان نمی‌دهد و از این لحاظ مدل AquaCrop نسبت به CropSyst ارجحیت داشت. زندپارسا و همکاران (۱۶) یک مدل شبیه‌سازی برای رشد و محصول دانه ذرت به نام MSM (Maize simulation model) با آبیاری بارانی خطی برای شرایط استان فارس ارائه کردند. این مدل با استفاده از سیستم آبیاری جویچه‌ای با نام ۲MSM اصلاح و اعتبارسنجی گردید (۹). پس از آن، این مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم تحت عنوان WSM (Wheat simulation model) توسط مهبد و همکاران (۸) اصلاح گردید. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه، این مدل به‌خوبی واسنجی و اعتبارسنجی شد.

با توجه به این مطالب، بایستی ارجحیت مدل‌های توسعه یافته محلی برای محصولات مختلف زراعی به اثبات برسد. لذا، هدف پژوهش حاضر، شبیه‌سازی تبخیر- تعرق، ماده خشک و عملکرد دانه گندم زمستانه با استفاده از دو مدل WSM و AquaCrop و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد دانه در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز طی دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop یک مدل ساده، دقیق و توانمند بوده و در

بسیاری از نقاط جهان برای گیاهان مختلف، از جمله گندم، مورد ارزیابی قرار گرفته است (۱۱ و ۱۳). محاسبه تبخیر- تعرق در این مدل، براساس روش ضریب گیاهی دوگانه می‌باشد. ضریب گیاهی در روش دوگانه به دو ضریب جداگانه، که یکی اثر تعرق گیاه را توصیف کرده و ضریب گیاهی پایه K_{cb} نامیده شده و دیگری اثر تبخیر از خاک (K_e) را بیان می‌کند به شکل زیر تفکیک شده است (۱۱):

$$ET_a = (K_{cb} + K_e) ET \quad [۱]$$

بر این اساس، مدل AquaCrop مقدار تبخیر- تعرق واقعی روزانه (ET_a, mm/d) را با تفکیک آن به تبخیر از سطح خاک (E_s, mm/d) و تعرق گیاه (T_r, mm/d) محاسبه می‌نماید. مقدار تبخیر روزانه از لایه سطحی خاک به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_s = K_r (۱ + CC^*) K_{ex} ET_. \quad [۲]$$

که در آن K_r ضریب کاهش تبخیر از سطح خاک براساس رطوبت خاک، $۱-CC^*$ کسری از سطح خاک که با گیاه پوشیده نشده، CC^* کسر تاج پوشش گیاهی تعدیل شده برای شرایط خرد اقلیمی، $ET_.$ تبخیر- تعرق گیاه مرجع و K_{ex} ضریب تبخیر از سطح خاک برای خاک کاملاً مرطوب (که روی آن هیچ سایه‌ای نیفتاده) می‌باشد (۱۱). ضریب کاهش تبخیر از سطح خاک بین صفر و ۱ متغیر بوده و با رابطه زیر برآورد می‌گردد (۱۱):

$$۰ \le K_r = \frac{e^{f_K W_{rel}} - ۱}{e^{f_K} - ۱} \le ۱ \quad [۳]$$

که در آن f_K فاکتور کاهش (بدون بعد) و W_{rel} مقدار رطوبت نسبی در لایه‌های خاک (بدون بعد) می‌باشد. مقدار تعرق روزانه به شرح زیر محاسبه می‌گردد (۱۱):

$$T_r = K_s K_{cbx} CC^* ET_. \quad [۴]$$

که در آن K_{cbx} حداکثر ضریب تعرق گیاهی می‌باشد. هنگامی که خاک سطحی خشک بوده ولی تعرق به میزان پتانسیل است، به‌عبارتی مقدار آب محدود کننده تعرق نیست، حداکثر ضریب گیاهی به‌صورت نسبت تبخیر- تعرق استاندارد گیاه به تبخیر- تعرق گیاه مرجع تعریف می‌گردد. مقدار این ضریب برای سه مرحله ابتدایی، میانی و پایانی رشد گیاه، در جداولی توسط Allen و همکاران (۳) ارائه شده است. K_s ضریب تنش آبی در شرایط و دوره‌های مختلف رشد بوده و با استفاده از معادله زیر برآورد می‌گردد (۱۱):

$$K_s = ۱ - \frac{e^{D_{rel} f_{shape}} - ۱}{e^{f_{shape}} - ۱} \quad [۵]$$

که در آن D_{rel} کمبود نسبی (بدون بعد) و f_{shape} فاکتور شکل (بدون بعد) می‌باشد.

در مدل AquaCrop، شبیه‌سازی ماده خشک و عملکرد دانه براساس شاخص برداشت به شرح زیر می‌باشد (۱۱):

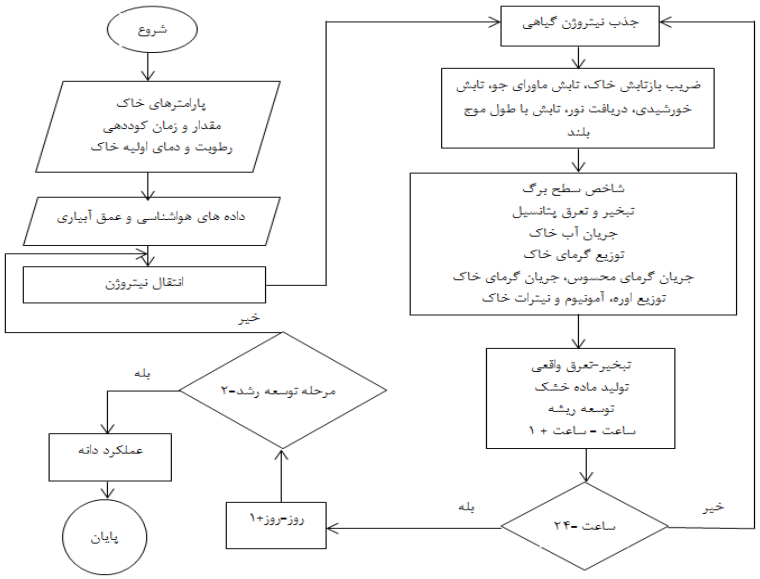
$$DM = ۰/۰۱ K_{sb} WP^* \sum \frac{T_r}{ET_.} \quad [۶]$$

$$Y = f_{HI} HI_. DM \quad [۷]$$

که WP^* بهره‌وری آب تعرق شده ($kg/m^۳$)، K_{sb} ضریب تنش دمایی، $\sum T_r$ مجموع تعرق گیاه در کل فصل رشد (mm)، DM ماده خشک (Mg/ha)، $HI_.$ شاخص برداشت پایه محصول، Y عملکرد دانه (Mg/ha) و f_{HI} ضریب اصلاح نمودن شاخص برداشت در شرایط وجود تنش آبی می‌باشد.

مدل WSM

مهبد و همکاران (۸) یک مدل شبیه‌سازی رشد و عملکرد برای گندم با عنوان مدل WSM ارائه کردند. مدل WSM در محیط برنامه‌نویسی VB net نوشته شده است. تئوری مدل در ۹ زیربرنامه طبقه‌بندی می‌گردد. در این مدل، حرکت آب، نیتروژن و گرما در خاک به‌صورت پویا و غیرهمگام (Unsteady) شبیه‌سازی می‌شود. زمان جوانه‌زنی بذر براساس رطوبت خاک، دمای خاک، عمق کاشت بذر و بافت خاک با استفاده از تابع بتا، زمان گلدهی براساس بهاره‌سازی و دمای هوا و زمان رسیدگی گیاه براساس دمای هوا شبیه‌سازی می‌شود. مقادیر تبخیر- تعرق واقعی گیاه مستقیماً با استفاده از معادله پنمن - مانتیث و پارامترهای جوی و رطوبت خاک و ماده خشک تولیدی براساس تابش ساعتی دریافتی اصلاح شده با دمای هوا و حداکثر و حداقل غلظت نیتروژن گیاهی شبیه‌سازی می‌شود.



شکل ۱. فلوچارت کلی مدل **WSM**

فلوچارت کلی مدل WSM در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مدل، تبخیر- تعرق گیاهی (ET_c, mm/d) به شکل زیر محاسبه می‌گردد (۳):

$$\lambda ET_c = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 - \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad [8]$$

که در آن R_n تابش خالص (MJ/m^2h)، G شار گرمای خاک (MJ/m^2h)، e_s-e_a کمبود فشار بخار هوا (kPa)، ρ_a میانگین چگالی هوا (kg/m^3)، c_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت ($MJ/kg\ ^oC$)، Δ شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما (kPa ^oC)، γ ضریب ثابت سایکرومتری ($kPa/^oC$)، r_c مقاومت سطحی برای تبخیر- تعرق (s/m)، r_a مقاومت آئرودینامیک (s/m)، λET_c شار گرمای نهان (MJ/m^2d) و λ گرمای نهان تبخیر (MJ/kg) می‌باشد. مقدار G براساس دمای هوا، جداسازی انرژی خورشیدی در سطح خاک، تبخیر خاک و جریان گرمای خاک به‌صورت ساعتی برآورد می‌شود. این متغیر در بازه‌های زمانی روزانه صفر منظور می‌شود.

دو جزء مهم معادله ۵، مقاومت آئرودینامیک و مقاومت سطحی هستند. مقاومت آئرودینامیک در مقابل انتقال گرما و بخار آب از سطح تبخیر به هوای بالای پوشش گیاهی به‌صورت معادله زیر تعیین می‌شود (۳):

$$r_a = \frac{Ln\left[\frac{Z_m - d_o}{Z_{om}}\right] Ln\left[\frac{Z_h - d_o}{Z_{oh}}\right]}{K^2 U_Z} \quad [9]$$

که در آن r_a مقاومت آئرودینامیک (s/m)، Z_m ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد (m)، Z_h ارتفاع اندازه‌گیری رطوبت (m)، d، ارتفاع جابه‌جایی مرجع (m)، Z_{om} طول زبری مؤثر بر انتقال گشتاور (m)، Z_{oh} طول زبری مؤثر بر انتقال گرما و بخار آب (m)، k ضریب ثابت ون کارمن برابر با ۰/۴۱ (بدون واحد) و U_z سرعت باد در ارتفاع Z بالای سطح زمین (m/s) می‌باشد.

تبخیر بالقوه از سطح خاک [$E_p(t)$] با استفاده از معادله زیر برآورد می‌گردد:

$$\frac{E_p(t)}{ET_C(t)} = 1 - F(t) \quad [10]$$

که در آن F(t) کسری از تابش خورشیدی است که به پوشش گیاهی رسیده و ۱-F(t) کسر تابش خورشیدی رسیده به سطح خاک در هر ساعت می‌باشد. تبخیر واقعی از سطح خاک با معادله زیر به‌دست می‌آید (۱۴):

$$\frac{E_a(t)}{E_p(t)} = \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \quad [11]$$

که در آن $E_a(t)$ تبخیر واقعی از سطح خاک (mm/h)، $E_p(t)$ تبخیر بالقوه از سطح خاک (mm/h) و h_s و h_a به‌ترتیب رطوبت

نسبی در سطح خاک و هوا می‌باشند. شدت تعرق بالقوه ($T_p(t)$) از تفاوت بین تبخیر- تعرق استاندارد گیاه (ET_c) و تبخیر بالقوه از سطح خاک محاسبه می‌گردد. براساس توزیع ریشه در خاک (که با توجه به زمان از ابتدای کاشت، ماده خشک تولیدی در هر روز و نسبت ماده خشک ریشه به ساقه در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی شده است)، رطوبت خاک و در نتیجه مکش آب خاک در هر لایه، جذب آب از ریشه‌های گیاه شبیه‌سازی می‌شود.

در مدل WSM، در صورت نبودن کمبود نیتروژن در خاک و نبودن تنش آب، ماده خشک تولیدی در قسمت هوایی با معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$HDM^j = ۰/۰۱ K_{DM} RSLT^j \quad [۱۲]$$

که در آن، HDM^j مقدار بالقوه ماده خشک قسمت هوایی گیاه (بدون کمبود آب و نیتروژن) در زمان j ساعت بعد از کاشت (Mg/ha h)، K_{DM} کارایی تابش خورشیدی (g/MJ) و $RSLT^j$ تابش خورشیدی رسیده به گیاه (MJ/m^2h) می‌باشد.

اگر مقدار نیتروژن جذب شده توسط گیاه کم باشد، در صورتی‌که غلظت آن کمتر از حداقل غلظت نیتروژن گیاه شود، مقدار ماده گیاهی تولید شده برابر مقدار نیتروژن جذب شده تقسیم بر حداقل لازم نیتروژن در گیاه می‌شود. در غیر این‌صورت، مقدار ماده خشک تولیدی از معادله ۹ محاسبه می‌گردد. در نهایت، ماده خشک واقعی تولیدی در قسمت هوایی گیاه در j ساعت پس از کاشت (DM^j) با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$DM^j = \sum_{j_t=j_.}^{j} HDM^{jt} \quad [۱۳]$$

که در آن HDM^{jt} ماده خشک تولیدی واقعی (در صورت محدودیت یا فراوانی آب و نیتروژن) قسمت هوایی گیاه در زمان jt ساعت بعد از کاشت (Mg/ha) می‌باشد. در مدل WSM، عملکرد دانه در رطوبت ۱۵ درصد از نسبت جذب نیتروژن دانه و غلظت نیتروژن دانه با معادله زیر محاسبه می‌گردد (۹):

$$GY = ۰/۱۱۵ \frac{GNU}{GNC} \quad [۱۴]$$

که در آن GNU جذب نیتروژن دانه (kg/ha) و GNC غلظت نیتروژن دانه (kg/kg) می‌باشد.

داده‌های مزرعه‌ای

مهبد و همکاران (۸) گندم زمستانه (Triticum aestivum) رقم شیراز را با ماشین ردیف کار در عمق ۰/۳ متر با تراکم ۲۵۰ کیلوگرم بذر در هر هکتار با فاصله خطوط ۰/۱۲۵ متر در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در ۱۶ کیلومتری شمال شرقی شیراز با طول جغرافیایی ´۳۲ °۵۲ شرقی و عرض جغرافیایی ´۳۶ °۲۹ شمالی و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا، در سال‌های زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ کاشتند. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال اول زراعی برای واسنجی مدل‌های AquaCrop و WSM و در سال دوم برای اعتبارسنجی آنها مورد استفاده قرار گرفتند. رطوبت خاک در روزهای متفاوت بعد از کاشت، در عمق‌های ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ متری از سطح خاک مزرعه با استفاده از دستگاه نوترون متر در قبل از آبیاری اندازه‌گیری گردید. مزرعه آزمایشی به روش کرتی آبیاری شده و حجم آب آبیاری با توجه به رطوبت اندازه‌گیری‌شده خاک محاسبه شد. مقدار نیتروژن اضافه‌شده به زمین در تیمارهای مختلف برابر با صفر، ۴۶، ۹۲ و ۱۳۸ کیلوگرم در هکتار بود که به‌ترتیب تیمارهای ۱N، ۲N، ۳N و ۴N نام‌گذاری شدند. در این بررسی، با انتخاب تیمار ۴N فرض شد که گیاه از لحاظ کودی هیچ‌گونه تنشی نداشته است. مقادیر مختلف آب آبیاری در تیمارهای مختلف به‌ترتیب برابر با صفر، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد آبیاری کامل مزرعه بودند که به‌ترتیب تیمارهای Rain-fed، IR۰٫۵، IR۰٫۸، IR۱ و IR۱٫۲ نام‌گذاری شدند. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز، شامل دمای حداکثر، دمای حداقل، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارندگی از ایستگاه هواشناسی تحقیقاتی واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع‌آوری گردید. مقادیر

جدول ۱. مقادیر ماهانه پارامترهای هواشناسی طی سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸

ماه	حداکثر دما (°C)	حداقل دما (°C)	رطوبت نسبی حداکثر (%)	رطوبت نسبی حداقل (%)	سرعت باد (mile/d)	بارندگی (mm)	ساعت آفتابی (hr)
مهر	۲۳/۵	۴/۴	۹۸	۲۳	۴۳/۶۸	۰	۷/۹۰
آبان	۱۶	۳/۶-	۹۹	۲۴	۸۰/۱۰	۰	۸/۲۰
آذر	۱۱	۳-	۱۰۰	۷۰	۱۵/۰۶	۰	۷/۶۰
دی	۱۹	۲/۴-	۷۱	۲۲	۶۱/۴۴	۰	۷/۱۰
بهمن	۲۰	۲	۹۰	۲۵	۹۰/۷۶	۰	۹/۵۰
اسفند	۲۳	۱۰/۴	۴۷	۲۴	۸۴/۴۲	۰	۱۰/۵۰
فروردین	۲۲/۵	۳/۴	۹۸	۲۳	۳۱/۰۲	۰	۱۱/۴۰
اردیبهشت	۳۲	۱۳	۸۵	۲۵	۴۵/۹۶	۰	۷/۸۰
خرداد	۳۶	۱۹	۴۵	۱۳	۵۲/۶۸	۰	۱۰/۹۰
تیر	۳۹	۱۸	۶۴	۲۰	۶۲/۸۸	۰	۶/۹۰
مرداد	۳۶	۱۳/۶	۹۰	۱۱	۳۵/۱۶	۰	۱۱/۴۰
شهریور	۳۰	۱۰	۶۵	۱۰	۲۶/۷۶	۰	۸/۵۰

ماهانه پارامترهای هواشناسی طی دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ به‌ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.

شاخص‌های آماری

برای ارزیابی نتایج، پارامترهای نرمال‌شده میانگین جذر مربعات خطا (NRMSE) و ضریب توافق مدل (d) با معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}}{\overline{O}} \quad [15]$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(|P_i - \overline{O}| - |O_i - \overline{O}|\right)^2} \quad [16]$$

که در آنها P_i و O_i به‌ترتیب مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده پارامترها، n تعداد کل داده‌ها و $\overline{o}$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری‌شده می‌باشد. NRMSE تفاوت نسبی داده‌های برآوردشده را در برابر داده‌های اندازه‌گیری‌شده 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 (۱۵). شاخص d نیز بین صفر و یک متغیر است و زمانی توافق بهتری را بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده نشان می‌دهد که به یک نزدیک‌تر باشد.

نتایج و بحث

رطوبت خاک

مدل AquaCrop همانند مدل WSM توانایی برآورد رطوبت خاک را دارد. مقادیر شاخص d و NRMSE برای برآورد رطوبت خاک توسط این دو مدل طی دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹، در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، در جدول (۳) نشان داده شده است. مدل WSM مقدار رطوبت خاک را در سال دوم بسیار خوب برآورد کرده (NRMSE=۰/۱۴) و مدل AquaCrop در برآورد رطوبت خاک دقت کمتری داشت

جدول ۲. مقادیر ماهانه پارامترهای هواشناسی طی سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹

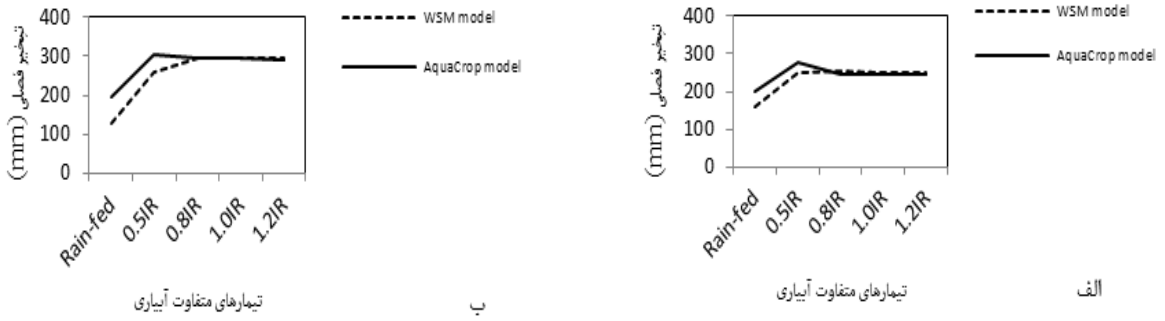
ماه	حداکثر دما (˚C)	حداقل دما (˚C)	رطوبت نسبی حداکثر(%)	رطوبت نسبی حداقل(%)	سرعت باد (mile/d)	بارندگی (mm)	ساعت آفتابی (hr)
مهر	۲۸	۳/۶	۵۴	۱۲	۱۹/۸۰	۰	۱۰/۱۰
آبان	۱۸	۶-	۳۷	۷	۱۲/۶۰	۰	۸/۸۰
آذر	۱۸/۵	۵/۲-	۶۰	۱۵	۲۰/۱۶	۰	۸/۶۰
دی	۹	۰	۷۴	۳۰	۲۶/۴	۰	۷/۳۰
بهمن	۱۵	۷/۴-	۷۱	۱۰	۱۹/۹۸	۰	۹/۰۰
اسفند	۲۲	۱	۸۴	۱۶	۲۴/۴۸	۰	۱۰/۴۰
فروردین	۲۴	۳/۶	۸۵	۱۴	۶۷/۰۲	۰	۱۰/۳۰
اردیبهشت	۳۴	۱۰/۴	۶۶	۱۷	۴۸/۱۸	۰	۱۱/۲۰
خرداد	۳۵	۱۵/۶	۲۷	۸	۷۱/۴۰	۰	۱۱/۳۰
تیر	۳۵	۱۵	۳۰	۹	۸۴/۴۲	۰	۱۰/۳۵
مرداد	۳۴/۵	۱۱/۶	۴۹	۱۴	۴۰/۴۴	۰	۶/۳۰
شهریور	۳۰/۵	۱۳	۴۱	۴۰	۷۴/۹۴	۰	۹/۱۰

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی رطوبت خاک برآوردشده توسط مدل‌های AquaCrop و WSM

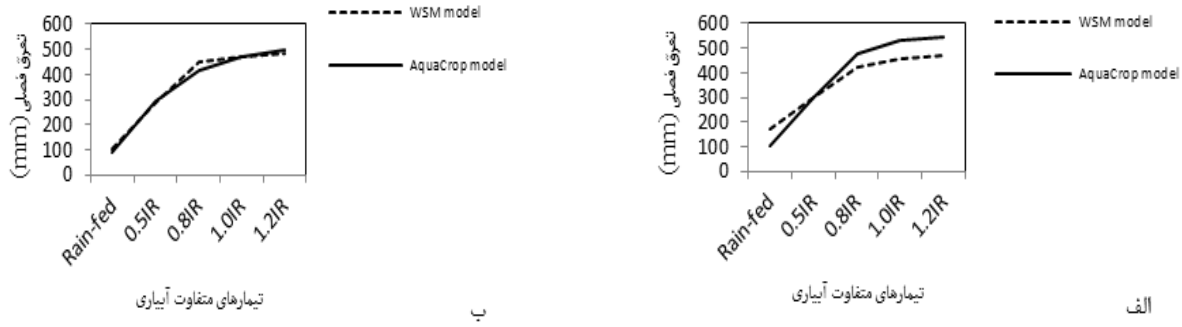
سال زراعی	پارامتر آماری	WSM	AquaCrop
۱۳۸۸-۸۹	d	۰/۹۳	۰/۵۸
	NRMSE	۰/۰۹	۰/۲۵
۱۳۸۹-۹۰	d	۰/۸۰	۰/۶۰
	NRMSE	۰/۱۴	۰/۲۶

(NRMSE=۰/۲۶). علت کم‌شدن مقدار NRMSE را می‌توان در منظور نکردن حرکت آب در خاک مطابق منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک (حل معادله ریچاردز) و جذب گیاه مطابق مکش آب خاک در رطوبت‌های مختلف عنوان کرد. در مدل WSM، با استفاده از ضخامت لایه‌های خاک ۰/۰۵ متر و فواصل زمانی یک ساعته، رطوبت خاک از حل عددی معادلات ریچاردز برآورد شده است. در حالی‌که در مدل AquaCrop، ضخامت لایه‌های خاک ۰/۱ متر و فواصل زمانی روزانه به‌کار برده شده است.

تبخیر- تعرق فصلی برآورد شده توسط مدل‌های AquaCrop و WSM در مدل AquaCrop، با استفاده از ضریب گیاهی دوگانه، مقدار تبخیر و تعرق فصلی استاندارد گندم در تیمارهای مختلف آبیاری محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت (شکل‌های ۲ و ۳). مدل AquaCrop مقدار تبخیر فصلی برای گندم زمستانه را در سال اول کشت ۲۷۸-۱۹۸ میلی‌متر و در سال دوم ۳۰۵-۱۹۵ میلی‌متر برآورد کرده است. مقدار تبخیر فصلی در سال اول کشت به‌ترتیب ۴۷/۸، ۳۴، ۳۱/۶ و ۳۱/۱ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۵۰/۸، ۴۱/۵، ۳۸/۵ و ۳۷ درصد از کل تبخیر- تعرق



شکل ۲. تبخیر فصلی برآورد شده توسط مدل‌های AquaCrop و WSM طی دو سال زراعی، الف) ۸۹-۱۳۸۸ و ب) ۹۰-۱۳۸۸



شکل ۳. تعرق فصلی برآورد شده توسط مدل‌های AquaCrop و WSM طی دو سال زراعی، الف) ۸۹-۱۳۸۸ و ب) ۹۰-۱۳۸۸

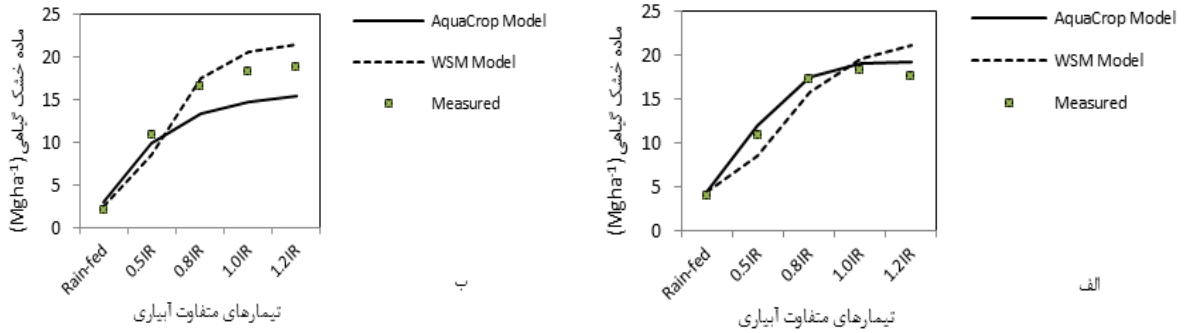
فصلی را در تیمارهای آبیاری IR۰٫۵، IR۰٫۸، IR۱ و IR۱٫۲ شامل شده است. تغییر در شرایط جوی، علت تغییر در مقدار تبخیر فصلی در طول دوره کشت، در دو سال متوالی می‌باشد. در شروع فصل رشد، هنگامی که مقدار شاخص سطح برگ کم است، شدت تعرق کمتر از شدت تبخیر بوده، اما زمانی که مقدار ماده خشک گیاهی و شاخص سطح برگ افزایش یافت، شدت تعرق نیز افزایش یافته است. همچنین، مقدار تعرق فصلی برآورد شده توسط مدل، با آبیاری فصلی افزایش یافته است.

در مدل WSM، مقدار تبخیر فصلی در سال اول کشت بین ۲۴۵ تا ۲۵۹ میلی‌متر برآورد شد که به‌ترتیب ۴۵/۱، ۳۹/۲، ۳۶/۹ و ۳۶ درصد از کل تبخیر- تعرق فصلی را در تیمارهای آبیاری IR۰٫۵، IR۰٫۸، IR۱ و IR۱٫۲ شامل شده است. مقدار تبخیر فصلی در این مدل در سال دوم کشت گندم زمستانه بین ۲۶۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر گزارش شد که ۴۷/۶، ۴۰/۶، ۳۹/۷ و ۳۹/۶ درصد از کل تبخیر- تعرق فصلی را در تیمارهای آبیاری IR۰٫۵، IR۰٫۸، IR۱ و IR۱٫۲ شامل شده است. این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش شاهرخ‌نیا و سپاس‌خواه (۱۲) مطابقت دارد. آنها گندم زمستانه را در دو سال زراعی ۲۰۰۸-۲۰۰۷ و ۲۰۰۹-۲۰۰۸ در لایسیمتر وزنی کشت کرده و مقدار تبخیر فصلی از سطح خاک را به‌ترتیب ۲۸۸ و ۲۵۲ میلی‌متر گزارش کردند که مقدار ۲۹/۸ و ۳۰/۲ درصد از کل تبخیر- تعرق فصلی را شامل می‌شود.

تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه بر رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد و اگر این مقادیر به‌خوبی شبیه‌سازی شوند، رطوبت خاک نیز با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌گردد. نتایج حاصل از هر دو مدل در شبیه‌سازی تبخیر از سطح خاک به هم نزدیک و در حد قابل قبول هستند. اما از آن‌جایی‌که مطابق جدول (۳) مقدار رطوبت خاک در مدل WSM با خطای کمتری نسبت

جدول ۴. شاخص‌های ارزیابی ماده خشک گیاهی برآوردشده توسط مدل‌های AquaCrop و WSM

سال زراعی	پارامتر آماری	WSM	AquaCrop
۱۳۸۸-۸۹	d	۰/۹۷	۰/۹۹
	NRMSE	۰/۱۵	۰/۰۷
۱۳۸۹-۹۰	d	۰/۹۸	۰/۹۴
	NRMSE	۰/۱۵	۰/۱۹



شکل ۴. مقدار ماده خشک گیاهی اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده توسط مدل‌های **WSM** و **AquaCrop** طی دو سال زراعی، الف) ۸۹-۱۳۸۸ و ب) ۹۰-۱۳۸۹

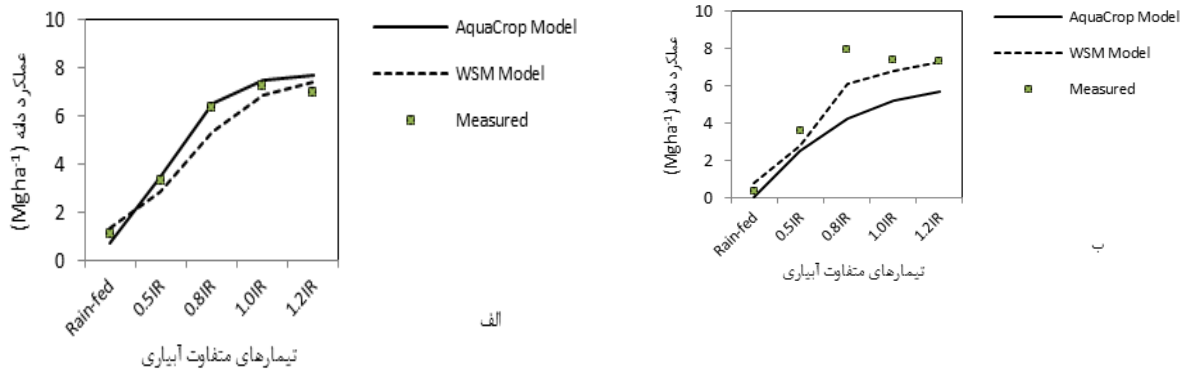
به مدل AquaCrop شبیه‌سازی شده است، بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که مدل WSM مقدار تبخیر از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی را با دقت بیشتری برآورد کرده و نتایج به‌دست آمده از این مدل، با اعتماد بیشتری پذیرفته می‌شود.

ماده خشک گیاهی

مقدار ماده خشک گیاهی با استفاده از مدل‌های WSM و AquaCrop طی دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ برآورد گردید. این مقادیر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. در سال اول کشت، مدل AquaCrop ماده خشک گیاهی را با NRMSE برابر ۰/۰۷ بسیار خوب برآورد کرده و مدل WSM با NRMSE برابر ۰/۱۵ برآورد خوبی از ماده خشک داشت. هر دو مدل، ماده خشک گیاهی را نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کردند. در سال دوم کشت، مدل‌های AquaCrop و WSM با NRMSE به‌ترتیب برابر ۰/۱۹ و ۰/۱۵ نتایج مشابهی ارائه نمودند. شاخص‌های d و NRMSE ماده خشک گیاهی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌ها در جدول (۴) آورده شده است.

عملکرد دانه

مقدار عملکرد دانه گندم زمستانه با استفاده از مدل‌های WSM و AquaCrop طی دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ برآورد گردید. این مقادیر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. مدل WSM، عملکرد دانه گیاهی را خوب و نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری‌شده برآورد کرد. اما در مدل AquaCrop عملکرد دانه در تیمار دیم در سال دوم کشت، برابر صفر برآورد شد. این مقادیر با مقادیر برآوردشده



شکل ۵. مقدار عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌های **WSM** و **AquaCrop** طی دو سال زراعی، الف) ۸۹-۱۳۸۸ و ب) ۹۰-۱۳۸۹

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی عملکرد دانه برآوردشده توسط مدل‌های **AquaCrop** و **WSM**

سال زراعی	پارامتر آماری	WSM	AquaCrop
۱۳۸۸-۸۹	d	۰/۹۸	۰/۹۹
	NRMSE	۰/۱۱	۰/۰۸
۱۳۸۹-۹۰	d	۰/۹۷	۰/۸۵
	NRMSE	۰/۱۸	۰/۳۹

توسط مدل WSM و مقادیر اندازه‌گیری شده متفاوت است. در واقع، تنش آبی و هر نوع تنش دیگری، در نتایج این مدل تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین، علی‌رغم این‌که تاریخ دقیق کاشت به مدل AquaCrop داده شد، این مدل در تیمار دیم، در سال دوم کشت، دوره رشد گیاه را ۱۸۷ روز درنظر گرفته و در مراحل اولیه رشد، تنشی شدید را برای گیاه برآورد کرده است. زیرا گیاه در مرحله ابتدایی رشد، دچار تنش می‌شود و مراحل توسعه آن با مشکل مواجه شده و حتی در صورت وقوع بارندگی بعد از این تنش، گیاه قادر به استفاده مطلوب از آن نخواهد بود.

همچنین، شاخص برداشت در مدل AquaCrop، در شرایط بدون تنش، از تاریخ شروع گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک، به‌صورت خطی از صفر تا مقداری که کاربر برای آن در مدل وارد کرده افزایش می‌یابد. بنابراین، اگر به‌هردلیل، گیاه به مرحله گلدهی نرسد، شاخص برداشت صفر و اگر رشد گیاه از مرحله گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک کامل نشود، شاخص برداشت به نسبت نقصان در رشد گیاه- در مرحله مذکور- کاهش می‌یابد. بنابراین، در مدل AquaCrop عملکرد صفر نیز به‌دست آمده است. شاخص‌های d و NRMSE عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل‌های WSM و AquaCrop در جدول (۵) آورده شده‌اند.

شاخص‌های d و NRMSE در هر دو سال کشت، برآورد خوبی از عملکرد دانه گیاهی توسط مدل WSM نشان می‌دهند. در حالی‌که برای مدل AquaCrop فقط در سال اول کشت برآورد خوبی را نشان داده و در سال دوم عملکرد دانه به‌خوبی برآورد نشده است. این مسئله حاکی از آن است که مدل WSM در برآورد عملکرد دانه گیاهی در شرایط با و بدون محدودیت آب، از دقت بیشتری نسبت به مدل AquaCrop برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در یک دید کلی، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در پژوهش‌های مختلف، مدل WSM به‌عنوان یک مدل کاملاً پیچیده، توانایی برآورد رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد دانه را با دقت زیاد دارد. پس از آن، مدل AquaCrop پیشنهاد می‌شود. غیر از شرایط دیم، با وجود این‌که این مدل به داده‌های ورودی بسیار کمتری نسبت به مدل WSM احتیاج دارد، مقادیر رطوبت خاک، ماده خشک و عملکرد دانه را به‌خوبی برآورد می‌کند. ضمن این‌که در عین سادگی، به کاربران مبتدی هم امکان استفاده آسان را خواهد داد. نتایج برآورد تبخیر- تعرق حاصل از هر دو مدل به هم نزدیک و در حد قابل قبول هستند. اما از آن‌جایی‌که مبنای مقایسه، رطوبت خاک برآورد شده توسط مدل‌ها و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده است، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مدل WSM مقدار تبخیر از سطح خاک و تعرق از پوشش گیاهی را با دقت بیشتری برآورد کرده و نتایج به‌دست آمده از این مدل، با اعتماد بیشتری پذیرفته شدند.

منابع مورد استفاده

۱. بهادری، ا. ۱۳۹۰. ارزیابی اثر مدیریت‌های مختلف آب بر محصول گندم زمستانه در منطقه باجگاه و پایین دست سد درودزن با استفاده از مدل‌های AquaCrop و CropSyst. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲. موسوی‌زاده، ف. ۱۳۹۳. ارزیابی تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری بر تولید کلزا با استفاده از مدل AquaCrop. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

3. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 p.
4. Bonfante, A., A. Basile, A. Acutis, M. De Mascellis, R. Manna, P. Perego and A. Terribile. 2010. SWAP, Cropsyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. Agric. Water. Manage. 97(7): 1051-1062.
5. Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield Response to Water. Irrigation and Drainage Papers No. 33, FAO, Rome, Italy. 193 p.
6. Farahani, H. J., G. Izzi and T. Y. Dweis. 2009. Parameterization and evaluation of the Aqua Crop model for full and deficit irrigated cotton. J. of Agric. 101: 469-476.
7. Katerji, NC and P. M Marcello. 2013. Productivity, Evapotranspiration and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by Aquacrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. Agric. Water Manage. 130:14-26.
8. Mahbod, M., Sh. Zand-Parsa and A. R. Sepaskhah. 2015. Modification of maize simulation model for predicting growth and yield of winter wheat under different applied water and nitrogen. Agric. Water Manage. 150: 18-34.
9. Majnooni-Heris, A., Sh. Zand-Parsa, A. R. Sepaskhah, A. A. Kamgar-Haghighi and J. Yasrebi. 2010. Modification and validation of maize simulation model (MSM) at different applied water and nitrogen levels under furrow irrigation. Arch. Agron. Soil Sci. 57: 401-420.
10. Nazeer, M. 2009. Simulation of maize crop under irrigated and rainfed conditions with CROPWAT model. Agric. Biol. Sci. 4: 68-73.
11. Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres. 2012. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agron. J. 101(3): 438-447.
12. Shahrokhnia, M. H. and A. R. Sepaskhah. 2012. Evaluation of wheat and maize evapotranspiration determination by direct use of Penman - Monteith in a semi-arid region. Arch. Agron. Soil Sci. 58:1283-1300.
13. Steduto, P., T.C. Hsiao, E. Fereres and D. Raes. 2012. Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. FAO, Rome, Italy.500 p.
14. Stockle, C. and G. Campbell. 1985. A simulation model for predicting effects of water stress on yield: An example using corn. Adv. Irrig. 3: 283-311.
15. Willmot, C. J. 1981. On the validation of models. Physical Geography 2:184-194.
16. Zand-Parsa, Sh., A. R. Sepaskhah and A. Ronaghi. 2006. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. Agric. Water Manage. 81: 227-256.

Evaluation of Simulated Soil Water Content, Dry Matter and Grain Yield of Winter wheat (cv. Shiraz) using WSM and AquaCrop Models

Sh. Zand-Parsa[1], S. Parvizi[1], A. R. Sepaskhah[1] and M. Mahbod[2]

(Received: July. 07-2015 ; Accepted : June. 5-2016)

Abstract

In agricultural development many factors such as weather conditions, soil, fertilizer, irrigation timing and amount are involved that are necessary to be considered by the plant growth simulation models. Therefore, in this study, the values of soil water content at different depths of soil profile, dry matter production and grain yield of winter wheat were simulated using AquaCrop and WSM models. The irrigation treatments were rain-fed, 0/5, 0/8, 1 and 1/2 times of full irrigation conducted in Agricultral College of Shiraz University during 2009-2010 and 2010-2011. The models were calibrated using measured data in the first year of experiment and validated by the second year data. The accuracy of soil water simulation was used to refer to the accuracy of simulated evapotranspiration. The accuracy of soil water content at different layers of root depth in the validation period was good for the WSM model (Normalized Root Mean Squer Error, NRMSE= 0/14). But the AquaCrop model showed less accuracy for soil water content (NRMSE=0/26). However, the values of predicted and measured crop evapotranspiration were close together at full irrigation treatment, the accuracy of AquaCop predictions was decreased with inceasing water stress. WSM model has had a good estimation of the dry matter and grain yield simulation with NRMSE of 0/15 and 0/18, respectively. However, they were simulated with less accuracy in the AquaCrop model with NRMSE of 0/19 and 0/39.

Keywords: Calibration, Evapotranspiration, Irrigation Treatment, Rain-fed, Validation.

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agr., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.
2. Dept. of Water Eng., Faculty of Agr., Jahrom Univ., Jahrom, Iran.
*: Corresponding Author, Email: zandparsa@yahoo.com