تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰
۲۱۰-۱۹۵
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2020.2473.1652

مقاله پژوهشی

ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی

رضا سعیدی[۱]، هادی رمضانی اعتدالی[۲*]، عباس ستوده‌نیا[۲]، بیژن نظری[۳]، عباس کاویانی[۳]

۱. دکترای مهندسی آبیاری و زهکشی، مدرس گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۲

چکیده

امروزه مدل‌های گیاهی ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی پارامترهای مهم کشاورزی به شمار می‌روند. با توجه به وجود تنش‌های محیطی در هر منطقه، مدل‌های گیاهی باید ارزیابی‌شده و مورد تأیید قرار بگیرند. در این پژوهش آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارهای آب‌شور با هدایت الکتریکی ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و تیمارهای حاصلخیزی در چهار سطح؛ ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد مصرف کود نیتروژن، با سه تکرار به اجرا درآمد. در فاصله بین دو آبیاری، تبخیر- تعرق روزانه از طریق بیلان حجمی رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. سپس مدل AquaCrop برای تخمین رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد ذرت علوفه‌ای در شرایط تنش شوری و حاصلخیزی ارزیابی شد. مقدار آماره‌های RMSE، NRMSE و R^2 در برآورد کل تبخیر- تعرق به‌ترتیب ۴ میلی‌متر، ۱/۳ درصد و ۰/۹۹ و همچنین برای عملکرد محصول به‌ترتیب ۰/۳۴ تن بر هکتار، ۰/۶۵ درصد و ۰/۹۹ بود. مقدار آماره‌های RMSE، NRMSE و R^2 در برآورد رطوبت خاک به‌ترتیب در محدوده ۰/۴-۱/۱ درصد، ۱/۴-۳/۳ درصد و ۰/۹۹ قرار داشت. مقادیر به‌دست‌آمده برای آماره‌های مذکور نشان‌دهنده همبستگی مناسب و انطباق خوب بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده بود. با توجه به نتایج ارزیابی، توانمندی مدل AquaCrop برای برآورد پارامترهای مذکور تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی، قابل‌قبول تشخیص داده شد. نتایج پژوهش نشان داد که مدل‌های گیاهی باید امکان وجود تنش‌های محیطی را در نظر داشته و برای شرایط واقعی مناطق تحت کشت توسعه یابند. در این شرایط استفاده از مدل‌های گیاهی مانند AquaCrop، موجب تخمین مناسب تبخیر- تعرق و عملکرد گیاه و برنامه‌ریزی دقیق‌تر در مصرف کود و منابع آبی می‌گردد.

***واژه‌های کلیدی*: شوری آب، نیاز آبی، نیتروژن خاک، واسنجی و صحت سنجی مدل گیاهی**

مقدمه

توسعه کشت گیاهان زراعی برای تأمین نیازهای روزافزون غذایی بشر، نیازمند استفاده بهینه از منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. مدیریت آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه، از مصرف بی‌رویه و هدر رفت آب جلوگیری می‌نماید. در صورت وجود تنش‌های محیطی به‌خصوص تنش شوری، آب و عناصر غذایی کم‌تری از خاک جذب گیاه شده، رطوبت خاک محفوظ مانده و تبخیر- تعرق و عملکرد محصول نسبت به شرایط استاندارد محیط کاهش می‌یابد (Farooq et al., 2015; Xin et al., 2016). از سوی دیگر کاهش حاصلخیزی خاک مانند کمبود عنصر نیتروژن، با کاهش انرژی لازم برای جذب آب و رشد اندام‌های گیاهی، تبخیر- تعرق و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Rudnick et al., 2017). در شرایط فوق و متناسب با کاهش تبخیر- تعرق و عملکرد محصول، نیاز آبی واقعی گیاه نسبت به شرایط

* نگارنده پاسخگو: هادی رمضانی اعتدالی. پست الکترونیک: Hadietedali@yahoo.com

استاندارد منطقه کاهش می‌یابد؛ بنابراین در صورت وجود تنش‌های شوری و حاصلخیزی (کمبود نیتروژن)، تعیین نیاز آبی واقعی و ارائه راه‌کارهای مدیریتی برای افزایش کارایی مصرف آب در کشت گیاهان دارای اهمیت خواهد بود. به همین منظور تخمین تبخیر- تعرق گیاهان تحت تنش‌های مذکور با مدل گیاهی، روش مناسبی برای تعیین نیاز آبی واقعی گیاه و مصرف دقیق و بهینه آب در هر منطقه به شمار می‌رود.

در دهه‌های گذشته مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی رشد گیاه، حرکت و انتقال آب و املاح در خاک معرفی شد که می‌توان به مدل SWAP، WOFOST، Crop Syst، CERES، GLEAMS، CROPWAT وCRPSM اشاره نمود (Sepaskhah et al., 2006; Stockle et al., 1994). در میان مدل‌های مختلف شبیه‌سازی، مدل AquaCrop (آکواکراپ) مدل جدیدی بود که توسط سازمان فائو توسعه داده شد. اساس کار این مدل بررسی واکنش عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی بود که با استفاده از متغیرهای اقلیمی، گیاه، خاک و شیوه‌های مدیریتی، عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌نماید. مدل مذکور بایستی برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی گردد (Khalili et al., 2014). مزیت مدل AquaCrop نسبت به سایر مدل‌های گیاهی این است که پارامترهای ثابت آن زیادتر بوده و واسنجی مدل با داده‌های کم‌تری انجام‌پذیر است. مدل AquaCrop برای اجرا نیاز به ورود داده‌های هواشناسی، گیاه، خاک، مدیریت مزرعه و آبیاری دارد (Khalili et al., 2014). مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های تبخیر- تعرق گیاه مرجع و همچنین میزان توسعه تاج گیاه در طول مراحل مختلف رشد، میزان تبخیر- تعرق گیاه موردمطالعه را به تفکیک محاسبه می‌کند (Ziayee et al., 2015).

در تحقیقی گزارش شد که این مدل عملکرد دانه، زیست‌توده و پوشش گیاهی ذرت را به‌طور رضایت‌بخشی در شرایط آبیاری کامل و تنش آبی ملایم شبیه‌سازی نمود؛ اما در شرایط تنش آبی شدید و به‌خصوص در دوره پیری گیاه از دقت مطلوبی برخوردار نبود (Heng et al., 2009). مدل AquaCrop برای کشت پنبه تحت شرایط آبیاری کامل و کم‌آب یاری در منطقه گرم و خشک سوریه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور، تبخیر- تعرق را با خطای ۱۳ درصد و مقدار محصول در شرایط کم‌آبیاری ۶۰ و ۸۰ درصد را با خطای ۳۲ درصد برآورد نمود (Farahani et al., 2009).

نسخه اولیه مدل AquaCrop، در سال ۲۰۰۷ از طریق اصلاح و بازنگری نشریه شماره ۳۳ فائو به دست آمد و بدون لحاظ تأثیر تنش شوری ارائه شد؛ اما از نسخه ۴ که در سال ۲۰۱۲ معرفی شد، مدل مذکور اصلاح‌شده و تأثیر تنش شوری مدنظر قرار گرفت (Heydarinia et al., 2017). برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به مقدار حاصلخیزی خاک، در مدل AquaCrop از یک روش نیمه‌کمّی استفاده شد که طی یک فرایند خودکار واسنجی می‌گردید. در این روش به‌جای بررسی بیلان انتقال املاح در خاک و جذب گیاهی، مقدار تنش کودی واردشده به گیاه و میزان ارتباط آن با عملکرد محصول بررسی شد (Van Gaelen et al., 2014)؛ بنابراین مدل AquaCrop قابلیت استفاده در شرایط تنش‌های شوری و کاهش حاصلخیزی خاک را داشت. در تحقیقی توانایی مدل AquaCrop برای تخمین عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت تحت تیمارهای مختلف نیتروژن در شمال نیجریه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور علی‌رغم تعداد کم پارامترهای ورودی، عملکرد زیست‌توده و دانه را با دقت زیادی برای سطوح مختلف نیتروژن شبیه‌سازی نمود؛ اما با توجه به این‌که مدل حداکثر محصول را بدون در نظر گرفتن تنش‌های محیطی دیگر شبیه‌سازی می‌کرد، نتایج به‌دست‌آمده تا حدودی بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد شد (Akumaga et al., 2017). در تحقیق دیگر اثر کم‌آبیاری و مقدار مصرف کود نیتروژن بر عملکرد ذرت و بهره‌وری آب، با استفاده از مدل AquaCrop تعیین شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور دقت خوبی برای برآورد زیست‌توده و وزن دانه داشت؛ اما دقت مدل با افزایش سطح تنش کاهش یافت. به‌طوری‌که کمترین دقت در تیمار بدون کود و حداکثر تنش خشکی حاصل شد (Stricevic et al., 2014). در تحقیقی مدل AquaCrop در شرایط تیمارهای مختلف شوری و کم‌آبیاری برای تخمین عملکرد گندم، رطوبت و شوری خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در پیش‌بینی شوری عصاره اشباع خاک در مقایسه با عملکرد دانه و رطوبت خاک، خطای بیشتری داشت (Khorsand et al., 2014). در تحقیق دیگر عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای و شوری خاک، تحت شرایط مدیریت‌های مختلف استفاده از آب‌شور در تناوب با آب شیرین، با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور دقت نسبتاً خوبی در پیش‌بینی عملکرد محصول و شوری خاک داشت؛ اما خطای مدل با افزایش تعداد دفعات آبیاری با آب‌شور به نسبت آب شیرین افزایش یافت

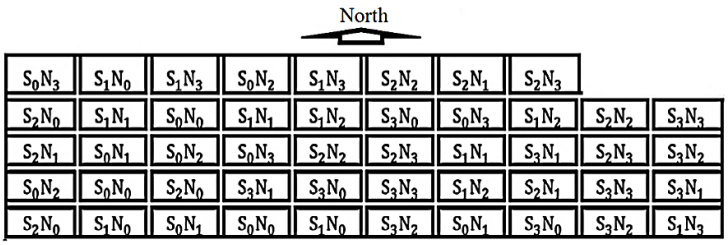
(Hasanli et al., 2015). در پیش‌بینی تبخیر- تعرق گندم زمستانه در جنوب چین با مدل AquaCrop گزارش شد که مدل مذکور کم برآورد است (Anjum Aqbal et al., 2014). همچنین در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق ذرت با مدل AquaCrop در شرایط متفاوت بافت و حاصلخیزی خاک گزارش شد که مدل از کارایی متوسطی در این زمینه برخوردار بود. کارایی مدل در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق ذرت در خاک لوم بهتر از دو بافت لوم رسی سیلتی و لوم شنی بود و با اعمال تنش حاصلخیزی، کارایی مدل کاهش یافت (Ghorbanian Kurd Abadi et al., 2015).

تاکنون تحقیقات زیادی با مدل AquaCrop انجام شد ولی در مورد شبیه‌سازی رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد گیاه تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی تحقیقی گزارش نشده است. برای انتخاب گیاه در میان گیاهانی که به‌صورت آبی کشت می‌شوند، گیاه ذرت به لحاظ تأمین نیاز غذایی انسان و دام مانند گندم، جو و برنج، دارای اهمیت استراتژیک بوده و در این پژوهش موردمطالعه قرار گرفت؛ بنابراین هدف از این پژوهش ارزیابی نسخه ۶/۱ مدل AquaCrop در برآورد رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی (کمبود نیتروژن) بود.

مواد و روش‌ها

اطلاعات آزمایش مزرعه‌ای

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، در موقعیت عرض جغرافیایی "۳۲ '۱۹ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی "۷ '۰ °۵۰ شرقی، در شهر قزوین انجام شد. تیمارها شامل شوری آب و حاصلخیزی، هرکدام در چهار سطح و سه تکرار و مجموعاً در ۴۸ کرت، به‌صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد (شکل ۱). گیاه موردمطالعه ذرت علوفه‌ای با رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد ۳×۳ متر و با فاصله ۱/۵ متر از هم، با سیستم آبیاری سطحی جوی و پشته کشت شد. تاریخ کاشت بذرها ۱۳۹۶/۴/۶ و تراکم آن‌ها ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار بود. خاک مزرعه قبل از انجام آزمایش توسط آزمایشگاه معتبر مطابق جدول (۱) و (۲) آنالیز شیمیایی شد. مصرف انواع کودهای اوره (نیتروژن)، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به‌ترتیب به مقدار ۳۵۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار برای کشت ذرت علوفه‌ای، توسط آزمایشگاه توصیه شد. به‌طوری‌که کود نیتروژن در هنگام داشت محصول و بقیه کودها قبل از کشت به خاک اضافه شد. آب موردنیاز برای آبیاری از آب چاه با هدایت الکتریکی $\frac{ds}{m}$ ۰/۵ و اسیدیته ۷/۲ تأمین شد.



شکل ۱. شبکه تیمارها در مزرعه

Fig. 1. Network of treatment in the field

در این تحقیق تیمارهای حاصلخیزی شامل تغذیه خاک با (N_0) ۱۰۰، (N_1) ۷۵، (N_2) ۵۰ و (N_3) ۲۵ درصد مقدار کود نیتروژن موردنیاز بر اساس توصیه کودی در کشت ذرت بود. تیمارهای شوری پس از پنج‌برگی شدن گیاه، در چهار سطح آبیاری گیاه با هدایت الکتریکی (S_0) ۰/۵، (S_1) ۲/۱، (S_2) ۳/۵ و (S_3) ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر اعمال شد. تیمارهای شوری با توجه به پتانسیل ۱۰۰، ۹۰، ۷۵ و ۵۰ درصدی عملکرد ذرت در شوری‌های مذکور انتخاب شد (Alizadeh, 2007). آب‌شور موردنیاز با اضافه‌کردن نمک صنعتی به آب، در تانک‌های بزرگ تهیه و استفاده شد. دلیل انتخاب نمک صنعتی به‌جای نمک خوراکی برای تهیه آب‌شور ویژگی شیمیایی نمک بود. نمک خوراکی نمکی بود

تصفیه‌شده که از عناصر سدیم و کلر با درجه خلوص ۹۹/۲ درصد ساخته‌شده و برای جبران کمبود عنصر یُد در رژیم غذایی انسان به آن یُدات پتاسیم نیز اضافه می‌شد؛ اما نمک صنعتی نمکی طبیعی و تصفیه نشده بوده و درجه خلوص آن ازلحاظ داشتن عناصر سدیم و کلر، از نمک خوراکی کمتر بوده و یددار نیز نبود. به‌طوری‌که در نمک صنعتی عناصر NaCl، کلسیم، منیزیم، سولفات و پتاسیم، مقداری برابر با؛ ۹۲، ۳/۸۴، ۱/۸۹، ۱/۷۳ و ۰/۵۴ درصد داشت. طی تحقیقی در ۵۰ نقطه از استان قزوین گزارش شد که عناصر غالب در آب‌های کشاورزی این استان به‌ترتیب؛ سدیم، کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم و پتاسیم بود (Mohammadi et al., 2011)؛ بنابراین برای نزدیک کردن کیفیت آب‌شور مصنوعی به آب‌های شور طبیعی استان قزوین و کاستن از درجه سمیّت عناصر سدیم و کلر موجود در آب، از نمک صنعتی برای تهیه آب‌شور استفاده شد.

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی خاک مزرعه، قبل از کشت

Table 1. Results of soil chemical analysis, before planting

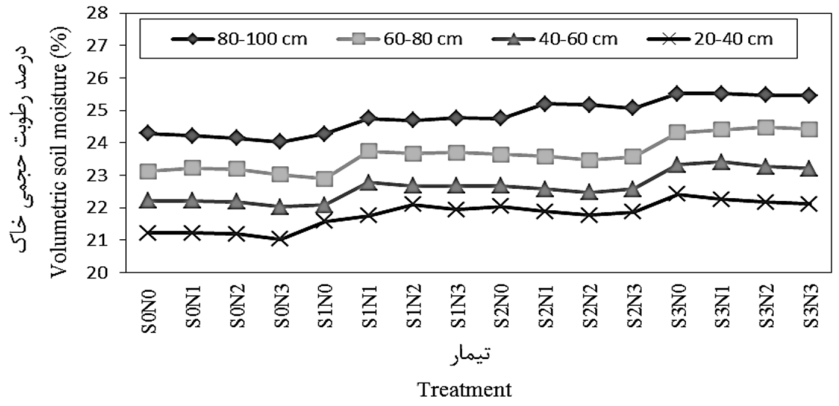
عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	کربن آلی (٪) Organic carbon (%)	ازت کل (٪) Total nitrogen (%)	فسفر قابل‌جذب (پی پی‌ام) Absorbable phosphorus (ppm)	پتاسیم قابل‌جذب (پی پی‌ام) Absorbable potassium (ppm)	هدایت‌الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر) Electrical conductivity of soil (dS/m)	اسیدیته گل اشباع Soil acidity (PH)
0-30	0.06	0.06	4	288	0.33	7.4
30-60	0.09	0.1	1	60	0.35	7.46

جدول ۲. نتایج تجزیه فیزیکی خاک مزرعه، قبل از کشت

Table 2. Results of soil Physical analysis, before planting

عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	رس (٪) Clay (%)	سیلت (٪) Silt (%)	شن (٪) Sand (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب) Bulk density (gr/cm^3)	رطوبت وزنی حد FC (٪) Moisture content at FC (%)	رطوبت وزنی حد PWP (٪) Moisture content at PWP (%)	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) Hydraulic conductivity (m/day)
0-30	Sandy Loam	10	33	57	1.33	23	14	0.6
30-60	Sandy Loam	8	24.5	67.5	1.41	22	13.5	0.6

زمان آبیاری بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای گیاه به اتمام آب سهل‌الوصول تعیین شد. به این صورت که باگذشت زمان و کاهش آب خاک، مقدار مقاومت روزنه گیاهان افزایش‌یافته و روزنه‌ها به‌طور جزئی بسته شد. مقاومت روزنه در روزهای اولیه پس از آبیاری افزایش کمی داشت اما با نزدیک شدن به زمان آبیاری، افزایش ناگهانی و حدود دو برابری داشت. اندازه‌گیری مقدار مقاومت روزنه برگ‌های ذرت به‌وسیله دستگاه پرومتر AP4 انجام شد. برای جلوگیری از تأثیر گرمای خورشید بر دمای سطح برگ، اندازه‌گیری‌ها صبح‌ها قبل از طلوع خورشید انجام شد. در این پژوهش همزمان با اتمام آب سهل‌الوصول در خاک (بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای) آبیاری انجام شد و تنش خشکی وجود نداشت. از سوی دیگر به دلیل نبود جریان‌های ترجیحی و زهکشی در خاک (مشاهده پروفیل خاک تا عمق ۵ متر)، نفوذ آب به لایه‌های زیرین خاک وجود نداشت. همچنین رطوبت خاک لایه‌های پائین‌تر از ریشه، به دلیل آبیاری‌های گذشته و ارتباط کمتر آن با گرمای خورشید، همواره بیشتر از رطوبت خاک ناحیه ریشه بود (شکل ۲)؛ بنابراین به دلیل وجود آب در لایه‌های زیرین خاک به‌واسطه آبیاری گذشته، تراکم خاک و نبود جریان‌های ترجیحی، نفوذ آب به لایه‌های زیرین خاک وجود نداشت.



شکل ۲. تغییرات رطوبت در لایه‌های مختلف عمق خاک

Fig. 2. Moisture changes in different layers of soil profile

شرایط مذکور این امکان را فراهم ساخت تا با بستن بیلان حجمی آب در خاک منطقه ریشه و محاسبه اختلاف رطوبت روزانه خاک، مقدار تبخیر- تعرق روزانه گیاه طبق رابطه (۱) برآورد شود. رطوبت خاک با دستگاه TDR[1] مدل TRIME-FM اندازه‌گیری شد و قبل از داده‌برداری رطوبت، دستگاه در اعماق مختلف خاک مزرعه واسنجی شد.

$$ET_c = \left(\frac{\theta_{i-1}-\theta_i}{100}\right) . \rho b . D_{rz} \qquad [۱]$$

در رابطه (۱) ET_c: تبخیر- تعرق روزانه گیاه (mm)؛ ρb: چگالی ظاهری خاک $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$، D_{rz}: عمق ریشه گیاه (mm) و $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: درصد اختلاف رطوبت روزانه خاک در عمق توسعه ریشه بود؛ یعنی اختلاف رطوبت خاک در دو ساعت مشخص و در دو روز متوالی که صرف تبخیر- تعرق گیاه در یک سیکل ۲۴ ساعته شده بود.

رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی (FC)، پس از قرار دادن خاک مرطوب در دستگاه پرژر پلیت و در فشار مکشی ۰/۳ بار اندازه‌گیری شد. رطوبت خاک مزرعه در زمان اتمام رطوبت سهل‌الوصول نیز با دستگاه TDR اندازه‌گیری شد؛ بنابراین مقدار کمبود رطوبت خاک تا حد FC در زمان آبیاری تعیین شد و نیاز آبیاری در هر کرت از طریق رابطه (۲) محاسبه شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت با کنتور حجمی کنترل شد. به دلیل فاصله‌دار بودن کرت‌ها و عدم وجود شیب در زمین، امکان تبادل رطوبت بین آن‌ها وجود نداشت؛ اما برای افزایش اطمینان در روزهای اولیه کشت و همزمان با آبیاری کرت‌ها، فواصل بین آن‌ها (پیاده‌رو) آبیاری سنگین شد و روی آن‌ها پلاستیک کشیده‌شد. این کار مانع تابش نور خورشید به خاک پیاده‌روها، مکش و جابجایی رطوبت بین کرت‌ها بود.

$$V = \frac{(\theta_{FC}-\theta_0)}{100} . \rho b . D_{rz} . A \qquad [۲]$$

در رابطه (۲) V: حجم آب آبیاری (lit)، θ_{FC}: درصد رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت زراعی، θ_0: درصد رطوبت وزنی خاک در زمان افزایش مقاومت و انسداد روزنه‌ها، ρb چگالی ظاهری خاک $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$، D_{rz}: عمق ریشه گیاه (mm) و A: مساحت کرت (m^2) بود. در پایان فصل کشت و در تاریخ ۹۶/۸/۲۰ بوته‌های ذرت با توجه به هدف برداشت علوفه‌ای از کف زمین چیده شد و در واحد سطح، وزن تر و خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای محاسبه وزن خشک، بوته‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه کاملاً خشک شد.

تشریح مدل AquaCrop

در این پژوهش سعی شد با واسنجی مدل AquaCrop، نتایج حاصل از پردازش مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش مزرعه‌ای نزدیک شده و مدل مذکور مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا یک سری اطلاعات اولیه به‌عنوان ورودی به مدل وارد شد. این اطلاعات شامل داده‌های اقلیمی، پارامترهای گیاهی، ویژگی‌های خاک و شیوه‌های مدیریتی بود. برای داده‌های اقلیمی از آمار بارندگی، دمای حداقل و حداکثر محیط و سایر پارامترهای هواشناسی روزانه استفاده

[1] Time Domain Reflectometry

شد. تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) به‌وسیله نرم‌افزار CROPWAT (با معادله پنمن- مانتیث) به‌صورت روزانه محاسبه شد. داده اقلیمی دیگر، میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر بود که بر اساس مشاهدات رصدخانه مانوآلوآ در هاوایی برای سال‌های ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹ به‌صورت پیش‌فرض در مدل وجود داشت.

پارامترهای ثابت گیاه (مانند دمای پایه رشد، دمای بالا، حد پایین و بالای حساسیت به تنش شوری و ...) با زمان، شیوه‌های مدیریت و موقعیت جغرافیایی تغییر نکرده و برای شرایط محلی نیاز به تنظیم نداشت؛ اما پارامترهای متغیر گیاه تحت تأثیر مدیریت مزرعه‌ای، شرایط پروفیل خاک و آب‌وهوا بوده و نیاز به تنظیم شدن برای شرایط مکانی داشت. پارامترهای گیاهی که برای شرایط بدون تنش در مدل واسنجی شده بود از طریق توابع پاسخ به تنش برای شرایط دارای تنش استفاده شد. ویژگی‌های خاک در مدل AquaCrop شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، رطوبت اشباع خاک، ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی (PWP) بود. شیوه‌های مدیریتی در دودسته مدیریت مزرعه‌ای و آبیاری تقسیم‌بندی می‌شد. در شیوه مدیریت مزرعه‌ای کلاس‌بندی حاصلخیزی خاک (از نامحدود تا خاک فقیر)، کلاس‌بندی شوری خاک و شوری آب آبیاری (از عالی تا خیلی فقیر) انتخاب می‌شد. در شیوه مدیریت آبیاری اگر محصول آبی بود، کاربر می‌توانست انتخاب کند که آبیاری سطحی، بارانی و یا قطره‌ای باشد و زمان، مقدار آبیاری، کیفیت آب (شوری) و ... را هم تعیین کند.

روش اصلی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول در مدل AquaCrop استفاده از رابطه دورنبوس-کستام (رابطه ۳) بود. در این مدل شبیه‌سازی تعرق گیاه با رابطه (۴) که معادله اصلی برای محاسبه تعرق گیاه بود انجام شد. دوره محاسباتی برای برآورد پارامترهای رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد گیاه در این پژوهش به‌صورت روزانه بود.

$$1-\frac{Y_a}{Y_{max}} = K_y \left(1-\frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \qquad [۳]$$

که در آن K_y: ضریب پاسخ عملکرد گیاه به تبخیر- تعرق؛ Y_a: عملکرد واقعی گیاه (Kg)؛ Y_{max}: حداکثر عملکرد گیاه (Kg)؛ ET_a: تبخیر- تعرق واقعی گیاه (mm)؛ ET_{max}: حداکثر تبخیر- تعرق گیاه (mm) هستند.

$$T_r=K_s.\ K_{cbx}.ET_0 \qquad [۴]$$

در رابطه ۴، T_r: تعرق گیاه، K_s: ضریب تنش مربوط به بسته شدن روزنه‌ها بود. به‌طورکلی هر تنشی که منجر به بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق گیاه بشود یک ضریب K_s دارد. مقدار این ضریب از عدد یک (بدون تنش) در آستانه‌بالا تا صفر (تنش کامل) در آستانه پایین متفاوت بود. از سوی دیگر تنش‌های مؤثر بر شبیه‌سازی تعرق گیاه در این پژوهش تنش شوری و حاصلخیزی بود. در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی اثر هر دو تنش شوری و حاصلخیزی، ضریب K_s به ضرایب $Ks_{exp,f}$، Ks_{CCx}، $f_{CDecline}$ تفکیک شد. ضرایب مذکور به‌ترتیب بیانگر اثر تنش بر روی رشد و توسعه کانوپی (CGC)، حداکثر پوشش کانوپی (CC_X) و ضریب کاهش پوشش کانوپی (CC) بود. K_{cbx}: ضریب تأثیر عوامل دیگری غیر از تنش‌های شوری و حاصلخیزی بود که تعرق گیاه را از سطح مرجع چمن متمایز می‌کرد و ET_0: تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) بود.

طبق رابطه (۵) این مدل از بهره‌وری آب (WP) برای شبیه‌سازی زیست‌توده (B) استفاده نمود که تنش مؤثر بر روی بهره‌وری آب در این مدل، محدودیت غلظت CO_2 و حاصلخیزی خاک بود.

$$B=WP.\sum_i \frac{Tr_i}{ETo_i} \qquad [۵]$$

در رابطه فوق B: زیست‌توده روزانه گیاه، WP: بهره‌وری آب و $\sum_i \frac{Tr_i}{ETo_i}$: مجموع نسبت روزانه تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع بود. برای محاسبه عملکرد محصول از رابطه (۶) استفاده شد.

$$Y=f_{HI}.HI.\ B \qquad [۶]$$

در رابطه (۶) HI: شاخص برداشت و f_{HI}: ضریبی مربوط به اثر تنش‌ها بود و برای تنظیم شاخص برداشت نسبت به مقدار مرجع آن به کار می‌رفت.

از اهداف پژوهش شبیه‌سازی تبخیر- تعرق و عملکرد ذرت در شرایط تنش‌های شوری و حاصلخیزی بود. تنش‌های مذکور در مدل AquaCrop باعث کاهش پوشش گیاهی و تعرق گیاه شد.

کاربرد روش GLUE[1] برای واسنجی بهینه پارامترها در مدل AquaCrop

برای ورود اطلاعات به مدل AquaCrop برخی از پارامترهای گیاهی، آبی، خاکی و... وجود داشت که مقدار آن‌ها در دسترس نبوده و یا قابل‌اندازه‌گیری نبود. در میان پارامترهای مذکور آن‌هایی که تأثیرگذاری بیشتری در خروجی مدل داشتند، برای انجام عمل واسنجی انتخاب شدند. به‌طورکلی هدف از انجام واسنجی مدل، نزدیک‌کردن خروجی مدل به داده‌های واقعی (مشاهده‌ای) بود؛ بنابراین برای برقرار نمودن بهترین انطباق بین خروجی مدل با داده‌های مشاهده‌ای، نیاز بود که برای پارامترهای حساس، مقدار بهینه آن‌ها شناسایی گردد؛ یعنی باید در میان حداقل تا حداکثر مقداری که برای پارامتر مذکور در مدل AquaCrop تعریف‌شده بود، بهترین مقدار برای رسیدن به هدف فوق انتخاب می‌شد. برای انجام این کار از روش تخمین عدم قطعیت احتمالات عمومی (*GLUE*) استفاده شد. در روش GLUE که بر پایه شبیه‌سازی مونت‌کارلو استوار بود، به‌صورت تصادفی ترکیبات مختلفی از پارامترهای حساس و تأثیر برهم‌کنش بین آن‌ها برای رسیدن به خروجی بهینه مدل در نظر گرفته شد. هسته اصلی در روش شبیه‌سازی تصادفی یا روش‌های مونت‌کارلو بر مبنای استفاده مداوم از اعداد تصادفی بود. روش GLUE به این دلیل استفاده شد که یافتن یک سری منحصر به‌فرد از پارامترهای بهینه، به‌سادگی امکان‌پذیر نبود. مراحل انجام روش GLUE به شرح زیر بود.

(الف) ابتدا تعداد N مجموعه عدد تصادفی برای پارامترهای مورد واسنجی در مدل تولید شد. تعداد N در این روش مقدار مشخصی نداشت و صرفاً دربردارنده تعداد زیادی از اعداد بود که دارای توزیع یکنواخت بودند؛ بنابراین در این پژوهش تعداد ۲۰۰ مجموعه عدد تصادفی که ازنظر آماری زیاد بود و دارای توزیع یکنواخت بود تولید شد.

(ب) مقدار کمّی پارامترهای حساسی که در مدل مورد واسنجی قرار گرفت بین حداقل تا حداکثر مقداری بود که در مدل تعریف شده بود و دارای توزیع یکنواخت بود.

(پ) با استفاده از اعداد تولیدشده برای پارامترها، اقدام به انجام شبیه‌سازی توسط مدل شد. با توجه به اهداف مدنظر مقادیر شبیه‌سازی‌شده و واقعی (اندازه‌گیری شده) ازنظر مقادیر خطا مورد مقایسه قرار گرفتند.

(ت) سپس با در نظر گرفتن یک حد آستانه قابل‌پذیرش، مجموعه‌ای از اعدادی که منجر به بهترین عملکرد از سوی مدل شدند انتخاب شدند. حد آستانه مذکور در این پژوهش کمتر از ۱۰ درصد بودن آماره NRMSE، نزدیک به صفر بودن آماره RMSE و نزدیک به یک بودن آماره‌های R^2، EF و d بود که بیانگر عملکرد خوب مدل AquaCrop بود (Jamieson et al., 1991). توضیح بیشتر این‌که ابتدا با هریک از ۲۰۰ مجموعه پارامتر تصادفی، اقدام به انجام شبیه‌سازی توسط مدل AquaCrop شد. سپس آماره‌های ارزیابی خروجی مدل نسبت به داده‌های واقعی برآورد شد. درنهایت آن ردیف یا مجموعه‌ای از پارامترها که ازنظر حد آستانه آماره‌های ارزیابی قابل‌پذیرش بود، به‌عنوان پارامتر واسنجی شده مدل انتخاب شد. لازم به‌ذکر بود که کلیه محاسبات مربوط به تولید داده‌های تصادفی، محاسبات آماره‌های ارزیابی و انتخاب پارامتر بهینه برای واسنجی، توسط نرم‌افزار اکسل انجام شد.

واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop

در این پژوهش پارامترهایی که حساسیت بیشتری در خروجی مدل داشتند مورد واسنجی قرار گرفتند. بر اساس تحقیقات گذشته مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای زمان سبز شدن بذرها، طول زمان گل‌دهی، مرحله رشد سبزینه‌ای، تراکم و تقویم کاشت، حساسیت کم و نسبت به تغییرات ضریب گیاهی، رشد پوشش تاج گیاه، بهره‌وری آب نرمال‌شده، رطوبت خاک، زمان گل‌دهی و پر شدن غلاف‌ها، حساسیت زیاد داشت (Babazadeh and Sarai Tabrizi, 2012). پارامترهای حساس نسبت به بازه عددی آن‌ها در مدل AquaCrop با روش GLUE واسنجی شدند. از سوی دیگر مقادیر برخی از پارامترها به‌صورت پیش‌فرض در مدل وجود داشت و بعضی دیگر که قابل‌اندازه‌گیری بود، مقادیر واقعی آن‌ها در مدل وارد شد (جدول ۳). از میان ۱۶ تیمار به‌طور تصادفی تعداد ۸ تیمار شامل S_0N_0، S_1N_0، S_0N_2، S_2N_1، S_2N_0، S_1N_1، S_0N_3 و S_2N_2 انتخاب شد. این تیمارها برای انجام واسنجی مدل و انطباق مقادیر برآورد شده رطوبت خاک، عملکرد و تبخیر- تعرق ذرت با مقادیر اندازه‌گیری شده، تعیین شد. سپس بدون تغییر در فایل‌های گیاهی واسنجی شده، مدل برای ۸ تیمار دیگر شامل S_3N_0، S_2N_3،

[1] Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

S_1N_2، S_1N_1، S_0N_1، S_3N_1، S_3N_2، S_1N_3 و S_3N_3 اجرا شد و مقادیر برآورد شده ارزیابی شد (صحت‌سنجی). به‌طورکلی واسنجی و صحت سنجی با هدف انطباق داده‌های شبیه‌سازی‌شده به داده‌های واقعی، برای هر سه پارامتر رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد ذرت انجام شد. در مدل AquaCrop مقدار رطوبت خاک، زیست‌توده، عملکرد گیاه (تن بر هکتار)، تبخیر- تعرق بیشینه و واقعی گیاه (میلی‌متر بر روز) در بازه زمانی روزانه، ده‌روزه، ماهانه و کل دوره کشت به‌عنوان خروجی مدل ارائه شد.

جدول ۳. واسنجی پارامترهای گیاهی ذرت در مدل AquaCrop

Table 3. Calibration of maize parameters in the AquaCrop model

Parameter	پارامتر	واحد Unit	مقدار پارامتر Parameter value	Calibration method	روش واسنجی
Base growth temperature	دمای پایه رشد	℃	10	Default	پیش‌فرض
Upper temperature	دمای بالا	℃	30	Default	پیش‌فرض
Seed density	تراکم بذر	plant/ha	80000	Was measured	اندازه‌گیری شد
Seed germination time	زمان جوانه‌زنی بذر	day	6	Was measured	اندازه‌گیری شد
Initial canopy cover	پوشش گیاهی اولیه (CC_0)	%	1	Was calibrated	واسنجی شد
Ratio of crown surface to plant number	نسبت اندازه سطح تاج به تعداد گیاه	cm^2/ plant	12.5	Was measured	اندازه‌گیری شد
Time to reach maximum canopy cover	زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی	day	60	Was measured	اندازه‌گیری شد
Flowering time	زمان گل‌دهی	day	64	Was measured	اندازه‌گیری شد
Maturity time	زمان بلوغ	day	80	Was measured	اندازه‌گیری شد
Maximum canopy cover	حداکثر پوشش گیاهی (CCx)	%	85	Was calibrated	واسنجی شد
The most effective root depth	بیشترین عمق مؤثر ریشه	cm	60	Was measured	اندازه‌گیری شد
Normalized water productivity	بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	g/m^2	35	Was calibrated	واسنجی شد
Plant transpiration coefficient for complete cover	ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل ($Kc_{Tr,x}$)	-	1.15	Was calibrated	واسنجی شد
Water depletion fraction (lower limit)	کسر تخلیه آب خاک (حد پایین)	-	0.6	Was calibrated	واسنجی شد
Water depletion fraction (upper limit)	کسر تخلیه آب خاک (حد بالا)	-	0.3	Was calibrated	واسنجی شد
Reference Harvest Index	شاخص برداشت مرجع (HI_0)	-	55	Was calibrated	واسنجی شد
Lower limit of Sensitivity to salinity stress	حد پایین حساسیت به تنش شوری	dS/m	2	Default	پیش‌فرض
Upper limit of Sensitivity to salinity stress	حد بالای حساسیت به تنش شوری	dS/m	8	Default	پیش‌فرض

برای ارزیابی مدل AquaCrop از داده‌های مشاهده‌ای در مزرعه (Observation) و برآورد شده توسط مدل (Predict) استفاده شد. سپس آماره‌های ارزیابی ارائه‌شده توسط مدل (روابط ۷ تا ۱۲) شامل ضریب تبیین (R^2)، میانگین ریشه دوم خطا (RMSE)، میانگین ریشه دوم خطای نرمال‌شده (NRMSE)، کارایی مدل‌سازی (EF)، شاخص توافق یا انطباق بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده (d) و میانگین خطای انحرافی (MBE) برای تعیین اعتبار مدل محاسبه شد. مثبت بودن آماره MBE نشانه بیش برآوردی و منفی بودن آن نشانه کم برآوردی مدل بود. در روابط مذکور n، O_i، P_i،

$\overline{O}$ و $\overline{P}$ به‌ترتیب تعداد داده‌ها، مقدار داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده، متوسط داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده بود. حداقل بودن (نزدیک به صفر بودن) آماره RMSE و MBE، کم‌تر از ۱۰ درصد بودن آماره NRMSE (Jamieson et al., 1991) و نزدیک به یک بودن آماره‌های R^2، EF و d، نشان‌دهنده کارایی بسیار خوب مدل در تخمین داده‌ها بود.

$$R^2=\left[\frac{\sum(O_i-\overline{O})(P_i-\overline{P})}{\sqrt{\sum(O_i-\overline{O})^2\sum(P_i-\overline{P})^2}}\right]^2 \quad [۷]$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum(P_i-O_i)^2}{n}} \quad [۸]$$

$$NRMSE=\frac{1}{\overline{O}}\sqrt{\frac{\sum(P_i-O_i)^2}{n}}\,100 \quad [۹]$$

$$EF=1-\frac{\sum(P_i-O_i)^2}{\sum(O_i-\overline{O})^2} \quad [۱۰]$$

$$d=1-\frac{\sum(P_i-O_i)^2}{\sum(|P_i-\overline{O}|+|O_i-\overline{O}|)^2} \quad [۱۱]$$

$$MBE=\frac{\sum(P_i-O_i)}{n} \quad [۱۲]$$

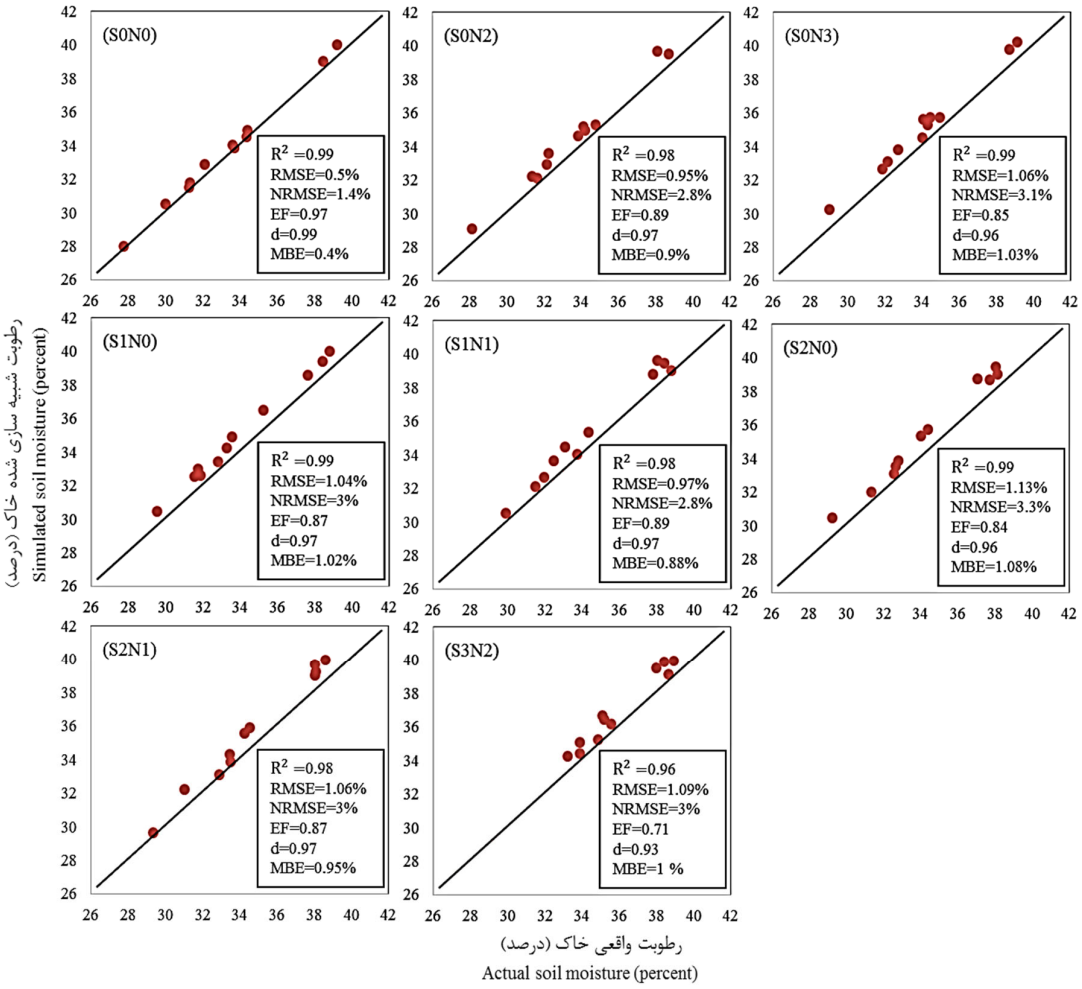
نتایج و بحث

رطوبت خاک

در این پژوهش مقدار رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه ذرت به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد. نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای برآورد رطوبت خاک در شکل (۳) ارائه شد. میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) برای تیمارهای مختلف بین ۰/۴ تا ۱/۱ درصد بود. مقدار خطای نرمال شده (NRMSE) بین ۱/۴ تا ۳/۳ درصد قرار داشت که نشان‌دهنده توان مناسب مدل در شبیه‌سازی بود. مقادیر R^2، d و EF نیز در مرحله واسنجی به‌ترتیب بین ۰/۹۶-۰/۹۹، ۰/۹۳-۰/۹۹ و ۰/۷۱-۰/۹۷ قرار داشت. در تحقیق مشابهی بر روی ذرت، رطوبت خاک در شرایط مصرف مقادیر متفاوت کود نیتروژن توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. آماره‌های NRMSE و R^2، در مرحله واسنجی مدل به‌ترتیب شامل مقادیر ۵/۴۹ درصد و ۰/۸۲۲ بود. نتایج حاکی از دقت بالای مدل در برآورد رطوبت ناحیه ریشه گیاه بود (Ranjbar et al., 2017). همچنین گزارش شد که مقدار هرچه دقیق‌تر تخمین رطوبت ناحیه ریشه در تخمین تبخیر- تعرق گیاه بسیار اهمیت داشت و در کل باعث تخمین دقیق‌تر عملکرد محصول توسط مدل شد (Ahmadi et al., 2015; Greets and Raes, 2010). به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی مقدار رطوبت نیمرخ خاک در تنش کم‌آبی در کشت گندم، گزارش شد که مقدار پارامترهای R^2، NRMSE و EF در مرحله واسنجی برای ارقام روشن و قدس به‌ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۶؛ ۳/۸۴، ۶/۶۵ درصد و ۰/۹۷، ۰/۹۶ بود (Khorsand et al., 2014). در تحقیق دیگر و در شرایط مصرف کود نیتروژن با دو روش سنتی و کودآبیاری، عملکرد مدل AquaCrop برای برآورد اجزای بیلان آب خاک در کشت ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار پارامترهای RMSE، d، NRMSE و R^2 در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۲/۷٪، ۸۵٪، ۷/۲۷٪ و ۰/۷۸ بود. تمام اعداد شبیه‌سازی‌شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، قدری بیش تخمینی داشتند. ولی درمجموع عملکرد مدل در برآورد رطوبت خاک مناسب بود. ساختار ساده محاسبات در مدل AquaCrop، از دلایل بیش برآوردی مدل محسوب شد؛ اما از طرفی وجود معادلات بر پایه آب و توجه خاص به میزان آب مصرف‌شده در ساختار محاسباتی مدل AquaCrop سبب شد دقت مدل در برآورد محتوای رطوبت خاک مناسب باشد (Ziayee et al., 2015).

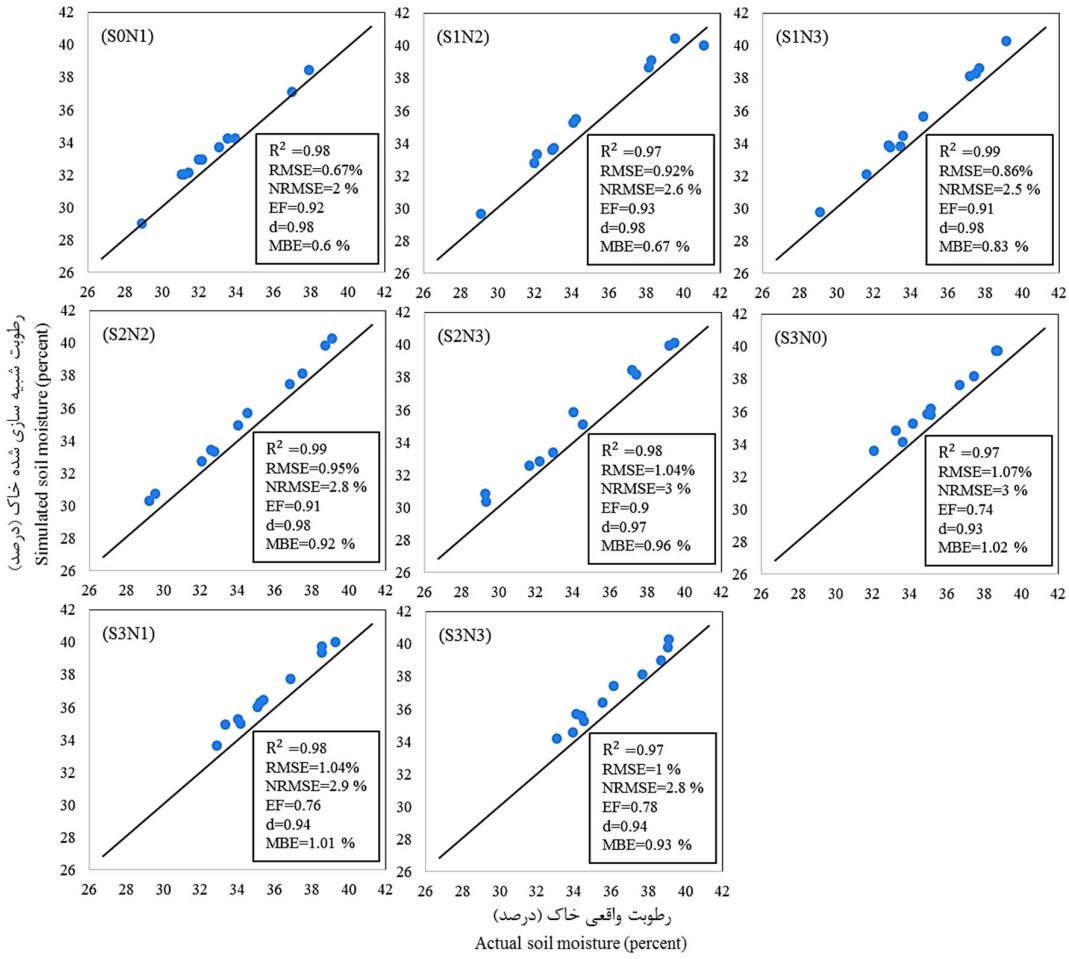
پس از واسنجی و بدون تغییر در پارامترهای گیاهی ورودی مدل، با ۸ تیمار باقی‌مانده عمل صحت‌سنجی انجام شد. در شکل (۴) موقعیت رطوبت واقعی و شبیه‌سازی‌شده در تیمارها و نتایج مربوط به ارزیابی مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی مشاهده شد. میانگین خطای شبیه‌سازی رطوبت خاک (RMSE)، از ۰/۶ تا ۱ درصد متغیر بود. مقدار خطای نرمال‌شده (NRMSE) در محدوده ۲ تا ۳ درصد قرار داشت و این یعنی عملکرد مدل در برآورد مقدار رطوبت خوب بود. مقدار ضرایب R^2، d و EF نشان‌دهنده همبستگی مناسب و انطباق خوب بین داده‌ها و کارایی مطلوب مدل‌سازی بود. در تحقیق مشابه رطوبت خاک تحت کشت ذرت در مناطق نیمه‌خشک و تحت شرایط متفاوت کودی و آبیاری، با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. توانایی مدل در برآورد رطوبت در همه اعماق خاک خوب ارزیابی شد (Abedinpour et al., 2012). در تحقیقی با پنج تیمار کودی صفر (N_0)، ۵۰ (N_1)، ۱۰۰ (N_2)، ۱۵۰ (N_3) و ۲۰۰ کیلوگرم مصرف کود نیتروژن در هکتار (N_4)، مقدار رطوبت خاک تحت کشت ذرت با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مقدار NRMSE برای تیمارهای N_0 و N_3 در مرحله صحت‌سنجی مدل به‌ترتیب ۱۰/۷۸٪ و ۸/۲۲٪ و مقدار R^2 برای تیمارهای مذکور در بازه ۰/۸۰۵ تا ۰/۸۵۷ قرار داشت؛

که نشان‌دهنده توان بالای مدل در برآورد رطوبت ناحیه ریشه در طول فصل رشد بود (Ranjbar et al., 2017). در تحقیق دیگر برای شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک با مدل AquaCrop تحت شرایط تنش‌خشکی، گزارش شد که مقدار RMSE در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب در بازه ۱- ۳/۹ و ۱/۲- ۳/۷ درصد حجمی قرار داشت (Ahmadi et al., 2015). در تحقیق دیگر برای پیش‌بینی مقدار رطوبت نیمرخ خاک توسط مدل AquaCrop در کشت گندم، مقدار پارامترهای R^2، NRMSE و EF در مرحله واسنجی برای ارقام روشن و قدس به‌ترتیب؛ ۰/۹۴، ۰/۹۵، ۴/۶۵، ۴/۵۵ درصد و ۰/۸۹، ۰/۹۶ گزارش شد. در این مدل نوع معادله حاکم بر بیلان آب به‌گونه‌ای بود که در آن برخی از عوامل مؤثر بر حرکت آب (از قبیل جریانات ترجیحی) در نظر گرفته نمی‌شد. این مسئله از علل ضعف مدل مذکور در برآورد مقدار رطوبت خاک بود (Khorsand et al., 2014). در تحقیق دیگر عملکرد مدل AquaCrop در برآورد اجزای بیلان آب خاک در کشت ذرت، در شرایط مصرف کود نیتروژن با دو روش سنتی و کودآبیاری خوب ارزیابی شد. نتایج نشان داد مقدار



شکل ۳. واسنجی مدل AquaCrop برای برآورد مقدار رطوبت خاک

Fig. 3. Calibration of AquaCrop model for estimation of soil moisture



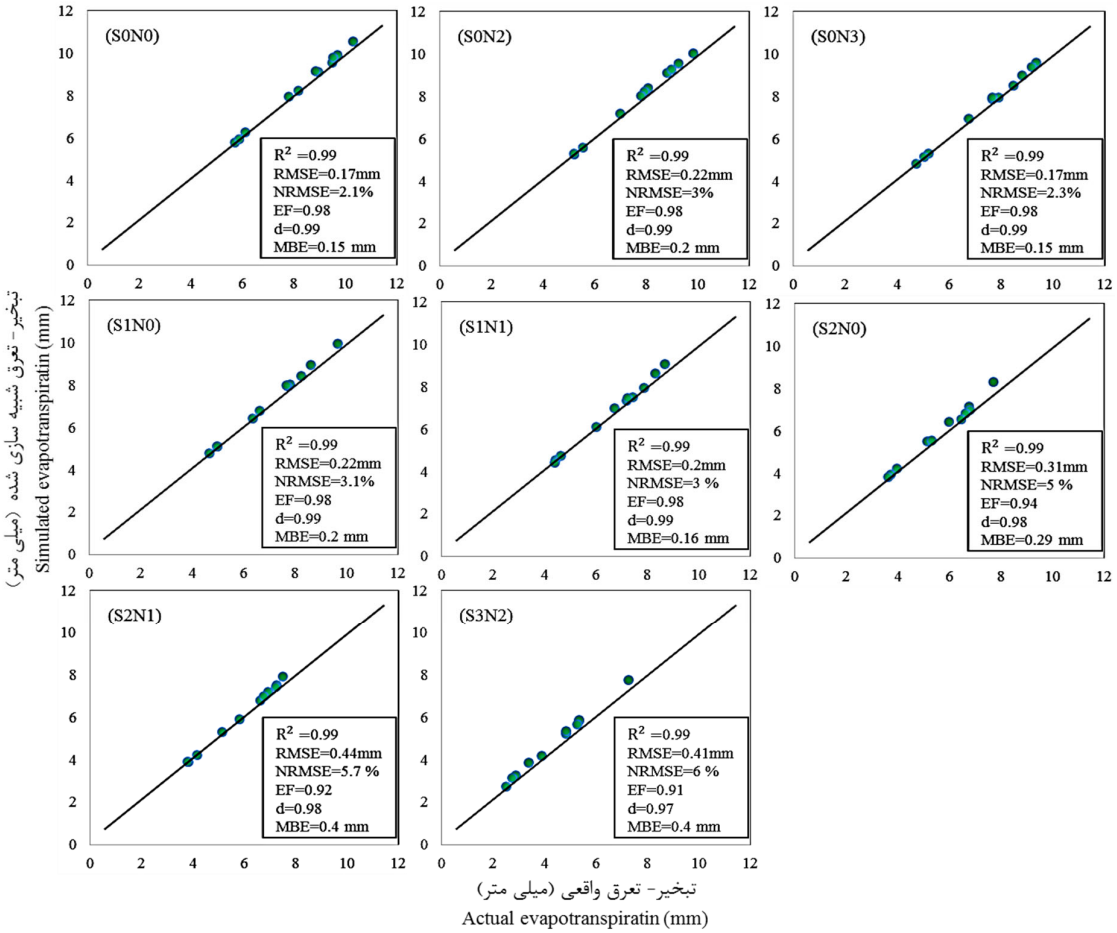
شکل ۴. ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد مقدار رطوبت خاک (صحت سنجی)

Fig. 4. Evaluating of AquaCrop model in estimation of soil moisture (Validation)

پارامتر RMSE و d در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب ۲/۶۷ و ۹۴ درصد بود (Ziayee et al., 2015). سایر تحقیقات مقدار پارامتر RMSE را در محدوده ۱/۵- ۹/۸ درصد در برآورد رطوبت خاک تحت کشت ذرت نشان دادند (Meban et al., 2013).

تبخیر- تعرق ذرت

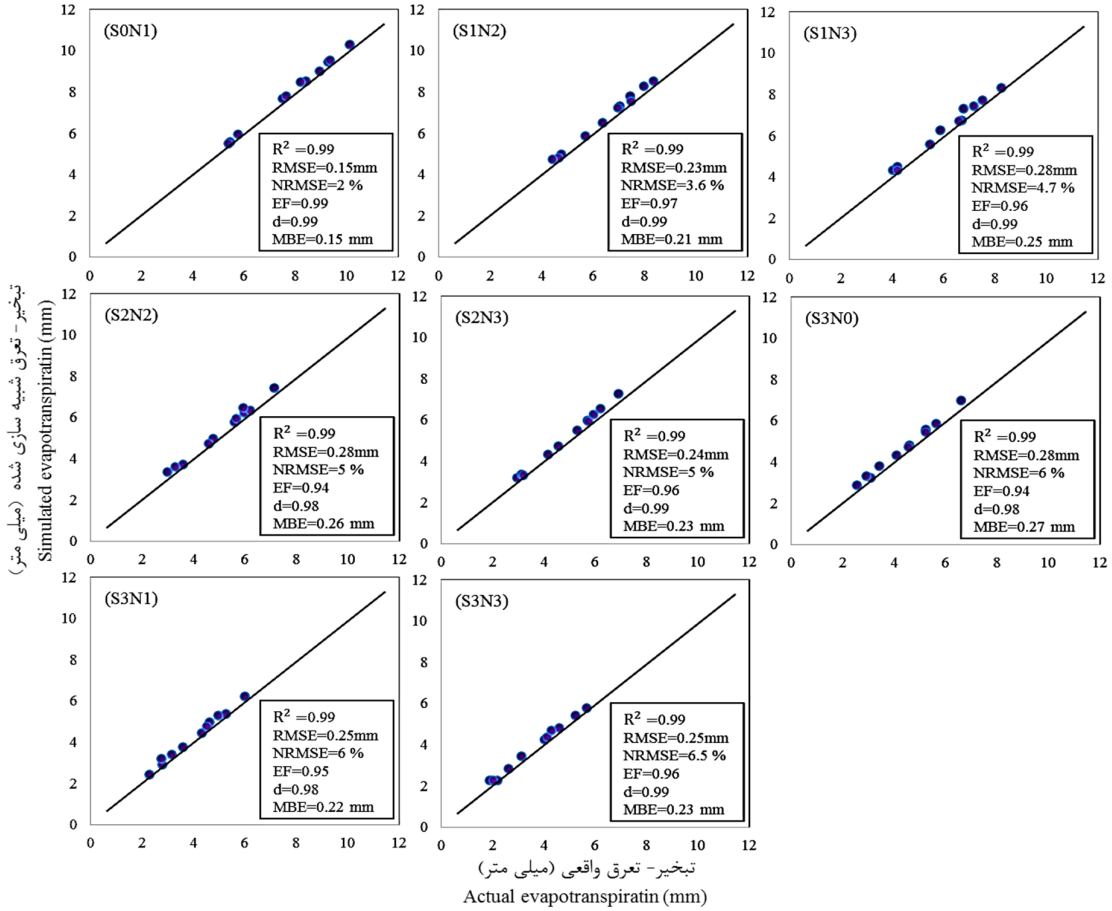
تبخیر- تعرق ذرت علوفه‌ای در طول فصل رشد با در نظر گرفتن بیلان حجمی آب در طول شبانه‌روز اندازه‌گیری شد. با توجه به اهداف پژوهش از تعداد ۸ تیمار (به‌طور تصادفی) برای واسنجی مقدار تبخیر- تعرق ذرت علوفه‌ای در طول روز استفاده شد. نتایج واسنجی مدل برای تیمارهای منتخب در شکل (۵) ارائه شد. میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) در تمام تیمارها از ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌متر بر روز برآورد شد. این نشان‌دهنده کارایی مطلوب مدل در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق روزانه ذرت بود. مقدار خطای نرمال شده (NRMSE) بین ۲ تا ۶ درصد بود، یعنی عملکرد مدل خوب بود. در تحقیقات گذشته گزارش شد که اگر مقدار NRMSE کوچک‌تر از ۱۰ درصد بود، عملکرد مدل AquaCrop خوب است (Jamieson et al., 1991). مقدار پارامترهای EF، d و R^2 (همبستگی بین داده‌ها) نزدیک به عدد یک و مناسب بود. در تحقیقی مشابه شبیه‌سازی تبخیر- تعرق ذرت علوفه‌ای با تیمارهای مختلف بافت و حاصلخیزی خاک انجام شد. مقدار RMSE، NRMSE و R^2 به‌ترتیب ۰/۸۸-۱/۱۶ میلی‌متر، ۱۸/۷-۲۴/۲ درصد و ۰/۷۲-۰/۸۹۱ برای مرحله واسنجی برآورد شد. نتایج نشان داد که کارایی مدل AquaCrop برای این کار خوب بود (Ghorbanian Kurd Abadi et al., 2015).



شکل ۵. واسنجی مدل AquaCrop برای تخمین مقدار تبخیر- تعرق ذرت

Fig. 5. Calibration of AquaCrop model for estimation of maize evapotranspiration

پس از واسنجی و بدون تغییر در پارامترهای گیاهی ورودی مدل، با ۸ تیمار باقی‌مانده عمل صحت‌سنجی انجام شد. شکل (۶) تبخیر- تعرق واقعی ذرت و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop را به‌صورت روزانه نشان می‌دهد. با افزایش سطح شوری و کاهش حاصلخیزی، کاهش مقدار تبخیر- تعرق در داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده مشاهده شد. در تحقیق مشابه گزارش شد که حاصلخیز کردن خاک با افزودن کود به آن باعث افزایش تبخیر- تعرق ذرت شد؛ که مدل AquaCrop نیز روند مشابهی را در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق نشان داد (Ghorbanian Kurd Abadi et al., 2015). در این پژوهش تبخیر- تعرق شبیه‌سازی‌شده بیشتر از مقدار واقعی بود. علت آن ضعف در معادلات مربوط به بیلان آب خاک در مدل نسبت به شرایط طبیعی بود. در ابتدا و انتهای دوره کشت داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده به هم نزدیک‌تر بودند. دلیل آن می‌توانست حساسیت کم‌تر گیاه به تنش‌ها در زمان‌های مذکور بوده باشد. با توجه به آماره‌های ارزیابی مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی، میانگین خطا (RMSE) از ۰/۱۵ تا ۰/۳ میلی‌متر بر روز متغیر بود. مقدار خطای نرمال‌شده (NRMSE) در محدوده ۲ تا ۶ درصد قرار داشت و این یعنی عملکرد مدل در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق، خوب بود. مقدار ضرایب R^2 و d نشان‌دهنده همبستگی مناسب و انطباق خوب بین داده‌ها بود. برای مقایسه با تحقیقات گذشته در تحقیقی مدل AquaCrop مجموع تبخیر- تعرق گیاه پنبه را تحت شرایط تنش آبی با خطای ۱۳ درصد پیش‌بینی نمود (Farahani et al., 2009). در تحقیق دیگر تبخیر-تعرق گندم با مدیریت کم‌آبیاری در منطقه کرج با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل قادر است تبخیر- تعرق را در دور آبیاری ۷ روزه با دقت مناسب (RMSE = ۴/۹ ٪) برآورد کند؛



شکل ۶. ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین مقدار تبخیر- تعرق ذرت (صحت سنجی)

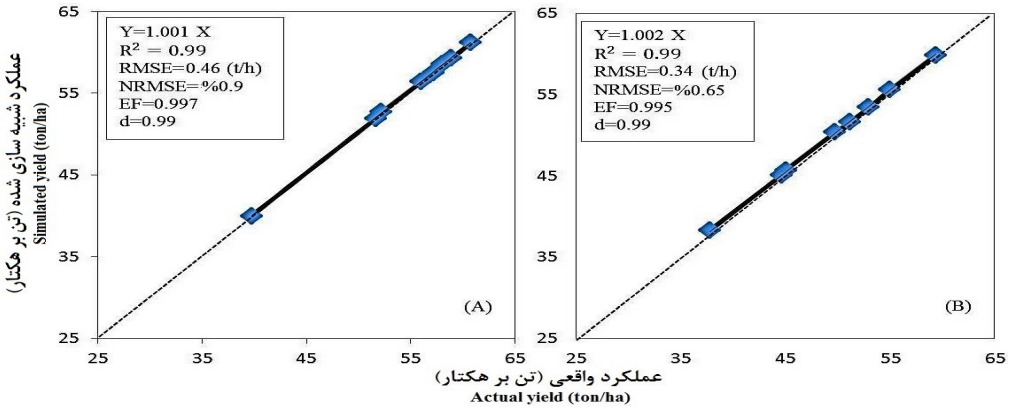
Fig. 6. Evaluating of AquaCrop model in estimation of maize evapotranspiration (Validation)

اما با افزایش دور آبیاری به ۱۴ روز کارایی مدل کاهش یافت (Alizadeh et al., 2010). در تحقیق مشابه بر روی ذرت گزارش شد که تبخیر- تعرق قسمتی از بیلان حجمی آب خاک است. از سوی دیگر مدل AquaCrop با در نظر نگرفتن مفاهیم انتشار آبی، جذب و تجزیه املاح آب دارای ضعف است. در این صورت وجود املاح در بافت‌های مختلف خاک می‌تواند علت خطای مدل در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق باشد (Ghorbanian Kurd Abadi et al., 2015). نتایج این پژوهش نشان داد که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی مقدار تبخیر- تعرق روزانه ذرت تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی، اندکی بیش‌برآورد و دارای کارایی خوب بود. آشکار است که تأثیر هرکدام از تنش‌های مذکور بر تبخیر- تعرق به‌طور جداگانه توسط مدل منظور می‌گردد؛ اما به نظر می‌رسد تأثیر افزایش شوری بر کاهش جذب عناصر غذایی (مانند نیتروژن) از خاک لحاظ نمی‌گردد. دراین‌باره گزارش شد که با افزایش شوری آب، مقدار نیتروژن کمتری توسط ذرت از خاک جذب شد. دلیل اصلی این بود که در اثر تنش شوری، گیاه قادر به جذب نیتروژن موجود در خاک نبود. حتی اگر عنصر نیتروژن بیش از نیاز گیاه در خاک وجود داشت (Lacerda et al., 2016). در تحقیق دیگر گزارش شد که تنش شوری، جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن را در ذرت کاهش داده و باعث افزایش مقاومت روزنه‌ها شد (Farooq et al., 2015)؛ بنابراین امکان داشت که لحاظ نشدن مسئله فوق در مدل AquaCrop از دلایل بیش‌برآوردی این مدل نسبت به شرایط واقعی باشد.

عملکرد ذرت

در این پژوهش افزایش شوری آب آبیاری و کاهش نیتروژن خاک، باعث کاهش عملکرد واقعی و شبیه‌سازی‌شده ذرت شد. مقادیر واقعی عملکرد و شبیه‌سازی‌شده با مدل AquaCrop در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌وسیله آماره‌های

ارزیابی مدل مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۷). آماره RMSE در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۳۴ تن بر هکتار و آماره NRMSE به‌ترتیب ۰/۹ و ۰/۶۵ درصد بود که به لحاظ آماری نشان‌دهنده توان خوب مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول بود. آماره‌های R^2، EF و d در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹ و در مرحله صحت‌سنجی ۰/۹۹، ۰/۹۹۵ و ۰/۹۹ بود؛ که با توجه به نزدیک بودن آن‌ها به عدد یک، می‌توان به همبستگی مطلوب بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و واقعی اشاره نمود. در تحقیقی مشابه عملکرد ذرت علوفه‌ای تحت سه تیمار بافت خاک (لوم رسی سیلتی، لوم و لوم شنی) و در سه سطح حاصلخیزی (بدون کود، افزودن یک و دو درصد کود به خاک) با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. آماره‌های RMSE، NRMSE و R^2 به‌ترتیب ۰/۰۹ تن بر هکتار، ۰/۶۷ درصد و ۰/۹۹ گزارش شد؛ که نشان‌دهنده توانمند بودن مدل در شبیه‌سازی عملکرد وزن تر اندام هوایی ذرت بود (Ghorbanian Kurd Abadi et al., 2015). در تحقیق دیگر و در شبیه‌سازی وزن زیست‌توده ذرت در منطقه دهلی هند، مقدار RMSE، ۰/۲۹ تا ۰/۴۲ تن بر هکتار و ضریب R^2، ۰/۹ تا ۰/۹۱ برآورد شد (Stricevic et al., 2014).در تحقیقی با تیمارهای مختلف کود نیتروژن (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار)، زیست‌توده ذرت با مدل AquaCrop تخمین زده شد. مقدار NRMSE و R^2 به‌ترتیب ۵/۳۲ درصد و ۰/۹۷۵ به‌دست آمد. نتایج نشان داد مدل مذکور، عملکرد نهایی زیست‌توده ذرت را در تیمارهای مختلف نسبتاً دقیق پیش‌بینی می‌کند (Ranjbar et al., 2017). در شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی (بدون استفاده و با استفاده از خاک‌پوش گیاهی) و آبیاری با آب‌شور (در سه سطح شوری ۲، ۴/۵ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر) عملکرد ذرت با مدل AquaCrop تخمین زده شد. مقدار آماره‌های R^2 و NRMSE برای زیست‌توده ذرت به ترتیب ۰/۹۹ و ۴/۴۸ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد که مقدار زیست‌توده ذرت به‌خوبی شبیه‌سازی شد ولی با افزایش شوری آب، از دقت مدل کاسته شد (Heydarinia et al., 2017). در پژوهشی دیگر و در شرایط استفاده متناوب آب‌شور (شوری ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر) و آب شیرین (۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر) عملکرد محصول ذرت با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. ضریب R^2 در شبیه‌سازی عملکرد وزن تر محصول ۰/۷۳۳ به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل در تخمین عملکرد محصول بیش‌برآورد بود. علت بیش برآوردی مدل، قلیایی بودن آب آبیاری و عدم توانایی مدل در منظور نمودن تأثیر قلیائیت بر عملکرد محصول گزارش شد (Hasanli et al., 2015). در تحقیق کنونی نیز تخمین عملکرد محصول با اندکی بیش‌برآوردی مدل همراه بود. علت آن نیز ممکن بود به دلیل حضور عناصر قلیایی (سدیم، کلسیم و ...) در آب‌شور بوده باشد. به‌طورکلی کارایی مدل AquaCrop در برآورد عملکرد ذرت تحت تنش‌های محیطی و مدیریتی مذکور مطلوب بود.



شکل ۷. مقایسه عملکرد واقعی نسبت به‌عملکرد شبیه‌سازی‌شده ذرت با مدل AquaCrop، در مرحله واسنجی (A) و صحت‌سنجی (B)

Fig. 7. Comparing the actual yield of maize relative to the simulated yield with AquaCrop model, calibration (A) and validation (B)

نتیجه‌گیری

امروزه کاربرد مدل‌های گیاهی برای برآورد مقدار عملکرد و تبخیر- تعرق گیاه تحت شرایط محیطی و مدیریتی هر منطقه موردتوجه قرار دارد. ارزیابی توانمندی مدل‌ها کمک زیادی به برنامه‌ریزان بخش کشاورزی در تخمین پارامترهای موردنظر می‌نماید. در این پژوهش با افزایش شوری، آب و نیتروژن کم‌تری از خاک توسط گیاه جذب شد و بهره‌وری مصرف آب کاهش یافت. بهره‌وری مصرف آب از ۲/۷۴ تا ۴/۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود و حداکثر کاهش آن نسبت به شرایط نرمال منطقه ۳۸ درصد بود. نتایج نشان داد در شرایط وجود تنش شوری، کاربرد کود نیتروژن بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد و از تجمع نیترات در خاک و آلوده شدن منابع آب‌وخاک به این عنصر جلوگیری نمود. به‌طوری‌که افزایش نیتروژن خاک به‌جای آبیاری بیشتر، راه‌کار مناسبی برای افزایش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بود. از سوی دیگر امکان برآورد رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد ذرت تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی، با مدل AquaCrop ارزیابی شد. هدف از واسنجی مدل، نزدیک‌کردن داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل به داده‌های واقعی (اندازه‌گیری شده در منطقه) بود. مقادیر به‌دست‌آمده برای آماره‌های NRMSE و R^2 به‌ترتیب کوچک‌تر از ۱۰ درصد و بیشتر از ۰/۹ بود که بیانگر عملکرد مطلوب مدل در این زمینه بود. ارزیابی خروجی مدل در مرحله صحت‌سنجی نشان داد مقادیر برآورد شده برای رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد، اندکی بیش‌برآورد ولی قابل‌قبول بودند. از دلایل بیش‌برآوردی، ضعف مدل در معادلات مربوط به بیلان آب خاک و در نظر نگرفتن تأثیر قلیائیت آب و اثر شوری بر جذب عناصر غذایی و نیتروژن از خاک بود. به‌طورکلی مدل AquaCrop مدل مناسبی برای برآورد رطوبت، تبخیر- تعرق واقعی و عملکرد محصول تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی شناخته شد.

منابع

Ahmadi, S.H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.K., Sepaskhah, A.R., 2015. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. Water Resources Management. 29, 2837-2853.

Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Singh, M., Pathak, H., Ahmad, T., 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. Agricultural Water Management. 110, 55-66.

Akumaga, U., Tarhule, A., Yusuf, A.A., 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. Agricultural and Forest Meteorology. 232, 225–234.

Alizadeh, H. A., Nazari, B., Parsinejad. M., Ramezani Etedali, H., Janbaz, H. R., 2010. Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 4(2), 273-283. [In Persian with English Summary].

Alizade, A., 2007. Design of Surface Irrigation Systems. Publication of Imam Reza University, Mashhad, Iran. [In Persian].

Anjum Iqbal, M., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., Rio, S., 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the north china plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management. 135, 61-72.

Babazadeh, H., Sarai Tabrizi, M., 2012. Assessment of AquaCrop Model under Soybean Deficit Irrigation Management Conditions. Water and Soil. 26(2), 329-339. [In Persian with English Summary].

Farahani, H.J., Izzi, G., Oweis, T.Y., 2009. Parameterization and evaluation of the Aquacrop model for full and deficit irrigated cotton. Agronomy Journal. 101, 469–476.

Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., Kadambot, H.M., 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. Institute National de la Recherche Agronomique (INRA). 35, 461-481.

Ghorbanian Kurd Abadi, M., Liaghat, A.M., Vatankhah, E., Noory, H., 2015. Simulation of yield and evapotranpiration of forage maize using AquaCrop model. Water and soil conservation. 4(2), 47-63. [In Persian with English Summary].

Geerts, S., Raes, D., 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. Agricultural Water Management. 98, 213-216

Hasanli, M., Afrasiab, P., Ebrahimian, H., 2015. Field assessment and performance of SALTMED and AquaCrop models in the alternative irrigation management with saline and fresh water. Water and Soil Research in Agriculture. 46(3), 487-498. [In Persian with English Summary].

Heng, L.k., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T., Steduto, P., 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. Agronomy. 101.3, 488-498.

Heydarinia, M., Boroomandnasab, S., Naseri, A. A., Albaji, M., 2017. Evaluation of AquaCrop Model in estimation of maize yield and soil salinity under conditions of different agricultural management and irrigation with saline water. Iran Water and Soil Research. 48(1), 50-61. [In Persian with English Summary].

Jamieson, P. D., Porter, J. R., Wilson, D. R., 1991. A test of computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research. 27, 337-350.

Khalili, N., Davary, K., Alizadeh, A., Kafi, M., Ansari, H., 2014. Simulation of Rainfed Wheat Yield using AquaCrop Model, Case Study: Sisab Rainfed Researches Station, Northern Khorasan. Water and Soil. 28(5), 930- 939. ([In Persian with English Summary].

Khorsand, A., Verdinejad, V. R., Shahidi, A., 2014. Evaluating the performance of Aqua Crop model in predicting of wheat yield, moisture and salinity of soil profile under salt stress and irrigation deficiency. Water and Irrigation Management. 4(1), 89-104. [In Persian with English Summary].

Lacerda, C.F., Ferreira, J.F.S., Liu, X., Suarez, D.L., 2016. Evapotranspiration as a Criterion to Estimate Nitrogen Requirement of Maize under Salt Stress. Agronomy and Crop Science. 202, 192-202.

Meban, V.J., Day, R.L., Hamlett, J.M., Watson J.E., Roth, G.W., 2013. Validating the FAO AquaCrop model for rain fed maize in Pennsylvania. Agronomy Journal. 105, 419-427.

Mohammadi, M., Mohammadi Ghaleney, M., Ebrahimi, K., 2011. Time and local variations of groundwater quality in Qazvin plain. Iranian Water Research. 5(8), 41-52. [In Persian with English Summary].

Ranjbar, A., Rahimikhoob, A., Ebrahimian, H., 2017. Evaluating Semi-Quantitative Approach of the AquaCrop Model for Simulating Maize Response to Nitrogen Fertilizer. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 11(2), 286-298. [In Persian with English Summary].

Rudnick, D. R., Irmak, S., Djaman, K., Sharma, V., 2017. Impact of irrigation and nitrogen fertilizer rate on soil water trends and maize evapotranspiration during the vegetative and reproductive periods. Agricultural Water Management. 191, 77–84.

Sepaskhah, A.R., Bazrafshan- Jahromi, A.R., Shirmohammadi- Aliakbarkhani, Z., 2006. Development and Evaluation of a Model for Yield Production of Wheat, Maize and Sugarbeet under Water and Salt Stresses. Biosystems Engineering. 93(2), 139–152.

Stockle, C.O., Martin, S.A., Campbell, G.S., 1994. CropSyst, a Cropping System Simulation Model: Water/ Nitrogen Budgets and Crop Yield. Agricultural Systems. 46, 335–359.

Stricevic, R., Dzeletovic, Z., Djurovic, N., Cosic, M., 2014. Global change biology bioenergy. 12206.

Van-Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J., Raes, D., 2014. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aqua crop procedure. The Journal of Agricultural Science. 153(7), 1218-1233.

Xin, H., Peiling, Y., Shumei, R., Yankai, L., Guangyu, J., Lianhao, L., 2016. Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. Agricultural and Biological Engineering. 9(2), 63-73.

Ziayee, G., Babazadeh, H., Abbasi, F., Kaveh, F., 2015. Investigating the performance of AquaCrop and CERES-Maize models to estimating the components of soil water balance and maize yield. Iran Water and Soil Research. 45(4), 435-445. [In Persian with English Summary].