

## ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت و شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری با آب شور

مولود حیدری نیا<sup>۱\*</sup>، سعید برومند نسب<sup>۲</sup>، عبدعلی ناصری<sup>۳</sup>، محمد الباجی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دوره دکتری، آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴. استادیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۴/۱)

### چکیده

اخیراً فائو نسخه ۴ مدل AquaCrop را ارائه کرده است که قادر به پیش‌بینی اثر آبیاری با آب شور بر عملکرد محصول و شوری خاک می‌باشد. در تحقیق حاضر، مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری با آب شور برای ذرت دانه‌ای (رقم SC.704) مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌های مزرعه‌ای مطالعه حاضر در مزرعه کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا گردید. مدیریت‌های زراعی مختلف شامل بدون استفاده از بقایای گیاهی، استفاده از بقایای گیاهی در سطح خاک به عنوان خاکپوش و اختلاط بقایای گیاهی با لایه سطحی خاک تا عمق ۳۰ سانتیمتر و شوری آب آبیاری در سه سطح شامل شوری آب رودخانه کارون (به طور متوسط ۲ دسی زیمنس بر متر)، شوری ۴/۵ و ۷ دسی زیمنس بر متر بود. پس از واسنجی مدل به منظور تعدیل برخی پارامترهای ورودی، صحت‌سنجی مدل انجام شد. در مرحله صحت‌سنجی مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ )، خطای نسبی (RE)، ضریب باقیمانده (CRM) و متوسط ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای شوری خاک به ترتیب ۱۰/۰، ۶/۸۳، ۱۰/۰۴ درصد، ۰/۰۴ و ۱۱/۶۴، برای عملکرد دانه به ترتیب ۱/۹۳، ۵/۲ درصد، ۰/۰۱ و ۵/۵۸، برای زیست توده به ترتیب ۰/۹۹، ۴/۲ درصد، ۰/۰۲- و ۴/۴۸ و برای پوشش سایه‌انداز به ترتیب ۰/۹۷، ۱۶ درصد، ۰/۰۸ و ۱۴/۷۱ به دست آمد. متوسط خطا در مدیریت‌های کاربرد و عدم کاربرد بقایای گندم برای شوری خاک به ترتیب ۹/۶ و ۱۲/۷ درصد، برای عملکرد دانه به ترتیب ۶ و ۳/۵ درصد، برای زیست توده به ترتیب ۴/۸ و ۳/۱ درصد و برای پوشش سایه‌انداز به ترتیب ۱۴/۶ و ۱۸/۸ درصد تعیین شد. نتایج نشان داد که عملکرد دانه، زیست توده، شوری خاک و پوشش سایه‌انداز به خوبی شبیه‌سازی شدند. هرچند دقت مدل در تخمین شوری خاک و پوشش سایه‌انداز کمتر از سایر پارامترها بود و با افزایش شوری دقت مدل کاهش یافت. همچنین در شرایط اعمال مدیریت‌های زراعی، دقت مدل در تخمین شوری و پوشش سایه‌انداز افزایش و در تخمین عملکرد دانه و زیست توده کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: زیست توده، پوشش سایه‌انداز، بقایای گیاهی، خاکپوش

### مقدمه

به منظور آبشویی و انواع راهکارهای مدیریت آبیاری با آب شور همچون اختلاط، تناوب یک در میان و نیم در میان اشاره کرد (Liaghat and Esmaeli, 2003). در کنار راهکارهای مذکور استفاده از روش‌های مدیریت زراعی مانند شیوه‌های مختلف استفاده از بقایای گیاهی نیز در استفاده از آب‌های شور می‌تواند مؤثر باشد چرا که امروزه طبق نتایج بسیاری از محققین (Zhao et al, 2014; Tishehzan, 2011; Bezbordove et al, 2010) ثابت شده که استفاده از خاکپوش‌های مختلف سبب کاهش تبخیر از خاک، افزایش میزان آب در دسترس خاک، کاهش تجمع نمک در خاک شده و نهایتاً افزایش عملکرد محصول را به دنبال خواهد داشت.

محدودیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه خشک موجب گردیده تا امروزه نگاه‌ها به سوی استفاده از منابع آب شور معطوف شود. اما استفاده از این آب‌ها همواره باید با احتیاط صورت گیرد. در این رابطه راهکارهای متفاوتی جهت کاهش خسارات شوری و افزایش تولیدات کشاورزی وجود دارد که از آن جمله می‌توان کاشت گیاهان مقاوم به شوری، کاهش فاصله آبیاری به منظور جذب بهتر آب توسط گیاه، مصرف آب بیشتر

\* نویسنده مسئول : heidariniya@gmail.com

گیاهان متعدد به کار رفته است (Mohammadi *et al.*, 2015)، اما اکثر مطالعات درباره آن در وضعیت بدون شوری منابع آب و خاک و برای شبیه‌سازی کم آبیاری و عملکرد محصول صورت گرفته‌است (Golabi and Naseri, 2015) برخی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه مدل AquaCrop در ادامه ارائه شده است. (Khorsand *et al.* (2014) در پژوهشی به ارزیابی عملکرد

مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی پرداختند. براساس نتایج، متوسط خطای مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه ۴/۴۸ درصد به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل می‌باشد. همچنین متوسط ریشه میانگین خطای نرمال شده پیش‌بینی شوری عصاره اشباع خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۳۴/۵ و ۳۶/۸ درصد به دست آمد که این امر گویای آن است که تخمین شوری با خطای بسیار زیادی انجام شده است.

Kumar *et al.* (2014) نیز پس از ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد عملکرد چهار رقم گندم (سه رقم گندم مقاوم به شوری و یک رقم گندم غیر مقاوم به شوری) و چهار سطح شوری آب آبیاری گزارش کردند که ضریب تبیین برای عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۵ به دست آمد که نشانگر نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی است. همچنین خطای پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست توده در ارقام و سطوح شوری مختلف به ترتیب در بازه ۱۲/۷۶-۱/۹۲ و ۲۹/۲۵-۹/۹۹ درصد به دست آمد به طوری که خطای بیشتر مدل، در سطوح شوری بالاتر مشاهده گردید.

Hasan-Li *et al.* (2015) به ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در تخمین عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای و شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف استفاده از آب شور در تناوب با آب شیرین پرداختند. در این پژوهش خطای نسبی مدل در تخمین عملکرد محصول و شوری خاک برای تیمارهای مختلف به ترتیب در بازه ۳۰/۸-۲/۹ و ۴۵/۸-۵/۹ درصد گزارش شد که در مجموع گویای دقت نسبتاً خوب مدل در پیش‌بینی است، هرچند خطای مدل با افزایش تعداد دفعات آبیاری با آب شور به نسبت آب شیرین افزایش یافت.

یافته‌های Golabi and Naseri (2015) در بررسی توانایی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد نیشکر و شوری خاک تحت شرایط آبیاری با آب شور نشان داد که میانگین خطای نرمال شده در شبیه‌سازی عملکرد ۸ درصد و ضریب تبیین در شبیه‌سازی شوری پروفیل خاک بیش از ۸۰ درصد به دست آمد. این محققین اظهار داشتند که مدل، توانایی مناسبی در پیش-

آزمایش‌های مزرعه‌ای برای بررسی اثر متقابل استفاده از روش‌های مختلف کاربرد بقایای گیاهی و آب شور مفید می‌باشد ولی این کار زمان‌بر و پرهزینه است. از سایر محدودیت‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای می‌توان به محدود بودن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی، کوتاه بودن مدت زمان آزمایش و نیز محدودیت تعداد سناریوها اشاره کرد (Ebrahimi *et al.*, 2015).

از آن‌جا که مدل‌های شبیه‌سازی توان برآورد عملکرد محصول و وضعیت خاک با توجه به تغییر در اقلیم، گیاه، عملیات مدیریتی و زراعی را دارند از این‌رو سبب صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شوند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تأثیر فاکتورهای مختلف را در برآورد عملکرد نهایی بررسی و مطالعه نمود. علاوه بر این با استفاده از این ابزار می‌توان اثرات درازمدت تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری را بر محصول و شوری خاک ارزیابی کرد (Droogers and Kite, 2001). در چند دهه اخیر مدل‌های مختلفی به منظور شبیه‌سازی رشد گیاه، حرکت و انتقال آب و املاح در خاک معرفی شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به CROPWAT، CERES، CropSyst، WOFOST، SWAP، APSIM، Budjet و CRPSM اشاره کرد. بیشتر این مدل‌ها به اطلاعات ورودی زیادی نیاز دارند که اغلب آنها در دسترس نیست و استفاده از این مدل‌ها را به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی که باید قبل از فصل کشت صورت گیرد دچار مشکل می‌کند (Gholami and Pirmoradian, 2011). در این مدل‌ها یکی از معیارهای اصلی، مطالعه میزان شاخص سطح برگ می‌باشد. استفاده از بیشتر آنها به دلیل نیاز به واسنجی و اعتبار-سنجی پیچیده، نیاز به داده‌های ورودی زیاد و تغییرپذیری زیاد داده‌های ورودی دشوار می‌باشد. همچنین این مدل‌ها برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و گیاهی و مکان‌های مختلف دنیا غیر قابل دسترس هستند (Todorovic *et al.*, 2009). یکی از مدل‌های زراعی کاربردی مدل AquaCrop می‌باشد. نسخه اولیه این مدل که از اصلاح و بازنگری نشریه شماره ۳۳ فائو به دست آمده است، در سال ۲۰۰۷ و بدون لحاظ تأثیر تنش شوری ارائه شد. در نسخه ۴ که در سال ۲۰۱۲ معرفی شد، مدل اصلاح و تأثیر تنش شوری و شبیه‌سازی انتقال املاح در نیمرخ خاک نیز مدنظر قرار گرفت. مدل AquaCrop به جای شاخص سطح برگ از پوشش سایه‌انداز استفاده می‌کند و برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها، محصولات روغنی و غده‌ای قابل کاربرد است. (Raes *et al.*, 2012).

مدل AquaCrop توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند و تا به حال برای

## مواد و روش‌ها

### آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای این پژوهش در مزرعه شماره دو دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. کشت ذرت (رقم SC.704) در اول مردادماه ۱۳۹۴ در ۲۷ لایسمتر زهکش‌دار پلی‌اتیلنی به قطر ۰/۸ متر و ارتفاع ۱/۲ متر انجام و عملیات برداشت در ۳۰ آبان‌ماه ۱۳۹۴ صورت گرفت. قبل از شروع کشت، به دلیل انجام پروژه‌هایی با شوری‌های مختلف در لایسمترها طی سال‌های گذشته و عدم آبتیابی لایسمترها و همچنین ورود زهاب سایر مزارع از طریق تجهیزات خروجی به درون لایسمترها، انجام آبتیابی امری ضروری بود. آبتیابی لایسمترها در طول ۲۰ روز انجام شد. طی این مدت EC زهاب خروجی از لایسمترها مرتباً کاهش داشت و نهایتاً در شوری ۳ تا ۵ دسی‌زیمنس بر متر ثابت شد. ایجاد سله در سطح خاک برخی لایسمترها هنگام آبتیابی و از دست رفتن آب از طریق شکاف‌های عمیق از جمله دلایلی است که ممکن است از مانع از آبتیابی کامل برخی لایسمترها شده و تفاوت EC زهاب خروجی لایسمترها را افزایش دهد. البته نقش خطاهای اندازه‌گیری را نیز باید مد نظر قرار داد. برای برداشت برخی خصوصیات فیزیکی خاک، سه عدد از لایسمترها به طور تصادفی انتخاب و از اعماق ۳۰-، ۶۰-، ۹۰- سانتیمتری نمونه‌برداری شد. همچنین جهت پایش شوری نیمرخ خاک طی فصل رشد نمونه‌برداری در چهار مرحله در تمام لایسمترها و از اعماق مذکور انجام شد. مرحله اول پس از عملیات آماده سازی بستر خاک، مرحله دوم پس از استقرار محصول یعنی درست قبل از اولین آبیاری با آب شور (پنج برگی ذرت)، مرحله سوم پس از گلدهی (ظهور نسل) و مرحله چهارم حدود یک هفته تا ده روز پس از اعمال آخرین آبیاری انجام شد. در جدول (۱) برخی از خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده خاک ارائه گردیده است.

بینی عملکرد نیشکر و شوری خاک داشت، هرچند در شبیه‌سازی شوری خاک کمی بیش‌برآورد مشاهده گردید.

Mohammadi *et al.* (2015) در پژوهشی تحت عنوان واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی، گزارش کردند که مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی عملکرد محصول، زیست توده، بهره‌وری مصرف آب و شوری خاک دارد، هرچند که دقت مدل در شبیه‌سازی شوری نیمرخ خاک کمتر از سایر پارامترها بود.

Ebrahimi *et al.* (2015) در تحقیقی به بررسی شبیه‌سازی رشد ذرت و پوشش سایه‌انداز تحت چهار سطح آبیاری و سه سطح نیتروژن با مدل AquaCrop پرداختند. مقادیر متوسط شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب باقیمانده در مرحله واسنجی به ترتیب ۲۲/۷۹ و ۰/۱۴ و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب ۲۱ و ۰/۱ به دست آمد که بیانگر آن است که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پوشش سایه‌انداز دقت متوسطی داشته و خطای کم‌برآورد نیز دارد.

استان خوزستان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور است و ذرت یکی از گیاهان اصلی این استان می‌باشد (Soltani - Mohammadi *et al.*, 2011) که عمدتاً در کشت تابستانه و پس از برداشت گندم کشت می‌شود. استفاده از بقایای گندم موجود در اراضی تحت کشت ذرت به جای سوزاندن آنها، می‌تواند راهکاری جهت کاهش مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی از یک طرف و کاهش خسارات آبیاری با آب شور از طرف دیگر باشد. با توجه به تعداد بسیار اندک مطالعات انجام شده در زمینه کارایی مدل AquaCrop در شرایط شوری و همچنین عدم بررسی کارایی مدل در شرایط به کارگیری خاکپوش‌های آلی، لذا در این پژوهش به ارزیابی توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی شوری نیمرخ خاک، عملکرد محصول و پوشش سایه‌انداز ذرت دانه‌ای تحت شرایط کاربرد بقایای گندم به شیوه‌های مختلف و آبیاری با آب شور پرداخته شد.

جدول ۱- برخی از مشخصات فیزیکی خاک مورد آزمایش

عمق (cm)	بافت خاک	شن (/.)	سیلت (/.)	رس (/.)	چگالی ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (/.)	رطوبت حجمی نقطه پژمردگی (/.)
۰-۳۰	لومی‌سیلتی	۲۲	۵۵	۲۳	۱/۳۳	۳۴	۱۸
۳۰-۶۰	لومی‌سیلتی	۲۱	۵۵	۲۴	۱/۵۰	۳۴	۱۸
۶۰-۹۰	لومی‌سیلتی	۲۱	۵۶	۲۳	۱/۶۰	۳۴	۱۸

از بقایای گیاهی در سطح خاک به عنوان خاکپوش و M3: مخلوط کردن بقایای گیاهی با لایه سطحی خاک تا عمق ۳۰

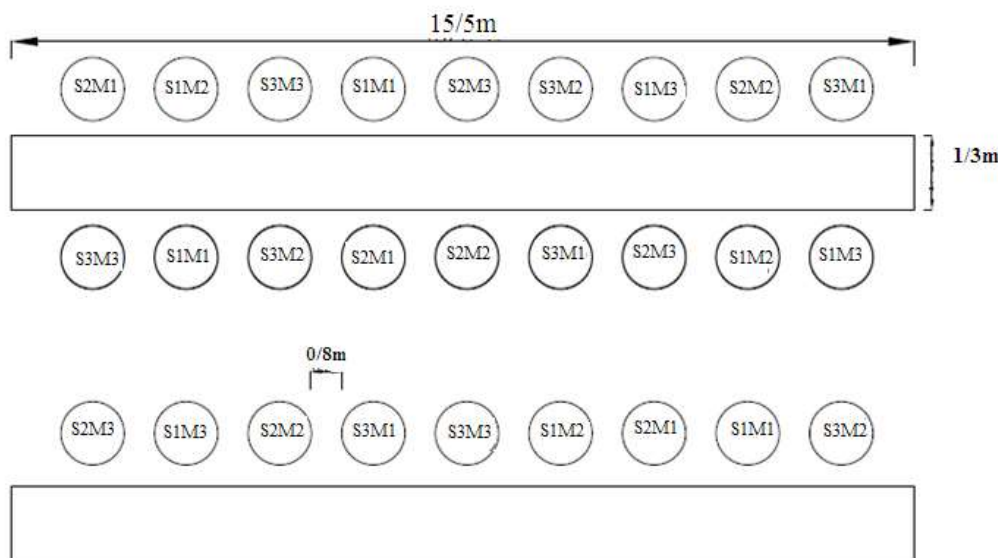
عوامل مورد بررسی شامل سه راهکار مدیریت زراعی بود که عبارتند از: M1: بدون استفاده از بقایای گیاهی، M2: استفاده

به ثابت نبودن کیفیت آب رودخانه کارون، لذا در هر نوبت آبیاری، ابتدا آب رودخانه کارون تجزیه و مقادیر EC، Ca، Mg، Na و PH تعیین و نسبت Ca/Mg و مقدار SAR محاسبه گردید. نمک‌های فوق‌الذکر به نسبتی اضافه شد که مقادیر Ca/Mg و SAR آب حاصله مشابه با آب رودخانه کارون (S1) باشد (Nasrolahi, 2013). ضمناً تیمارهای شوری پس از رسیدن به مرحله پنج برگی اعمال شد. در جدول (۲) مقادیر متوسط خصوصیات کیفی تیمارهای مختلف آب آبیاری در طول فصل کشت ارائه شده است. در شکل (۱) نیز چیدمان تیمارهای آزمایشی نشان داده شده است.

سانتیمتری. سطوح شوری اعمال شده نیز شامل: S1. آب رودخانه کارون با متوسط شوری ۲ دسی زیمنس بر متر، S2: شوری ۴/۵ دسی زیمنس بر متر و S3: شوری ۷ دسی زیمنس بر متر بود. در مجموع ۹ تیمار مورد بررسی در ۳ تکرار اجرا گردید. در مدیریت M2 مقدار ۱۲ تن در هکتار از بقایای گندم معادل با ۰/۶ کیلوگرم در سطح خاک لایسیتر پخش و در مدیریت M3 همین مقدار با لایه سطحی خاک تا عمق ۳۰ سانتیمتری مخلوط شد. شوری S1 به صورت طبیعی (آب رودخانه) موجود بود ولی سطوح شوری S2 و S3 به صورت مصنوعی با اضافه کردن مقادیر مشخصی از نمک‌های مختلف از جمله کلرید سدیم، کلرید کلسیم و منیزیم تهیه گردید. با توجه

جدول ۲- مقادیر متوسط خصوصیات کیفی تیمارهای مختلف آب آبیاری

تیمار	SO <sub>4</sub> (meq/l)	Cl <sup>-</sup> (meq/l)	Hco <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)	K <sup>+</sup> (meq/l)	Na <sup>+</sup> (meq/l)	Mg <sup>2+</sup> (meq/l)	Ca <sup>2+</sup> (meq/l)	SAR	pH	EC (dS/m)
S1	۹/۸۱	۱۳/۵۷	۳/۴۳	۰/۰۹	۱۴/۱۲	۳/۹۸	۸/۱۵	۵/۷	۷/۴	۲/۰
S2	۹/۴۸	۳۹/۱۳	۳/۳۱	۰/۱۲	۲۲/۸۷	۹/۷۵	۱۷/۹۶	۶/۱	۷/۳	۴/۵
S3	۱۶/۲	۵۵/۶	۳/۸۵	۰/۱۳	۳۰/۱۵	۱۴/۶۰	۲۹/۴۳	۶/۸	۷/۵	۷/۰



شکل ۱- چیدمان تیمارهای آزمایشی

از اندازه‌گیری تبخیر - تعرق چمن، با کمک رابطه (۱)، تبخیر - تعرق پتانسیل ذرت (ETc) محاسبه شد. لازم به ذکر است که مقادیر ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد از نشریه فائو ۵۶ استخراج و متناسب با داده‌های هواشناسی بلند مدت منطقه تعدیل و مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر مربوطه در مراحل مختلف رشد در جدول (۳) ارائه شده‌است. پس از محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل ذرت با لحاظ دور آبیاری، نیاز آبی در هر نوبت آبیاری محاسبه شد. برنامه تحویل آب به این ترتیب بود

عمق آبیاری بر اساس محاسبه نیاز آبی تیمار شاهد (S1M1) با استفاده از داده‌های روزانه تبخیر - تعرق لایسیتر چمن تعیین گردید. به همین منظور، سه عدد لایسیتر حاوی گیاه چمن در کنار بقیه لایسیترها قرار داده شد. این لایسیترها مدتی قبل از کشت ذرت سبز شده و به ارتفاع حدود ۱۰ سانتیمتری رسیدند و سطح لایسیترها به طور یکنواخت و همگن پوشیده از چمن بود. در این حالت تبخیر - تعرق گیاه چمن معرف تبخیر - تعرق پتانسیل (ETo) در منطقه بود. پس

که دور آبیاری در این تحقیق در ابتدای کشت دو روزه بود و سپس متناسب با تکمیل مرحله ابتدایی رشد تا زمان استقرار کامل گیاه به صورت پلکانی به هفت روز افزایش یافت. برنامه آبیاری نیز در جدول (۴) مشاهده می‌شود.

در این رابطه؛  
 $ET_c = ET_o - \text{تبخیر} - \text{تعرق گیاه مرجع (میلیمتر در روز)}$ ،  $ET_c$ :  
 تبخیر - تعرق ذرت (میلیمتر در روز) و  $K_c$ : ضریب گیاهی (بدون بعد) می‌باشد.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (\text{رابطه ۱})$$

جدول ۳- ضرایب گیاهی مورد استفاده

مرحله رشد	ابتدایی	توسعه	میانی	انتهایی
طول دوره رشد (روز)	۲۵	۳۵	۴۰	۲۲
ضریب گیاهی	۰/۴۱ تا ۰/۶۸	۰/۶۲ تا ۱/۰۵	۱/۱۵ تا ۱	۱/۰۸ تا ۰/۶۶

جدول ۴- برنامه آبیاری

نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	عمق آبیاری (mm)
۱	۰۱/۰۵/۹۴	۵۰
۲	۰۳/۰۵/۹۴	۵۰
۳	۰۶/۰۵/۹۴	۳۰
۴	۱۰/۰۵/۹۴	۳۶
۵	۱۵/۰۵/۹۴	۳۶
۶	۲۱/۰۵/۹۴	۴۰
۷	۲۸/۰۵/۹۴	۵۰
۸	۰۴/۰۶/۹۴	۵۶
۹	۱۱/۰۶/۹۴	۶۰
۱۰	۱۸/۰۶/۹۴	۶۶
۱۱	۲۵/۰۶/۹۴	۷۲
۱۲	۰۱/۰۷/۹۴	۵۶
۱۳	۰۸/۰۷/۹۴	۴۸
۱۴	۱۵/۰۷/۹۴	۳۶
۱۵	۲۲/۰۷/۹۴	۳۰
۱۶	۲۹/۰۷/۹۴	۳۰
مجموع		۷۴۲

مدل AquaCrop (نسخه ۴)  
 مدل AquaCrop از معادله Doorenbos and Kassam (1979) (رابطه ۲) با تفکیک نمودن تبخیر-تعرق واقعی ( $E_t$ ) به تبخیر از سطح خاک ( $E_s$ ) و تعرق ( $T$ ) و مجزا نمودن عملکرد نهایی ( $Y$ ) به ماده خشک ( $B$ ) و شاخص برداشت ( $HI$ ) استنتاج شده است.

واقعی ( $kg/m^3$ )،  $ET_x$  تبخیر-تعرق حداکثر (mm)،  $ET_a$  تبخیر-تعرق واقعی (mm) و  $K_y$  فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر - تعرق می‌باشد. مدل AquaCrop برای محاسبه تعرق از رابطه (۳) استفاده می‌کند. عملکرد بیولوژیک گیاه یا زیست توده نیز با استفاده از تعرق و بهره‌وری آب گیاهی نرمال شده محاسبه می‌شود (رابطه ۴) و برای محاسبه عملکرد نیز رابطه (۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Steduto et al., 2007; Steduto et al., 2009).

$$Tr = (CC \times K_c) ET_o \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن:  $Y_x$  عملکرد بیشینه ( $kg/m^3$ )،  $Y_a$  عملکرد

این پارامترها با گذشت زمان، مدیریت، موقعیت جغرافیایی و اقلیم تغییرات قابل توجهی ندارند و تقریباً ثابت هستند. پارامتر-های مذکور در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده و در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند (Geerts *et al.*, 2009). از طرف دیگر پارامترهای گیاهی متغیر در شرایط مختلف مقادیری متفاوت داشته و مقادیر آنها تحت تأثیر اقلیم، مدیریت و ... می‌باشد. (Mohammadi *et al.*, 2015). مقادیر این پارامترها در طول فصل رشد ذرت برداشت و در جدول (۵) ارائه گردیده است. داده‌های مدیریتی مدل AquaCrop به دو بخش مدیریت آبیاری و مدیریت مزرعه‌ای تقسیم می‌شود. مدیریت آبیاری شامل اطلاعات مربوط به روش آبیاری، برنامه‌ریزی آبیاری و شوری‌های مختلف آب آبیاری می‌باشد. در این قسمت روش آبیاری سطحی انتخاب شد. اطلاعات مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری نیز مطابق با جدول (۴) به همراه شوری آب آبیاری به مدل معرفی گردید. مدیریت زراعی شامل اطلاعاتی همچون میزان حاصلخیزی خاک و نوع خاکپوش می‌باشد. در این بخش با توجه به تأمین نیاز کودی خاک لایسیمترها، درجه حاصلخیزی مزرعه، کامل و بدون محدودیت تعیین گردید. در تیمارهایی که از بقایای گیاهی استفاده شده بود نیز نوع خاکپوش، آلی (ارگانیک) انتخاب شد. به‌منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی سطح سایه‌انداز، از ابتدای فصل رشد تا رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه، به طور مرتب از پوشش سایه‌انداز ذرت عکسبرداری و برای تحلیل عکس‌ها و تعیین دقیق پوشش سایه‌انداز نیز از نرم افزار Green Crop Tracker استفاده شد. لازم به ذکر است جهت کاهش خطا باید سعی شود که تمام عکس‌برداری‌ها در طول دوره رشد، در شرایط یکسان انجام گرفته و جهت و فاصله دوربین تا پوشش سبز گیاه، باید برای همه اندازه‌گیری‌ها یکسان باشد (Liu *et al.*, 2013). در این تحقیق، عکس‌برداری، تقریباً هر دو هفته یکبار و رأس ساعت ۱۰ صبح انجام شد.

$$B = WP^* \times \sum \frac{Tr}{ET_o} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$Y = B \times HI \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط فوق، Tr تعرق (mm)، ET<sub>o</sub> تبخیر - تعرق (mm)، CC سطح سایه‌انداز (اعشار)، Kc ضریب تعرق (بدون بعد)، B زیست توده (kg/m<sup>2</sup>)، WP\* بهره‌وری آب نرمال شده (kg/m<sup>2</sup>)، و HI شاخص برداشت (بدون بعد) می‌باشد.

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی تأثیر تنش شوری بر مقدار زیست توده، گروهی از ضریب‌های تنش را که مبتنی بر توسعه سایه‌انداز و بسته شدن روزنه‌هاست در نظر می‌گیرد و برای شبیه‌سازی حرکت نمک در خاک، فرایندهای انتقال توده-ای و پخشیدگی را به کار می‌بندد. برای حرکت عمودی نمک در خاک به سمت پایین از روابط زهکشی، برای حرکت عمودی نمک به سمت بالا از روابط صعود موئینگی و تبخیر از سطح خاک و برای حرکت افقی نمک در خاک از روابط پخش آب استفاده می‌کند. مدل AquaCrop به چهار دسته داده ورودی شامل داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریتی نیاز دارد. داده-های اقلیمی شامل چهار بخش میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع روزانه، دمای حداکثر و حداقل روزانه، مقادیر بارندگی روزانه و میانگین سالیانه غلظت دی‌اکسید کربن می‌باشد. اطلاعات اقلیمی موردنیاز در طول فصل کشت از ایستگاه تحقیقات کشاورزی اهواز تهیه گردید. برای مقادیر تبخیر-تعرق مرجع نیز از مقادیر به‌دست آمده در لایسیمترهای چمن در طول دوره رشد استفاده شد. غلظت دی‌اکسید کربن با توجه به مقادیر محاسبه‌شده در مدل (اندازه‌گیری‌شده در رصدخانه مائونالوا در هاوایی از سال ۱۹۰۲ تا سال ۲۰۹۹) برابر با ۳۶۹/۴۷ قسمت در میلیون حجمی در نظر گرفته‌شد. داده‌های مربوط به گیاه به دو گروه پارامترهای گیاهی ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. پارامتر-های گیاهی ثابت برای بیشتر گیاهان زراعی (مانند گندم، جو، ذرت، پنبه و سویا) به صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارند.

جدول ۵- پارامترهای گیاهی متغیر برداشت شده طی مراحل مختلف رشد ذرت دانه‌ای

پارامتر	مقدار
پوشش سبز اولیه (درصد)	۰/۵
زمان شروع جوانه‌زنی (روز پس از کاشت)	۳
طول دوره جوانه‌زنی (روز)	۵
زمان شروع گلدهی (روز پس از کاشت)	۵۶
طول دوره گلدهی (روز)	۷
زمان رسیدن به حداکثر پوشش سایه‌انداز (روز پس از کاشت)	۵۶
زمان شروع دوره کاهش (روز پس از کاشت)	۸۲
زمان برداشت (روز پس از کاشت)	۱۲۲

## واسنجی مدل

برای واسنجی مدل از بین تیمارهای مختلف آزمایشی شش تیمار S3M3 و S3M2, S3M1, S1M3, S1M2, S1M1 انتخاب شد. دلیل انتخاب این تیمارها این بود که هر سه مدیریت زراعی و همچنین حد بالا و پایین شوری را شامل می‌شدند. تیمارهای باقی‌مانده نیز برای صحت سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. واسنجی با تعدیل پارامترهای گیاه و خاک برای به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی عملکرد، زیست توده، پوشش سایه‌انداز و شوری خاک صورت گرفت. به این منظور ابتدا پارامترهای انتقال املاح در خاک شامل فاکتور پخشیدگی املاح و حلالیت املاح به منظور حداقل نمودن اختلاف بین مقادیر شوری شبیه‌سازی و مشاهداتی تعدیل شد و پس از آن به تعدیل برخی پارامترهای گیاهی پیش‌فرض و ضرایب تنش شوری ( $f_{Cdecline}$ ,  $K_{SCCx}$ ,  $K_{Sexp, f}$ ) و  $K_{Ssto, salt}$  پرداخته شد. دلیل انتخاب این ضرایب در واسنجی مدل بررسی منابع مختلف و کارهای مشابهی بود که در شرایط شوری انجام شده بود (Mohammadi *et al.*, 2015; Khorsand *et al.*, 2014). در جدول (۶) مقادیر پارامترهای واسنجی شده ارائه گردیده است.

جدول ۶- مقادیر پارامترهای واسنجی شده برای مدل AquaCrop در کشت ذرت

پارامتر	واحد	مقدار
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)	%/day	۱۴/۵
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	%/day	۱/۱۰
بهره وری آب نرمال شده (WP*)	gr/cm <sup>2</sup>	۴/۳۰
حداکثر عمق ریشه مؤثر	m	۷۰
$K_{Sexp, f}$	-	۰/۷۸
$K_{SCCx}$	-	۰/۶۱
$f_{Cdecline}$	%/day	۰/۵۸
$K_{Ssto, salt}$	-	۰/۷۲
حد پایین شوری	dS/m	۲
حد بالای شوری	dS/m	۸
ضریب پخشیدگی کلی	%	۴۵
حلالیت املاح	gr/l	۱۰۰

## شاخص‌های ارزیابی مدل

در این پژوهش برای ارزیابی مدل، از ریشه میانگین مربعات خطای نرمال<sup>۱</sup> (NRMSE)، ضریب باقیمانده<sup>۲</sup> (CRM)، ضریب

تبیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ ) و ضریب خطای نسبی<sup>۴</sup> (RE) استفاده شد (Ebrahimi *et al.*, 2015; Hasan-Li *et al.*, 2015) استفاده شد.

$$NRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{O} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RE = \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آنها؛  $S_i$  مقادیر شبیه‌سازی شده شده توسط مدل،  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)،  $n$  تعداد مقادیر شبیه‌سازی شده یا اندازه‌گیری شده و  $\bar{O}$  مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده است. مقادیر NRMSE در بازه‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ مناسب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد نشان دهنده عدم کارا بودن مدل است. آماره CRM نشان دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآورد (مقادیر منفی) و کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است (Ebrahimi *et al.*, 2015).

## نتایج و بحث

### شوری خاک

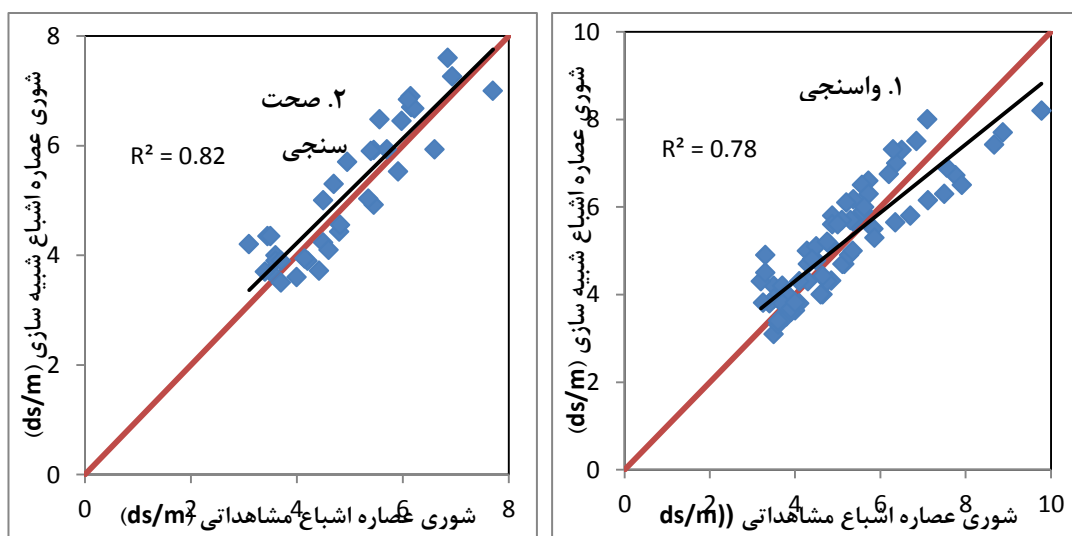
نتایج واسنجی مدل برای شبیه‌سازی شوری خاک در شکل (۲) ارائه شده است. همچنان که ملاحظه می‌شود ضریب تبیین  $R^2$  در مرحله واسنجی ۰/۷۸ به‌دست آمد. بنابراین می‌توان اظهار داشت که همبستگی نسبتاً خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شوری برقرار بود. با توجه به شکل مذکور در بیشتر موارد شوری عصاره اشباع پیش‌بینی شده توسط مدل AquaCrop بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود و عمده مقادیر شوری در بالای خط یک به یک قرار گرفتند که نشان از بیش‌برآوردی مدل است. شاخص‌های ارزیابی مدل در پیش‌بینی شوری خاک در مرحله واسنجی برای تیمارهای مختلف در

3- Coefficient of determination  
4- Relative Error

1- Normalize root mean square error  
2 - Coefficient of residual mass

شده است. در مطالعه Hasan-Li *et al.* (2015) مقدار ضریب تبیین و میانگین خطای نسبی در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۴ و ۲۴/۷ درصد و شاخص CRM نیز در این تحقیق مقداری منفی (۲۴/۳-) داشته و بیش‌برآورد مقادیر شوری گزارش شد. یافته‌های Golabi and Naseri (2015) نیز برای  $R^2$  و NRMSE به طور متوسط مقادیر ۰/۸۳ و ۷/۹ درصد را در صحت‌سنجی AquaCrop برای شوری نشان داد. محققین مذکور نیز بیش‌برآورد مقادیر شوری را اظهار داشته و مقدار متوسط شاخص CRM را برابر با ۰/۰۷- گزارش کردند. در نتایج ارائه شده توسط Mohammadi *et al.* (2015) مقدار متوسط NRMSE برای شوری در بازه ۲۰-۳۰ بوده و بیش‌برآورد مدل گزارش شد. در حالی‌که در تحقیقات Khorsand *et al.* (2014) کم‌برآورد مقادیر شوری گزارش شد و برای  $R^2$  و میانگین خطای نسبی به ترتیب مقادیر ۰/۵۴ و ۵۷/۴ درصد ارائه گردید. در تحقیق حاضر، میانگین خطای نسبی (۱۰/۶ درصد) نسبت به سایر مطالعات انجام شده مقدار بسیار کمتری داشت و در سایر شاخص‌ها نیز تفاوت چندانی نبود. به نظر می‌رسد واسنجی دقیق مدل از نظر پارامترهای انتقال املاح در خاک یکی از دلایل افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی شوری در این تحقیق باشد. اما به طور کلی یکی از دلایل ایجاد خطا در شبیه‌سازی شوری می‌تواند معادلات حاکم بر پدیده انتقال املاح باشد. چرا که عوامل مختلفی مانند انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح و تخریب املاح بر انتقال املاح در نیرمخ خاک مؤثرند. در حالی‌که در مدل AquaCrop فقط فرایندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته شده است (Hasan-Li *et al.*, 2015).

جدول (۶) ارائه شده است. مطابق با این جدول، شاخص CRM در شوری S1 و S3 نزدیک به صفر و به ترتیب مقادیری منفی و مثبت داشتند که گویای بیش‌برآورد و کم‌برآورد ناچیز مدل به- ترتیب در شوری‌های سطوح پایین و بالا می‌باشد. هرچند متوسط این شاخص (۰/۰۲-) مقداری منفی داشته و بیش‌برآورد کلی مدل را تأیید می‌کند. آماره NRMSE نیز برای همه تیمارها در محدوده ۲۰-۱۰ درصد است که نشان از کارایی مناسب مدل می‌باشد. به طور کلی با افزایش شوری درصد خطای پیش‌بینی نسبتاً افزایش یافت و بیشترین و کمترین خطای نسبی مدل به ترتیب در تیمارهای S3M1 (۱۳/۴ درصد) و S1M1 (۸/۷ درصد) به‌دست آمد. برای اعتبارسنجی مدل سه تیمار S2M2، S2M1 و S2M3 انتخاب و مقادیر شوری حاصل از شبیه‌سازی براساس شاخص‌های آماری با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. مطابق با شکل (۲)، ضریب تبیین  $R^2$  در مرحله اعتبارسنجی به میزان ۰/۸۲ به‌دست آمد که نشان از همبستگی خوب مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده دارد. باتوجه به جدول (۷) مقدار متوسط CRM و NRMSE به ترتیب ۰/۰۴- و ۱۱/۶۴ درصد به- دست آمد که گویای وضعیت مناسب مدل در پیش‌بینی همراه با اندکی بیش‌برآورد است. بررسی میزان خطای نسبی در این مرحله نشان می‌دهد که مدل در شرایط اعمال روش‌های مدیریت زراعی با دقت بیشتری شوری را شبیه‌سازی می‌کند به طوری‌که خطای نسبی در شوری S2 و در مدیریت‌های M2 و M3 نسبت به M1 کاهش یافته و دقت مدل در شرایط اختلاط بقایا با خاک بیشتر از استفاده از بقایا به صورت خاکپوش بود. در خصوص شبیه‌سازی شوری خاک با مدل AquaCrop با توجه به جدید بودن این قابلیت در نسخه اخیر، مطالعات محدودی انجام



شکل ۲- همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شوری خاک



جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری برای شوری در مرحله واسنجی

تیمار	NRMSE	CRM	RE
S1M1	۱۰/۲۷	-۰/۰۵	۸/۷
S1M2	۱۳/۶۸	-۰/۰۶	۱۲/۴
S1M3	۹/۹۴	-۰/۰۶	۹/۱
S3M1	۱۵/۲۷	۰/۰۱	۱۳/۴
S3M2	۱۴/۷۰	۰/۰۱	۱۲/۵
S3M3	۱۳/۶۰	۰/۰۶	۱۳/۱
میانگین	۱۲/۹۱	-۰/۰۲	۱۱/۵

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های آماری برای شوری در مرحله صحت‌سنجی

تیمار	NRMSE	CRM	RE
S2M1	۱۴/۰۲	-۰/۰۷	۱۲/۷
S2M2	۱۰/۸۰	-۰/۰۲	۱۰/۴
S2M3	۱۰/۱	-۰/۰۳	۸/۸
میانگین	۱۱/۶۴	-۰/۰۴	۱۰/۶

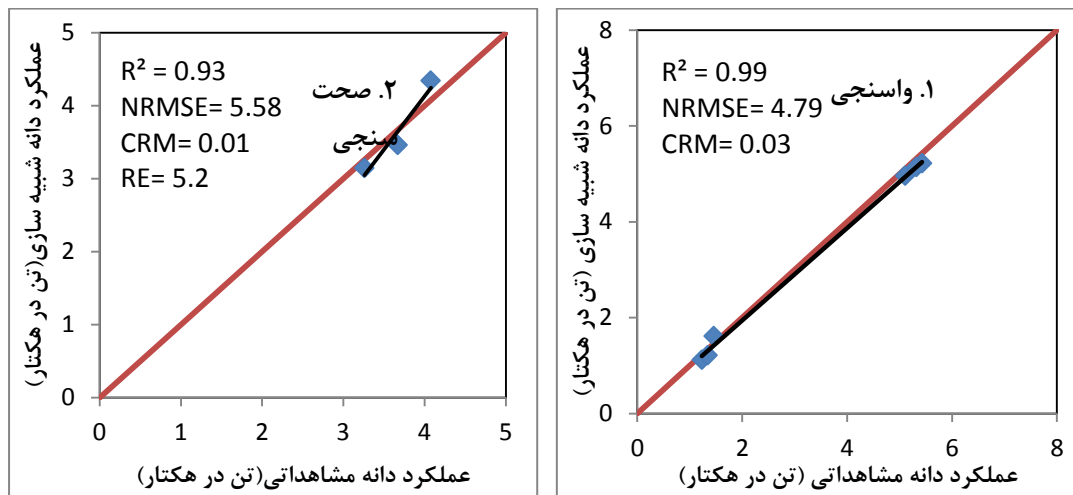
#### عملکرد دانه و زیست توده

نتایج حاصل از واسنجی مدل برای عملکرد و زیست توده در شکل‌های (۳ و ۴) ارائه شده است. ضریب تبیین حاصل از واسنجی مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست توده ۰/۹۹ به دست آمد. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود عمده مقادیر عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب پایین و بالای خط یک به یک قرار دارد، همچنین مقدار شاخص CRM برای عملکرد دانه و زیست توده نزدیک به صفر و به ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۱ بود. لذا می‌توان اظهار داشت که مدل برای عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب کم‌برآورد و بیش‌برآورد جزئی داشت. مقدار شاخص NRMSE برای پارامترهای مورد بررسی در بازه ۱۰-۰ قرار دارد که نشان دهنده وضعیت ایده‌آل مدل می‌باشد. همان‌طور که از جدول (۸) مشخص است با افزایش شوری دقت مدل در شبیه‌سازی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است که این امر نیز مؤید تحقیقات قبلی است (Kumar et al., 2014). مطابق با جدول (۸)، حداکثر خطای نسبی در شبیه‌سازی عملکرد و زیست توده به ترتیب ۱۰/۵ و ۱۳/۱ درصد است که در تیمار S3M2 و حداقل آن به ترتیب ۲/۹ و ۲/۲ درصد است که در تیمار S1M1 به دست آمد. همچنین متوسط خطای نسبی پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست توده در مرحله واسنجی به ترتیب ۶/۶ و ۷/۱ درصد به دست آمد. لذا می‌توان اظهار داشت که واسنجی مدل با دقت بالایی انجام شده است.

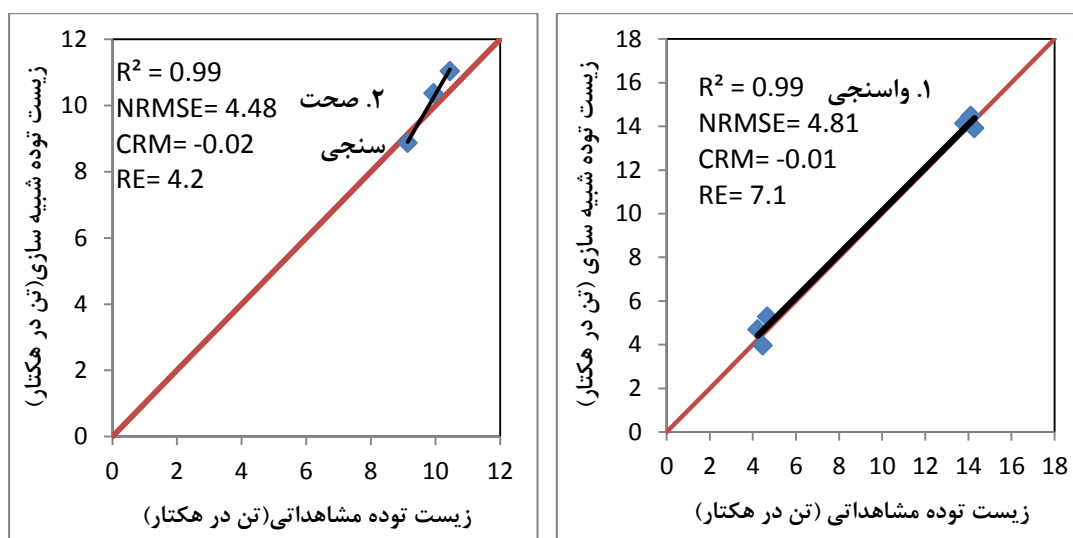
پس از واسنجی، مدل بدون تغییر برای تیمارهای S2M1، S2M2 و S2M3 اجرا و مقادیر شاخص‌های آماری در این مرحله ارائه گردید (شکل‌های ۳ و ۴). مطابق با نتایج ضریب تبیین حاصل از اعتبارسنجی مدل برای پیش‌بینی عملکرد و زیست توده به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۹ به دست آمد. مقدار شاخص CRM برای عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۰۲ به دست آمد که نشان دهنده کم‌برآورد و بیش‌برآورد ناچیز مدل می‌باشد. شاخص NRMSE برای پارامترهای مورد نظر کوچکتر از ۱۰ می‌باشد که گویای وضعیت ایده‌آل مدل است. همچنین متوسط خطای نسبی در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب برابر با ۵/۲ و ۴/۲ درصد شد و میزان خطا در شرایط اعمال مدیریت زراعی افزایش داشت (جدول ۸)، به طوری که حداکثر خطا ابتدا در مدیریت زراعی M2، سپس در مدیریت M3 و حداقل خطا در مدیریت M1 به دست آمد. در زمینه شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای، Hasan-Li et al. (2015) برای ضریب  $R^2$  و شاخص CRM به ترتیب مقادیر ۰/۷۳ و ۱۱/۸- و متوسط خطای را ۱۶/۳ درصد گزارش دادند. Golabi and Naseri (2015) نیز با ارائه مقدار ۰/۰۹- برای شاخص CRM بیش‌برآورد برای عملکرد نیشکر در شرایط شوری را همراه با ضریب تبیین ۰/۹۷ اثبات کردند. همچنین Mohammad et al. (2015) بیش‌برآورد و کم‌برآورد مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست توده گندم را گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر مغایرت دارد. علت این امر احتمالاً ناشی از

تحقیق حاضر عمدتاً مؤید یافته‌های قبلی است و در این پژوهش مدل با دقت بسیار بالاتر به پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط شوری پرداخته است.

وجود اثر توأم تنش آبی و شوری در تحقیق مذکور می‌باشد. به طور کلی بررسی مقادیر شاخص‌های آماری در تحقیق حاضر و مقایسه آنها با نتایج سایر تحقیقات نشان می‌دهد که نتایج



شکل ۳- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی عملکرد دانه



شکل ۴- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی زیست توده

جدول ۸- مقادیر خطای نسبی برای عملکرد دانه و زیست توده در مرحله واسنجی

خطای نسبی پیش‌بینی زیست توده (درصد)	خطای نسبی پیش‌بینی عملکرد دانه (درصد)	تیمار
۲/۲	۲/۹	S1M1
۲/۷	۳/۹	S1M2
۲/۵	۳/۴	S1M3
۱۰/۶	۸/۹	S3M1
۱۳/۱	۱۰/۵	S3M2
۱۱/۴	۹/۷	S3M3
۳/۱	۳/۵	S2M1
۵/۵	۶/۴	S2M2
۴/۱	۵/۷	S2M3

واسنجی

صحت‌سنجی

پوشش سایه‌انداز<sup>۱</sup>

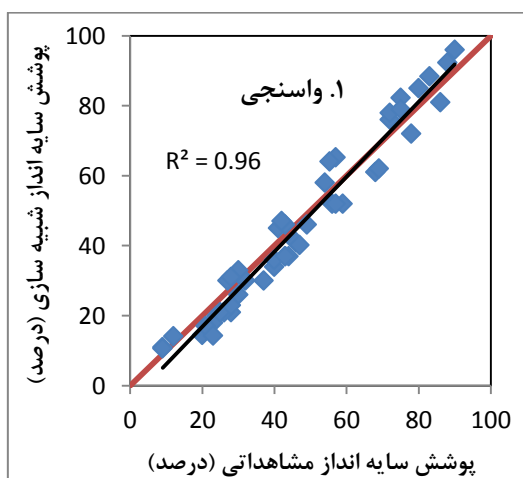
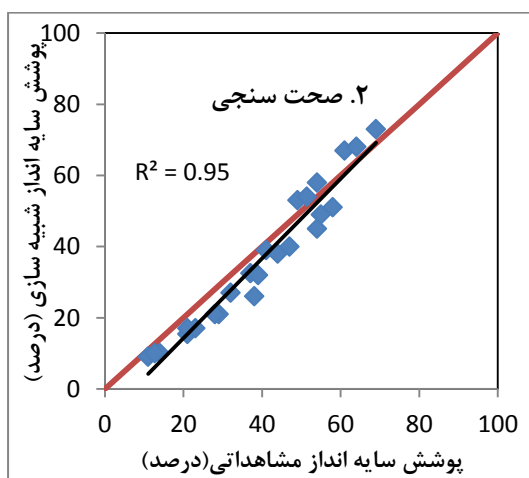
مقادیر پیش‌بینی شده پوشش سایه انداز در مقابل مقادیر اندازه-گیری شده همراه با خط یک به یک برای تیمارهای واسنجی در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب تبیین برای مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۰/۹۶ می‌باشد که نشانه‌ای از همبستگی خوب این دو سری از مقادیر است. باتوجه به جدول (۹) شاخص NRMSE برای همه تیمارها در بازه ۲۰-۰ قرار دارد که گویای وضعیت مناسب مدل در شبیه‌سازی پوشش سایه‌انداز است. مقدار ضریب CRM برای همه تیمارها به جز تیمار SIM2 مقداری مثبت و نزدیک به صفر داشته که نشان دهنده کم‌برآورد جزئی مدل می‌باشد. متوسط خطای نسبی در این مرحله ۱۳ درصد بود. بررسی مقادیر خطای نسبی در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شوری، دقت مدل کاهش یافته و بیشترین و کمترین میزان خطا به ترتیب در تیمارهای S3M1 و SIM3 به‌دست آمد.

مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی پوشش سایه‌انداز برای تیمارهای مختلف در مرحله اعتبارسنجی در شکل (۵) ملاحظه می‌شود. نزدیک بودن ضریب  $R^2$  (۰/۹۷) به یک نشان-دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی و پراکندگی ناچیز آنها حول خط یک به یک می‌باشد. متوسط شاخص NRMSE در این مرحله نیز در دامنه ۲۰-۱۰ است (جدول ۱۰) ، لذا می‌توان اظهار داشت که براساس این آماره مدل‌سازی پوشش سایه‌انداز در این مرحله مناسب است. مقدار متوسط شاخص CRM به میزان ۰/۰۸ به‌دست آمد که نشان می‌دهد که مدل کمی تمایل به کم‌برآورد دارد. مطابق با نتایج، متوسط

خطای نسبی برابر با ۱۶ درصد بود. این نتایج مؤید یافته‌های Ebrahimi *et al.* (2015) بوده و باتوجه به کمتر بودن شاخص-های آماری در تحقیق حاضر می‌توان اظهار داشت که خطای شبیه‌سازی در این پژوهش کاهش یافته است. مدل در شرایط اعمال روش‌های مدیریت زراعی، پوشش سبز را با دقت بیشتری برآورد کرده و خطای شبیه‌سازی در دو روش مدیریت زراعی اختلاف بسیار کمی با هم دارند. مهمترین دلیل کاهش دقت مدل در برآورد پوشش سایه‌انداز نسبت به سایر پارامترهای مورد بررسی را می‌توان ناشی از آن دانست که برای محاسبه میزان پوشش سایه انداز از روش عکس‌برداری و برای تحلیل عکس‌ها از نرم‌افزارهای مربوطه استفاده شد، که خود می‌تواند خطاهایی به همراه داشته باشد. علاوه بر این عکس‌برداری در طول فصل باید در شرایط یکسانی انجام شود که این امر نیز سبب ایجاد خطا می‌شود. لذا با لحاظ کلیه منابع خطای موجود و بررسی شاخص‌های آماری می‌توان اظهار داشت که مدل از دقت نسبتاً خوبی در پیش‌بینی پوشش سایه‌انداز برخوردار می‌باشد.

جدول ۹- مقادیر شاخص‌های آماری برای پوشش سایه‌انداز در مرحله وا-سنجی

تیمار	NRMSE	CRM	RE
S1M1	۹/۷۶	۰/۰۶	۱۱/۹
S1M2	۱۰/۰۰	-۰/۰۰۴	۱۱/۳
S1M3	۹/۳۹	۰/۰۲	۱۰/۷
S3M1	۱۴/۷۲	۰/۰۴	۱۵/۹
S3M2	۱۴/۴۵	۰/۰۴	۱۴/۲
S3M3	۱۳/۳۱	۰/۰۲	۱۴/۰
میانگین	۱۱/۹۲	۰/۰۳	۱۳/۰



شکل ۵- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی پوشش سایه‌انداز

جدول ۱۰- مقادیر شاخص‌های آماری برای پوشش سایه‌انداز در مرحله

صحت‌سنجی			
RE	CRM	NRMSE	تیمار
۱۸/۸	۰/۱۰	۱۸/۷۸	S2M1
۱۴/۴	۰/۰۷	۱۲/۱۵	S2M2
۱۴/۹	۰/۰۸	۱۳/۱۹	S2M3
۱۶/۰	۰/۰۸	۱۴/۷۱	میانگین

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل AquaCrop تحت شرایط مختلف مدیریت زراعی و آبیاری با آب‌شور برای گیاه ذرت مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور شبیه‌سازی اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای با مدل AquaCrop، واسنجی مدل روی شوری خاک، عملکرد دانه، زیست توده و پوشش سایه‌انداز صورت گرفت. در نتیجه این فرآیند همبستگی بالایی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای

شوری خاک، عملکرد دانه، زیست توده و پوشش سایه‌انداز به‌ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۷۸، ۰/۹۹، ۰/۹۹ و ۰/۹۶ به‌دست آمد و با افزایش شوری دقت مدل در شبیه‌سازی کلیه پارامتر-های مورد بررسی کاهش یافت. نتایج صحت‌سنجی مدل نشان دارد که مدل قادر است عملکرد دانه (۵/۲ درصد) و زیست توده (۴/۲ درصد) را با خطای کمتری نسبت به شوری خاک (۱۰/۶ درصد) و پوشش سایه‌انداز (۱۶ درصد) شبیه‌سازی کند. همچنین بررسی روند نتایج نشان داد که مدل در شرایط اعمال مدیریت زراعی شوری عصاره اشباع خاک و پوشش سایه‌انداز را با دقت بیشتر و عملکرد دانه و زیست توده را با دقت کمتری پیش‌بینی می‌کند. در مجموع نتایج به‌دست‌آمده حاکی از توانایی و کارایی نسبتاً بالای مدل در شبیه‌سازی شوری، عملکرد دانه، زیست توده و پوشش سایه‌انداز در شرایط مختلف مدیریت زراعی و آبیاری با آب شور است.

## REFERENCES

- Bezbordove, G. A., Shadmanov, D. K., Mirhashimov, R. T., Yuldashev, T. A., Qureshi, S., Noble, A. D. and Qadir, M. (2010). Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia. *Journal of Agriculture, ecosystems and environment*, 138: 95- 102.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper*, No. 33. FAO, Rome.
- Droogers, P. and Kite, G. (2001). Simulation modeling at different scales to evaluated the productivity of water. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 26(12), 877-880.
- Ebrahimi, M., Rezaverdinezhad, V. and Majnoui Haris, A. (2015). Simulation of Maize growth under different management of water and Nitrogen with AquaCrop model. *Journal of Water and Soil Research in Agriculture*, 46(2), 207-220. (In Farsi)
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J. A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V. and Steduto, P. (2009). Simulating yield response of Quania to water availability with AquaCrop. *Journal of Agronomy*, 101: 499- 508.
- Gholami, A. R. and Pirmoradian, N. (2011). Calibration of a simple model (VSM) for yield prediction of Corn under different water and nitrogen managements. *Journal of Water and Soil*, 25 (2), 258-265. (In Farsi)
- Golabi, M. and Naseri, A. A. (2015). Evaluation of AquaCrop model in predicting of Sugarcane yield and soil profile salinity under salinity stress. *Journal of Water and Soil Research in Agriculture*, 46(4), 685-694. (In Farsi)
- Hasan-Li, M., Afrasiab, P. and Ebrahimian, H. (2015). Field assessment and performance of SALTMED and AquaCrop models in the alternative irrigation management with saline and fresh water. *Journal of Water and Soil Research in Agriculture*, 46(3), 487-498. (In Farsi)
- Khorsand, A., Rezaverdinezhad, V. and Shahidi, A. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting of Wheat yield, soil profile moisture and salinity under salinity and water stress. *Journal of Water and Irrigation Management*, 4(1), 89-104. (In Farsi)
- Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D. K. and Parihar, S. S. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting Wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes. *Journal of Irrigation and Drainage*, 63, 474- 487.
- Liaghat, A. and Esmaili, Sh. (2003). The effect of fresh and saline water conjunction on Corn yield and salt concentration in the root zone. *Journal of Agriculture science and Natural Resource*, 10 (2), 159- 170. (In Farsi)
- Liu, J., Pattey, E. and Admiral, S. (2013). Assessment of in situ crop LAI measurement using unidirectional view digital photography. *Journal of Agricultural and Foresteteorology*, 169:25-34.
- Mohammadi, M., Davari, K., Ghahraman, B., Ansari, H. and Haghverdi, A. (2015). Calibration and validation of AquaCrop model for simulation of spring Wheat under salinity and water stress. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 277-295. (In Farsi)
- Nasrolahi, A. H. (2013). The study on effect of drip irrigation different managements with saline water on Corn yield and salt distribution in root zone. Ph. D. dissertation, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Farsi)

- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. (2012). Reference manual AquaCrop, FAO, *Land and Water Division*, Rome, Italy.
- Soltani-Mohammadi, A., Kashkouli, H. A., Naderi, A. and Boroomand-Nasab, S. (2011). The effect of all water and salinity stress on yield and yield components of Maize at different growth stages in Ahvaz conditions. *Journal of Water Research in Agriculture*, 9, 161- 170. (In Farsi)
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Ferres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Journal of Irrigation Science*, 25, 189- 207.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Ferres, E. (2009). AquaCrop- the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy*, 101, 426- 437.
- Tishehzan, P. (2011). Investigate the root zone salinity changes under the water table condition and the use of mulch in the appeal stage of Palm. Ph. D. dissertation, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (In Farsi)
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi-Saab, M., Stockle, C. and Steduto, P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of Sunflower growth under different water regimes. *Journal of Agronomy*, 101: 509- 521.
- Zhao, Y., Pang, H., Wang, J., Huo, L. and Li, Y. (2014). Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to Sunflower growth and yield. *Journal of Field crop research*, 161, 16- 25.