نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۵، ص. ۱۴۳۹-۱۴۲۶

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 5, Nov.-Dec. 2016, p. 1426-1439

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت (*Zea mays* L) تحت شرایط تنش شوری

آیدا مهر آذر[۱]- جابر سلطانی*[۲]- امید رحمتی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی، به دلیل ارائه تاثیرات کیفی وکمی آب بر عملکرد محصول، ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه هستند.به همین منظور، در این طرح به ارزیابی مدل *AquaCrop* و بررسی دقت آن در شبیه‌سازی عملکرد محصول ذرت (*Zea ma ys L*) تحت تاثیر تنش شوری پرداخته شد. واسنجی مدل از طریق مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعات صحرایی و نتایج شبیه‌سازی شده در مدل انجام شد. این آزمایش در قالب بلوک‌های کاملا تصادفی با پنج سطح شوری آب آبیاری شامل ۰، ۴/۵۳، ۹/۰۶، ۱۳/۵۹ و ۱۸/۱۳ دسی زیمنس بر متر و چهار تکرار در دو زمان نمونه‌برداری در منطقه کرج اجرا شد. نتایج حاصل از مدل *AquaCrop* و مقایسه میانگین با روش چند دامنه‌ای دانکن و تجزیه واریانس داده‌ها در نرم‌افزار *SAS ver 9.1* نشان داد که تنش شوری اثر بسیار معنی‌داری بر روی تمام صفات مورد اندازه‌گیری داشته به طوری که با افزایش تنش‌های شوری، کلیه صفات کاهش معنی‌داری پیدا کردند. نتایج شاخص‌های آماری نشان دادند که مدل *AquaCrop* در پیش‌بینی عملکرد ذرت تحت تاثیر تنش شوری دقت مناسبی دارد. طبق شاخص آماری *CRM*، مدل *AquaCrop* در پیش بینی عملکرد ذرت تحت تاثیر تنش شوری نسبت به عملکرد اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه بیش‌برآورد داردو با افزایش میزان شوری خطای شبیه‌سازی عملکرد تحت تنش شوری بیشتر می‌شود. بیشترین و کمترین میزان خطابه ترتیب متعلق به تیمار ۱۸/۱۳ و ۰ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد و با گذشت زمان در برداشت دوم نیز همین روند ادامه یافته است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل آماری، شوری آب، عملکرد محصول، مدل‌سازی، مدیریت مصرف آب

مقدمه

ذرت از جمله غلات مهم و با ارزش مناطق گرمسیر و معتدل جهان است. ذرت (*Zea mays L*) از نظر تولید سومین غله مهم محسوب می‌شود (۳). طبق گزارش فائو ۲۰۰۵، ذرت از جمله گیاهان زراعی مهم در ایران به شمار می‌رود که تولید ۲/۸ درصد از غلات را به خود اختصاص داده است. تنش‌های زیستی وغیر زیستی باعث خسارت به محصولات زراعی می‌شوند. در بین این تنش‌ها، تنش شوری،بیش از سایر تنش‌ها، از طریق کاهش پتانسیل اسمزی و اختلال در جذب برخی عناصر غذایی، رشد،عملکرد و تولیدات گیاهان را تحت تاثیر قرار می‌دهند (۷). شوری آب و خاک‌های زراعی از جمله عواملی هستند که مانع دستیابی به عملکرد مطلوب گیاهان زراعی می‌شوند، به گونه‌ای که براساس گزارش فائو (*FAO 2008*) در مناطق شور، این مساله سبب کاهش ۱۰ الی ۶۰ درصدی عملکرد گیاهان زراعی شده است (۱۲). حساسیت گیاهان به شوری بسته به نوع گیاه، مراحل نموی گیاه، شدت ومدت تنش دارد (۲۱). آستانه کاهش محصول در اثر شوری در گیاهذرت ۸ دسی زیمنس بر متر گزارش شده است (۲۲). اکر و کومرتپای (۱۰)، میزان تولید ماده خشک را در ۱۹ واریته ذرت مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که با افزایش غلظت نمک، تولید ماده خشک در واریته‌های ذرت بطرز چشمگیری کاهش می‌یابد.بلانکو وهمکاران (۵)، اثر آبیاری با آب شور بین ۰/۳ تا ۴/۵ دسی زیمنس بر متر را بر رشد و تولید ذرت بررسی و مشاهده کردند که وزن خشک تولید شده با افزایش شوری آب کاهش می‌یابد (۲۸). آزمایش‌های مزرعه‌ای محدودیت‌های دارند،به منظور کاهش آزمایش‌های صحرایی پرهزینه و زمان‌بر، استفاده از نرم‌افزارها،گزینه‌های بسیار مناسبی است (۱۴ و ۸). یک مزیت مهم مدل‌ها نیز این است که اجازه‌ی توسعه یافته‌ها و نتایج را برای شرایط آزمایش نشده در مزرعه فراهم می‌آورند (۴ و ۱۹).هدف اصلی مدل‌های گیاهی، کاربرد آن به عنوان ابزاری تحلیلی برای مطالعه‌ی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
(*-نویسنده مسئول: (Email: jsoltani@ut.ac.ir

اثر مدیریت سیستم‌های کشت بر عملکرد محصول است (۱۷). برای تعیین مدیریت بهینه ابیاری و تاثیر تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر عملکرد محصول، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار مناسب تدوین شده‌اند. در صورتی که این مدل‌های ساده به درستی واسنجی و صحت‌یابی شوند، می‌توانند جهت برآورد عملکرد مورد انتظار محصول، برنامه‌ریزی آبیاری، ارزیابی سناریوهای مدیریت آبیاری و بررسی اثرات دراز مدت تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر عملکرد محصول، شوری خاک ، تبخیر–تعرق، رواناب سطحی و نفوذ عمقی استفاده نمود (۹ و ۲۹). محققان در چند دهه اخیر مدل‌های مختلفی را به منظور شبیه‌سازی رشد گیاه، حرکت وانتقال آب و املاح در خاک معرفی کرده‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به *Budget*، *CROPWAT*، *CERES*، *CropSyst*، *WOFOST*، *SWAP* و *CRPSM* اشاره کرد که هر کدام ممکن است به جهاتی مزیت‌هایی بر دیگر مدل‌ها داشته باشد (۱۷ و ۱۸).

یکی از مدل‌های تخمین عملکرد محصول *AquaCrop* است که در سال ۲۰۰۷ توسط فائو (سازمان خوار بار و کشاورزی جهان) توسعه یافته است (۲۷) ودرحال حاضر از جدیدترین وپرکاربردترین مدل‌های رشد گیاهی است که در این تحقیق نیز مدنظر قرار گرفت (۱۷). *AquaCrop* مدلی فراگیر است، به این معنا که برای محدوده‌ی وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای،سبزیجات، غلات، میوه‌ها و محصولات روغنی و غده‌ای می‌تواند به کار گرفته شود (۲۷). نظریه پایه‌ای مدل *CropWat* (۱۹) و مدل *Budget* (۲۵) (نشریه ۳۳ فائو و معادله بیلان جرمی آب)، پیکربندی و الگوریتم آن‌ها بسیار مشابه با مدل *AquaCrop* می‌باشند. تنها فرق بین آن‌ها این است که مدل*AquaCrop* از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است والگوریتم اصلی به کار رفته در مدل توسط رئیس وهمکاران (۲۶) ارائه شده است (۴). مدل *AquaCrop* با حفظ قابلیت‌های نشریه‌ی ۳۳ فائو، برنامه‌ای ساده و دقیق است که اصول اساسی آن برای شبیه‌سازی به وسیله‌ی استدیوتو وهمکاران (۲۹) و الگوریتم مورد استفاده در مدل، به وسیله‌ی راس و همکاران (۲۶) ارئه شده است (۱۴). نسخه‌ی اولیه مدل در سال ۲۰۰۷ و برای شبیه‌سازی عملکرد محصول و حرکت آب در خاک، معرفی شد که در آن تاثیر تنش شوری، بر عملکرد محصول در نظر نگرفته شد (۲۷). در نسخه ۴ که در سال ۲۰۱۲ معرفی شد، مدل اصلاح و تاثیر تنش شوری وشبیه‌سازی انتقال املاح در نیمرخ خاک نیز مدنظر قرارگرفت (۲۷). مدل *AquaCrop* بر اساس یک گام زمانی بلند مدت براساس نشریه بازنگری شده ۳۳ فائو عمل می‌کند. این مدل از طریق تفکیک سهم مولد تولید یعنی تعرق از تبخیر و تعرق و میزان بیوماس تولیدی و به واسطه شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب (تعرق) و عملکرد محصول را در گام‌های زمانی روزانه برآورد می‌کند (۴ و ۲۹). مدل*Aquacrop* را می‌توان به عنوان ابزاری جهت ارزیابی تنش آبی و میزان محصول در منطقه، ارزیابی محصول کشت دیم در طولانی مدت،برنامه‌ریزی کم‌آبیاری وآبیاری با آب شور وآبیاری تکمیلی و.... به کار برد (۱۴). بنابراین قابلیت بررسی روند تولید، تحت گزاره‌های مختلف از جمله تنش شوری را دارد.سادگی، نیاز به حداقل داده ورودی و دقت قابل قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد (۴). خرسند وهمکاران (۱۷) به ارزیابی عملکرد مدل *AquaCrop* در پیش‌بینی عملکرد گندم زمستانه (ارقام روشن و قدس)، رطوبت و شوری نیمرخ خاک، تحت تنش شوری و کم‌آبی پرداختند. آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح شوری آب آبیاری شامل ۱/۴ و ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر و چهار عمق آبیاری با سه تکرار در منطقه بیرجند انجام شد. براساس نتایج، در مدل *AquaCrop* مقدار خطای نرمال شده‌ی پیش‌بینی عملکرد، کمتر از ۱۰ درصد به دست آمده است بنابراین مدل *AquaCrop* عملکرد دانه را برای هر دو رقم با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. مدل *AquaCrop* مقدار رطوبت رابا دقت نسبتا مناسب پیش‌بینی کرد.همچنین نتایج نشان داد که مدل *AquaCrop* در پیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع در مقایسه با رطوبت خاک و عملکرد دانه دچار خطای بیشتری است (۱۷). هنگ و همکاران (۱۳)، مدل *AquaCrop* را برای ذرت در سه منطقه با شرایط کاملا متفاوت در*Zaragoza* اسپانیا (شرایط نیمه‌خشک)، *Bushland* تکزاس آمریکا (باد شدید و تبخیر و تعرق بالا) و *Gainesville* فلوریدای آمریکا (آب وهوای بارانی و خاک شنی) واسنجی و اعتباریابی نمودند. نتایج نشان داد که مدل *AquaCrop* قادر است به صورت قابل قبول آب مصرفی گیاه را تحت شرایط تبخیر و تعرق و باد زیاد شبیه‌سازی نماید به علاوه مدل *AquaCrop* رشد بیوماس، عملکرد دانه و پوشش گیاهی از سطح بالا تحت شرایط بدون تنش آبی و یا تیمارهای با تنش‌های آبی متوسط به صورت رضایت‌بخش شبیه‌سازی می‌کند اما مدل *AquaCrop* برای تیمارهای با تنش آبی شدید مخصوصا وقتی تنش آبی طی مراحل حساس رشد گیاه اتفاق بیفتد نمی‌تواند این پارامترها را به صورت رضایت‌بخش شبیه‌سازی نماید.همچنین اظهار کردند که سهولت استفاده از مدل *AquaCrop*، نیاز به پارامترهای ورودی کم و درحه کافی دقت شبیه‌سازی سبب می‌شود این مدل یک ابزار ارزشمند برای براورد بهره‌وری آب تحت سناریوهای مختلف آبیاری و تحت استراتژی‌های مختلف مدیریت آب در سطح مزرعه برای بهبود شاخص کارایی مصرف آب باشد. آیکیوبال و همکاران (۱۶)، به منظور بررسی عملکرد مدل*AquaCrop* برای گندم زمستانه، مطالعه‌ای در دشت شمالی چین انجام دادند و آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه لانچنگ در سال‌های ۱۹۹۸–۲۰۰۱ تحت کم‌آبیاری اجرا شد و مدل *AquaCrop* با بخشی از تیمارها، واسنجی و با دسته دیگر

اعتبارسنجی شد. مدل *AquaCrop* با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی عملکرد دانه و با در نظر گرفتن شرایط واقعی مزرعه در سال‌های ۱۹۹۰ تا۲۰۱۰ مورد اعتبارسنجی مجدد قرار گرفت. به طور کلی در اعتبارسنجی مدل، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ۰/۵۸ تن در هکتار، بیوماس ۰/۸۷ تن در هکتار، تبخیر وتعرق واقعی ۳۳/۲ میلی‌متر و رطوبت حجمی خاک ۲۴/۵-۳۷/۶ میلی‌متر بود.نتایج کلی براساس اعتبارسنجی و اعتبارسنجی مجدد نشان داد که *AquaCrop*، مدلی معتبر است و می‌توان با درجه‌ی قابل اطمینان از دقت و صحت مدل برای بهینه‌سازی تولید عملکرد دانه‌ی گندم زمستانه و نیاز آبی در دشت شمالی چین استفاده کرد. در نهایت محققان به این نتیجه رسیدند که مدل *AquaCrop* ابزاری توانمند در شبیه‌سازی عملکرد محصول در شرایط مختلف می‌باشد. با توجه به محدودیت منابع آبی و روند رو به رشد شوری آن که باعث کاهش کیفیت منابع اب و خاک و در نتیجه کاهش تولید می‌شود، استفاده از آبهای شور از راهبردهای مدیریتی برای تعدیل خشکسالی و بحران آب محسوب شده و از اولویت خاصی برخوردار است (۲۸). از طرفی با توجه به این‌که دراکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب با کاهش کیفیت آب از نظر شوری همراه است بنابراین بررسی عملکرد محصولات مختلف در شرایط تنش شوری ضرورت داردتا در شرایط مواجهه با کمبود منابع آب و تواما کاهش کیفیت آبتوان برنامه‌ی مناسبی برای آبیاری محصولات (کم‌آبیاری وآبیاری با آب شور وآبیاری تکمیلی و...) طرح‌ریزی کرد.بیشتر تحقیقات گذشته در زمینه *AquaCrop*، در وضعیت بدون شوری منابع آب و خاک و عمدتا برای شبیه‌سازی کم‌آبیاری و عملکرد محصول صورت گرفته است (۲۴). به همین منظورهدف ازاین مطالعه بررسی عملکرد مدل *AquaCrop* در شرایط تنش شوری می‌باشد. به منظورارزیابی مدل *Aquacrop* در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تنش شوری در منطقه کرج از شاخص‌های آماری مختلف استفاده شد و همچنین بررسی اثر تنش شوری بر عملکرد و برخی صفات زراعی و فیزیولوژیکی هیبرید ذرت و رشد گیاهچه ذرت تحت سطوح مختلف پتانسیل اسمزی ایجاد شده از طریق محلول *NaCl* توسط نرم افزار *SAS ver 9.1* انجام شد. سپس نتایج حاصله از عملکرد ذرت تحت تنش شوری در مدل *AquaCrop* و نتایج اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه توسط شاخص‌های آماری و تجزیه تحلیل آماری با *SAS ver 9.1* انجام و باهم مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

این آزمایش در سال زراعی۹۰-۱۳۸۹در منطقه کرج با عرض و طول جغرافیایی ۳۵/۵۵ درجه‌ی شمالی و ۵۰/۵۴ درجه‌ی شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲/۵ متربر روی بذر هیبرید ذرت (*Zea ma ys L*) در یک خاک ماسه‌ای یکدست به منظور بررسی تنش شوری روی عملکرد ذرت انجام گرفت. کشت گیاهان در ۲۴۰ لایسیمتر انجام شد. قطر دهانه‌ی لایسمترها ۰/۱۵ مترو عمق لایسیمترها ۱ متر است. بذر هیبرید ذرت (*Zea ma ys L*) مورد استفاده در این آزمایش از موسسه اصلاح نهال و بذر تهیه گردیدند. برای اطلاعات اقلیمی مورد نیاز از داده‌های روزانه‌ی ایستگاه سینوپتیک کرج استفاده شد. تبخیر وتعرق مرجع نیز براساس روش فائو پنمن مانتیث و با استفاده از نرم‌افزار *ETCalculator* محاسبه شد و به همین ترتیب نیاز آبیاری ذرت محاسبه شد (۲). بذرها در عمق ۵ سانتی‌متری در داخل لایسیمترهاکشت شدند پس از کشت بذرها در خاک ماسه‌ای یک لایه نازک کود دامی روی آن ریخته شد. روش کاشت به صورت دستی، در داخل لایسمترهای موجود در پنج ردیف با فاصله ۷۵ سانتی‌متر اجرا شد. فاصله لایسمترها در هر ردیف۳۰سانتی‌متر می‌باشد. تراکم کشت ۶۶۶۶۷ بوته در هکتار می‌باشد. این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملا تصادفی با پنج تیمار و چهار تکرار در دوزمان متوالی طی سال زراعی ۹۰-۱۳۸۹ اجرا گردید. تیمارها شامل ۵ سطح شوری آب آبیاری (قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک) شامل S_1، S_2، S_3، S_4، S_5 به ترتیب برابر با ۰، ۴/۵۳، ۹/۰۶، ۱۳/۵۹ و ۱۸/۱۳ دسی زیمنس بر متر بودند. از آنجا که ذرت از جمله گیاهانی است که در مرحله جوانه‌زنی به شوری مقاوم ولی در مراحل بعدی رشد و گلدهی به شوری حساس می‌باشد، اعمال تیمار شوری از طریق آبیاری در مرحله ۴ برگی انجام گرفت که آبیاری به روش قطره‌ای و با مقدار یکسان در تیمارهای مختلف صورت می‌گرفت. در دو زمان نمونه‌برداری انجام شدکه نمونه‌برداری اول از گیاهان موجود در ۸۰ لایسیمتر و در نمونه برداری دوم از گیاهان موجود در ۸۰ لایسمتر دیگر استفاده شد و گیاهان موجود در ۸۰ لایسیمتر باقی مانده برای جلوگیری از خطا می‌باشد تا در صورت در نیامدن گیاه موجود در یک لایسیمتر جایگزین شود.در طول دوره رشد، طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک کل و عملکرد ارزیابی گردید. برای تعیین وزن خشک برحسب گرم، کلیه اندام‌های هوایی گیاه در حرارت ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و سپس با ترازوی دیجیتالی به دقت ۰/۰۰۱ توزین گردیدند. به منظور بررسی تاثیر تنش شوری در سطوح مختلف شوری بر عملکرد ذرت از مدل *AquaCrop* و نرم‌افزار *SAS ver 9.1* استفاده شد بدین ترتیب با استفاده از داده‌های حاصل از نمونه‌برداری‌های مختلف، تاثیر سطوح مختلف شوری بر عملکرد ذرت در مدل *AquaCrop* بررسی شد. برای این منظور از نسخه ۴ مدل *AquaCrop* استفاده شد که در سال ۲۰۱۲ و برای کمی کردن تاثیر تنش شوری (علاوه بر سایر تنش‌های محیطی که در نسخه‌های قبلی در نظر گرفته شده بود) معرفی شد (۲۷). همچنین داده‌های حاصل از نمونه‌برداری‌های مختلف در قالب

طرح کاملا تصادفی مورد تجزیه آماری قرار گرفتند که تجزیه آماری بوسیله نرم‌افزار *SAS ver 9.1* انجام شد مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام گرفت.سپس به منظور ارزیابی عملکرد مدل *AquaCrop* ، به مقایسه‌ی نتایج حاصله از مدل *AquaCrop* و داده‌های مشاهدات مزرعه ای توسط نرم‌افزار *SASver 9.1* در شبیه‌سازی رشد، عملکرد و توسعه هیبرید ذرت تحت سناریوهای متفاوت تنش شوری پرداخته شد. در محاسبه عملکرد گیاهی تحت سناریوهای متفاوت تنش شوری با استفاده از مدل *AquaCrop*، مدل به داده‌های اقلیمی، داده‌های مربوط به خاک، داده‌های گیاهی واطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه نیاز دارد.

تشریح اصول نظری مدل

تئوری مدل

هسته اصلی تخمین عملکرد محصول در مدل *AquaCrop*، رابطه‌ی دورنبوس و کاسام (۸)، (رابطه ۱) است که با اعمال اصلاحاتی در آن از جمله تفکیک تبخیر و تعرق واقعی (ET) به تبخیر از سطح خاک (E_s)و تعرق (T_c) و نیز عملکرد (Y)به بیوماس (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شده است (۲۷):

$$\left(1-\frac{Y}{Y_X}\right)= K_y\left(1-\frac{ET}{ET_X}\right) \quad (۱)$$

در این معادله Y_X عملکرد حداکثر گیاه زراعی، Y عملکرد واقعی گیاه زراعی، ET_x: حداکثر تبخیر و تعرق،ET: تبخیر و تعرق و اقعی و K_y: فاکتور تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در میزان تبخیر و تعرق است.

برای محاسبه‌ی عملکرد از بیوماس، مدل *AquaCrop* از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کند (۲۷):

$$Y = f_{HI} \times HI_O \times B \quad (۲)$$

که در آن:HI_O: شاخص برداشت مرجع (طی مرحله‌یبلوغ فیزیولوژیک)؛Y: عملکرد دانه؛ وf_{HI}: ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند و به کمبود آب، درجه‌ی حرارت هوا، زمان و شدت تنش در طول چرخه‌ی رشد محصول بستگی دارد.در *AquaCrop* برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز مدنظر قرار نمی‌گیرند (۲۹). بطور کلی، اگرچه مدل*AquaCrop* مبنی بر فرایندهای زیست فیزیکی پیچیده می‌باشد (۲۹)، اما نیاز به اطلاعات ورودی کم و ساده دارد. ورودی‌های مدل شامل چهار دسته: داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه‌ای می‌باشند.

داده‌های ورودی مدل *AquaCrop*

داده‌های اقلیمی

داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه، مقدار بارندگی روزانه، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد برای محاسبه‌ی ET_0 در مدل، از اطلاعات آماری سال‌های۹۰-۱۳۸۹ایستگاه سینوپتیک کرج استخراج گردید. میانگین سالانه‌ی غلظتCO_2 برای سال‌های موردنظر به صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارد مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه‌ی روز رشد (GDD) به منظور تعدیل عملکرد زیست توده به دلیل تنش سرما استفاده می‌کند (۲۶).

داده‌های مربوط به خاک

اطلاعات خاک خصوصیات هیدرولیکی خاک است که وارد مدل می‌شود (۲۷). این آزمایش در یک خاک ماسه‌ای یکدست انجام گرفت.برای تعیین نوع خاک، قبل از کاشت بذر، از خاک لایسیمترها نمونه‌گیری انجام گرفت و سایرداده‌های مورد نیاز در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار *Soil Water Characteristic* محاسبه شدکه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه‌ی آزمایشی

Table 1- Soil characteristics of the experimental farm

بافت خاک Soil type	ظرفیت زراعی FC (%)	نقطه پژمردگی PWP (%)	درصد اشباع SAT (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat) (mm/day)	کل آب قابل دسترس(TAW) mm/m	آب محتوای خاک Soilwater content (vol %)
Sand	7	3.2	47.7	3767.3	38	3.20

داده‌های گیاه

در مدل *AquaCrop*، سیستم اطلاعات گیاه زراعی از پنج قسمت اصلی (فنولوژی، کانوپی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس تولید شده و عملکرد قابل برداشت) تشکیل شده است که بیشتر در ارتباط با فرایندهای دینامیک گیاه زراعی می‌باشد.تنش‌های مدل شامل تنش آبی، تنش حاصلخیزی، تنش دمای هوا وتنش شوری است. داده‌های گیاهی ورودی شامل پارامترهای ثابت و داده‌های ویژه‌ی کاربری هستند.مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای اکثر گیاهان زراعی به عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند.همه پارامترهای مربوط به مکان و پارامترهای ویژه‌ی گیاهی طرح، از قبیل ویژگی‌های آب وخاک، حداکثر عمق ریشه، تراکم گیاه، زمان کاشت و مدیریت آبیاری در

گروه پارامترهای مخصوص کاربر طبقه‌بندی می‌شوند (۲۷). پارامترهای موردنیاز گیاهی برای رشد ذرت در جدول ۲و مقادیر پارامترهای ثابت ورودی گیاه ذرت به مدل *AquaCrop* در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

مدیریت مزرعه‌ای

اجزای مدیریت شامل دو قسمت مدیریت آبیاری (در زمینه کشاورزی دیم و آبی) و مدیریت زراعی (در زمینه‌ی سطوح مختلف حاصلخیزی خاک) است (۲۷). آزمایش‌های مزرعه‌ای درقالب پنج تیمارشامل آب مقطر و محلول سدیم کلرید با غلظت‌های۴/۵۳، ۹/۰۶، ۱۳/۵۹ و ۱۸/۱۳ انجام شد. رابطه‌ی حاکم بر حرکت آب در خاک، معادله‌ی بیلان است که مدل برای بخشی از پروفیل خاک که سیستم ریشه در آن واقع شده است، انجام می‌دهد. در این فرایند، مدل با استفاده از مقدار آب وارد و خارج شده، بیلان آب خاک را محاسبه و اجزای بیلان را برای مدت زمان مشخص تعیین می‌کند (۲۷). مدل *AquaCrop* به منظور بررسی و شبیه‌سازی بیلان املاح، دو فرایند انتقال توده‌ای و پخشیدگی را در یک بعد به کار می‌گیرد که انتقال توده‌ای املاح توسط منافذ ماکرو وفرایند پخشیدگی املاح، توسط منافذ میکرو انجام می‌گیرد (۲۷). واسنجی مدل در این طرح، با استفاده از مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و دستاوردهای واقعی انجام شد.

آزمون‌های آماری

هدف از کاربرد آزمون‌های آماری در این تحقیق، برآورد میزان خطا در محاسبات مدل و برآورد دقت آن در شبیه‌سازی می‌باشد پس برای بررسی نتایج حاصل از مدل با نتایج مشاهده‌ای در سطح مزرعه و صحت یابی نتایج و ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در تخمین عملکرد محصول از شاخص‌های ارزیابی مزرعه‌ای شامل مجذور میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، میانگین خطای مطلق (*MAE*)، ضریب باقی مانده (*CRM*)، درصد خطای پیش بینی یا متوسط خطای نسبی (E_r)، شاخص سازگاری (d) استفاده شد. روابط این شاخص ها به ترتیب به صورت زیر می باشند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{n=i}^{n} | P_i - O_i | \quad (۴)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۵)$$

$$E_r = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{|P_i - O_i|}{P_i} \quad (۶)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۷)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۸)$$

در روابط فوق O_i: مقادیر اندازه‌گیری شده؛P_i: مقادیر پیش‌بینی شده؛ n: تعداد مشاهدات؛ و$\bar{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است. *RMSE* نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه گیری‌ها) چقدر است (۴). *MAE*برای برآورد خطا در محاسبه مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر واقعی است. شاخص *CRM* نشان دهنده‌ی تمایل مدل برای برآورد بیش از حد (مقادیر منفی) یا برآورد کمتر از حد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه گیری‌ها است (۱۴،۱).آزمونE_r متوسط خطای نسبی را نشان می‌دهد (۱۴، ۱۵). ضریب d یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از ∞− تا ۱+ متغییر است، چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده باهم برابر باشند مقدارd برابر یک می‌شود (۴). مقدار *NSE* بین ∞− تا ۱ متغییر است که هر چه قدر مقدار آن به یک نزدیک باشد، مدل کاراتر است (۱۷).

جدول ۲- پارامترهای رشد ذرت

Table2-Parameters ofMaize

پارامتر Parameter	مقدار value	واحد Unit
تراکم کشت Plant density	66667	بوته در هکتار (Plants/ha)
زمان جوانه‌زنی Time from sowing to emergence	6	روز بعد از کاشت day after sowing
حداکثر پوشش گیاهی Maximum canopy cover	86	درصد (٪)
زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی Time from sowing to Maximum canopy cover	56	روز بعد از کاشت day after sowing
زمان شروع پیری Time from sowing to start senescence	116	روز بعد از کاشت day after sowing
زمان رسیدگی فیزیولوژیک Time from sowing to maturity	140	روز بعد از کاشت day after sowing

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ثابت ورودی گیاه ذرت به مدل AquaCrop

Table 3- The values of the fixed parameters inputs maize to AquaCrop model

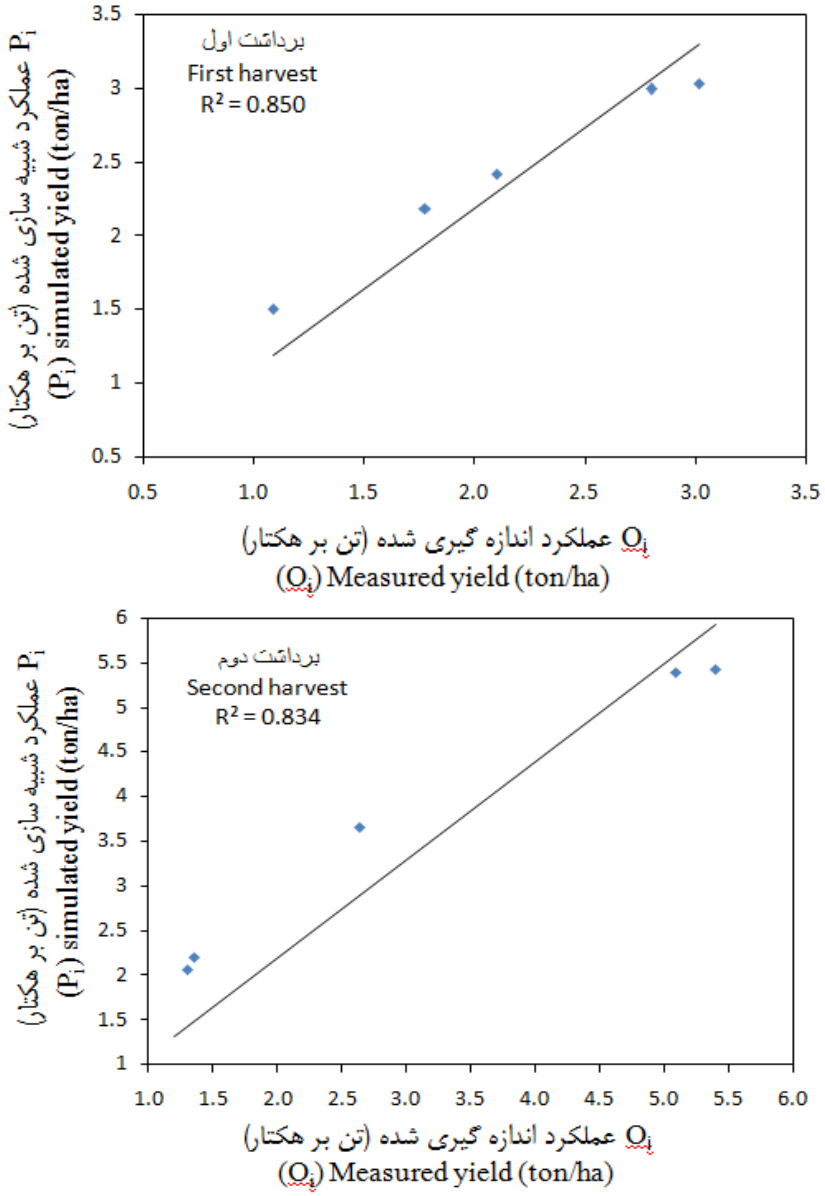
شرح Description	علامت symbol	مقدار value	واحد Unit
دمای پایه Base temperature	Tbase	8	℃
دمای بالا Uperr temperature	Tupper	30	℃
پوشش گیاهی بذر در زمان ۹۰ درصد ظهور جوانه‌ها Canopy size seedling	–	6.5	cm^2 /plant
ضریب رشد گیاه Canopy Growth Coefficient	CGC	15.7	%/day
ضریب کاهش رشد گیاه Canopy Decline Coefficient	CDC	11.2	%/day
ضریب گیاهی ذرت در دوره رشد کامل قبل از شروع پیری Crop transpiration coefficient when completecanopy cover (cc=1) but prior to senescence	Kcbx	1.05	-
بهره‌وری آب نرمال شده برای تبخیر وتعرق و دی‌اکسیدکربن Crop water productivity	WP	33.7	gram/m^2
آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش –سطح آستانه بالا Fraction of TAW at which CGC starts to be reduced	Pexp,upper	0.14	-
آستانه تخلیه آب خاک برای گسترش تاج پوشش –سطح آستانه پایین Fraction of TAW at which CGC becomes 0	Pexp,lower	0.72	-
عامل شکل برای ضریب تنش آبی رشد گیاه shape factor for water stress coefficient for canopy expansion	–	2.9	-
آستانه تخلیه آب خاک برای کنترل روزنه گیاه – سطح آستانه بالا Fraction of TAW at which stomata start to close	Psto	0.69	-
عامل شکل ضریب تنش آب برای کنترل روزنه shape factor for water stress coefficient for stomatal control	–	6	-
آستانه تخلیه آب خاک برای پیری تاج پوشش– سطح آستانه بالا Fraction of TAW at which early canopy senescence is triggered	Psen	0.69	-
عامل شکل ضریب تنش آب برای پیری تاج پوشش shape factor for water stress coefficient for canopy senescence	–	2.7	-

ضریب همبستگی R^2 معیار پراکنش بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده است (۱۴).کلیه شاخص‌های آماری بیان شده در مقاله برای مقایسه‌ی مقادیر درصد کاهش عملکرد مشاهده شده در سطح مزرعه و همچنین مقادیر درصد کاهش عملکرد پیش‌بینی شده به وسیله مدل برای محصول ذرت تحت سناریوهای مختلف شوری مورد محاسبه قرار گرفت.

نتایج و بحث

هدف از واسنجی عملکرد، تنظیم ورودی‌های گیاهی مدل است. عملکرد حاصل از پیش‌بینی مدل باید با عملکرد مشاهده ای، در تیمارهای مختلف کمترین اختلاف را داشته باشند که با اجرای مدل و مقایسه‌ی عملکرد حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای میسر می شود. براساس دامنه تغییرات پیشنهاد شده توسط لیو و همکاران (۲۰) وهنگ و همکاران (۱۳) نتایج نشان می‌دهد حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب گیاهی دو جزئی پیش‌فرض مدل، رشد پوشش تاجی گیاه (*CCG*)، شاخص برداشت (*HI*)، زمان پر شدن غلاف، زمان گل‌دهی بیشتر از سایر پارامترها است بنابراین بایستی این داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند زیرا در غیر این صورت خطای قابل توجهی در شبیه‌سازی به وجود می‌آید.نتایج مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی ذرت ومقادیر ذکر شده درجدول ۳ ارائه شده است.برای اعتبارسنجی مدل پنج تیمار S_1,S_2,S_3،S_4،S_5در دو زمان نمونه‌برداری انتخاب شد سپس بدون اعمال تغییر در فایل‌های گیاهی واسنجی شده‌ی نهایی، برای هر یک از تیمارها مدل اجرا شده و مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده با مقادیر عملکرد مشاهده شده براساس شاخص‌های آماری بررسی شد. مقایسه‌ی مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده وپیش‌بینی شده توسط مدل در شکل ۱ نشان داده شده است. ضریب تبیین R^2 معیار پراکنش بین مقادیر پیش‌بینی و

اندازه‌گیری شده است مقدار ضریب تبیین R^2برای برداشت اول و دوم به ترتیب ۰/۸۵۰ و ۰/۸۳۴ می‌باشد که نشان دهنده‌ی همبستگی قابل قبول مقادیر عملکرد پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقادیر پارامترهای آماری برای سنجش اعتبار مدل در پیش بینی عملکرد محصول تحت تنش شوری در جدول ۴ آورده شده است. براساس نتایج جدول ۴، مدل *AquaCrop*، عملکرد محصول تحت شرایط شوری را با دقت مناسب، شبیه سازی کرد. ضریب *RMSE* در برداشت اول و دوم به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۷۱ می‌باشدکه براساس این شاخص، مدلسازی عملکرد محصول تحت شرایط شوری مناسب است. مقدار *MAE* نیز در برداشت اول و دوم به ترتیب ۰/۲۷ و ۰/۵۸ است، این شاخص که برای برآورد خطا در محاسبه مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر واقعی است نیزنشان‌دهنده‌ی دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول می‌باشد.



شکل ۱-مقایسه‌ی عملکرد اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده تحت تنش شوری توسط مدل AquaCrop برای ذرت در برداشت اول ودوم

Figure 1- Comparison of measured and predicted performance under salt stress by AquaCrop model for maize in the first and second harvested

جدول ٤- شاخص‌های آماری ارزیابی و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول تحت تنش شوری

Table 4- Statistical indicators for the evaluation and validation models for yield simulation under salt stress

برداشت Harvest	NSE	d	CRM	MAE	RMSE	R^2
اول First	0.81	0.91	-0.12	0.27	0.35	0.850
دوم Second	0.84	0.93	-0.18	0.58	0.71	0.834

جدول ٥-مقایسه مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف شوری برای برداشت اول

Table 5- Comparison of measured and simulated values yield at different levels of salinity for the first harvest

تیمار Treatment	عملکرد اندازه گیری شده Measured yield (ton/ha)	عملکرد شبیه سازی شده Simulated yield (ton/ha)	درصد خطا Error (%)	تمایل مدل برای بیش‌برآورد Tend model to over-estimate
S1	3.018	3.035	0.56	-0.006
S2	2.803	2.992	3.43	-0.067
S3	2.10	2.413	6.61	-0.149
S4	1.779	2.18	9.56	-0.225
S5	1.091	1.502	13.1	-0.377

جدول ٦- مقایسه مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف شوری برای برداشت دوم

Table 6- Comparison of measured and simulated values yield at different levels of salinity for the second harvest

تیمار Treatment	عملکرد اندازه گیری شده Measured yield (ton/ha)	عملکرد شبیه سازی شده Simulated yield (ton/ha)	درصد خطا Error (%)	تمایل مدل برای بیش‌برآورد Tend model to over-estimate
S1	5.40	5.423	0.42	−0.004
S2	5.085	5.381	2.96	−0.058
S3	2.641	3.656	11.23	−0.38
S4	1.352	2.201	18.08	−0.62
S5	1.305	2.062	21.79	−0.58

مقدار شاخص *CRM* در هر دو برداشت اول و دوم تحت سناریوهای مختلف شوری منفی و نزدیک صفر است که نشان داد در تمام تیمارهای آزمایش در هر دو برداشت، مدل *AquaCrop* مقدار اندکی تمایل به بیش برآورد دارد و عملکرد محصول را اندکی بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. مقدار شاخص سازگاری *d* به یک نزدیک است که نشان‌دهنده‌ی سازگاری روند کاهش عملکرد محصول با افزایش شوری در مدل با روند کاهش عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه با افزایش شوری می‌باشد. شاخص *NSE* برای برداشت اول ودوم به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۸۴ محاسبه شد که نزدیک به یک بوده و نشان دهنده کارایی مناسب مدل در شبیه سازی عملکرد است. عملکرد اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه و شبیه‌سازی شده توسط مدل، میزان تمایل مدل برای بیش‌برآوردو مقدار خطای تخمین عملکرد ذرتتوسط مدل با مقادیر واقعی در جدول ۵و۶ ارائه شده است. طبق نتایج موجود درجدول ۵ و ۶، همانطوری که قابل انتظار بود با افزایش مقدار شوری از تیمار S_1 تا S_5 در برداشت اول و دوم عملکرد محصول یک روند نزولی دارد، بیشترین عملکرد متعلق به تیمار شاهد S_1 و کمترین آن متعلق به تیمار تنش شوری شدید S_5 است و با افزایش مقدار شوری، میزان خطا افزایش می‌یابد بطوریکه کمترین و بیشترین خطای شبیه سازی عملکرد در مدل مربوط به تیمار S_1 و S_5است که کمترین و بیشترین خطا در برداشت اول به ترتیب ۰/۵۶، ۱۳/۱ و در برداشت دوم به ترتیب ۰/۴۲، ۲۱/۷۹ درصد می باشندکه در مقایسه با مقدار مشابه آن در تحقیق انجام شده برای ذرت توسط استدتیوتو و همکاران (۲۹) تفاوت چندانی ندارد.با افزایش شوری، تمایل مدل برای بیش‌برآورد عملکرد شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری شده بیشتر می شود و کمترین و بیشترین آن مربوط به تیمار S_1 و S_5در هر دو برداشت است. از مقایسه‌ی نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده در برداشت اول و دوم ملاحظه می شود با طولانی شدن زمان برداشت محصول وافزایش تعداد آبیاری، شوری خاک افزایش یافته در نتیجه مقدار خطا در برداشت دوم بیشتر از برداشت اول است و بیشترین خطا مربوط به تیمار S_5 در برداشت دوم ۲۱/۷۹ درصد است.

نتایج آزمون آماری با نرم‌افزار *SAS ver 9.1*

نتایج تجزیه واریانس طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک کل و عملکرد محصول در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به وزن خشک اندام هوایی نشان داد این صفت تحت تاثیر زمان نمونه‌برداری قرار دارد و تیمار شوری نیز بطور معنی‌داری این صفت را تحت تاثیر قرار داد و طبق نتایج موجود در جدول ۸ با افزایش شوری از ۰ به ۱۸/۱۳ دسی‌زیمنس بر متروزن ماده خشک کاهش یافت. با بررسی وزن خشک در طول دوره رشد در غلظت‌های مختلف نمک مشاهده شد در اوایل دوره رشد اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای شوری وجود ندارد ولی بیشترین طول ساقه متعلق به تیمار شاهد S_1 و کمترین آن متعلق به تیمار تنش شوری شدید S_5 بود و با گذشت زمان در برداشت دوم نیز همین روند ادامه یافته است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۷ نشان داد که غلظت نمک (شوری) بجز وزن خشک کل صفات طول ریشه،طول ساقه وعملکرد را نیز بطور بسیار معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد.در این آزمایش مقایسه میانگین تیمارها با روش چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها در جدول ۸ نشان داد که میزان همه صفات حتی وزن خشک کل نیز با افزایش شوری کاهش یافتند. روند افزایش وزن خشک کل روندی مشابه طول ساقه در گیاه نشان داد و اختلاف معنی‌داری در وزن خشک کل بین غلظت‌های مختلف نمک در اوایل دوره رشد مشاهده نگردید اما وزن خشک کل با افزایش شوری کاهش یافت و با گذشت زمان این اختلاف بیشتر شد.

جدول ۷-نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در سطوح مختلف شوری در ذرت

Table 7- The results of variance Analysis studied traits at different levels of salinity in corn

درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Variables	میانگین مربعات Mean square			
		عملکرد yield (gram/plant)	وزن خشک کل total dry weight (gram/plant)	طول ریشه root length (cm)	طول ساقه Stem length (cm)
3	تکرار Repeat	7.68^{ns}	4.01^{*}	25.61^{ns}	85.95^{**}
4	شوری Salinity	48.90^{*}	1.90^{ns}	197.59^{*}	294.55^{**}
1	زمان اندازه گیری Measuring time	53.35^{**}	27.72^{**}	318.60^{*}	320.75^{**}
4	شوری * زمان Salinity * time	14.94^{ns}	1.13^{ns}	35.66^{ns}	19.43^{ns}
27	خطا Fault	6.53	1.22	52.50	13.91

ns، * و**: بترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد

ns,* and **: respectively non significant, significant at the levels 5% and 1%

جدول ۸- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در سطوح مختلف شوریو دو زمان بر روی ذرت

Table 8- Comparison of means traits in different levels of salinity and two times on maize

تیمار شوری Salinity treatment (ds/m)	عملکرد Yield (gram/plant)	وزن خشک کل Total dry weight (gram/plant)	طول ریشه Root length (cm)	طول ساقه Stem length (cm)
0	7.94a	1.90a	34.38a	30.94 a
4.53	7.40a	1.85a	34.24a	26.71b
9.06	4.75b	1.82a	26.24b	24.40b
13.59	3.00b	1.22a	24.59b	20.42c
18.13	2.13 b	0.80a	25.07b	15.05d
				زمان نمونه‌برداری Measuring time
6.15a	2.35a	31.73a	26.34 a	اول First
3.94b	0.68b	26.08b	20.67b	دوم Second

نتایج جدول ۸ نشان داد که در همه صفات اندازه‌گیری شده بیشترین مقدار کاهش در تیمار تنش شدید شوری S_5 و کمترین آن در تیمار شاهد S_1 مشاهده گردید. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت شوری از طریق کاهش فشار تورژسانس سبب کاهش رشد و توسعه سلول‌ها خصوصا در ساقه و برگ ها گردیده و به همین دلیل اولین اثر محسوس شوری بر روی گیاهان بصورت تعدادکمتر برگ‌ها، اندازه کوچک‌تر آن‌ها و ارتفاع کمتر گیاهان مشاهده گردید. طبق نتایج سیکک و کاکریلار (۶) نیز، شوری سبب کاهش وزن خشک ساقه، ریشه و برگ، تعداد برگ و طول ساقه در ذرت می‌شود (۶). همچنین امداد و فرداد (۱۱) با بررسی اثر تنش شوری (NaCl) و رطوبتی بر عملکرد ذرت گزارش کردند که هر دو تنش باعث کاهش سطح برگ، وزن خشک و ارتفاع گیاه شد. بنابراینتایج حاصل از این تحقیق با نتایج تحقیقات مشابه همخوانی دارد (۱۱). نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد شوری بصورت بسیار معنی‌داری طول ساقه، ریشه،وزن خشک وعملکرد محصول را تحت تاثیر خود قرار می دهد. درجدول ۹ ضرایب همبستگی بین صفات طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک کل و عملکرد ارائه شده است که همبستگی بالای میزان وزن خشک و تر با طول ساقه و ریشه و کاهش میزان این صفات در اثر شوری را نشان داده که کاهش صفات طول ساقه و ریشه و وزن خشک وعملکرد امری کاملا منطقی می‌باشد.

جدول ۹- ضرایب همبستگی بین صفات طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک کل و عملکرد

Table 9- Correlation coefficients between Stem length, root length, total dry weight and performance

	طول ساقه Stem length	طول ریشه Root length	عملکرد Yield
طول ریشه Root length	0.50^{**}		
عملکرد Yield	0.86^{**}	0.68^{**}	
وزن خشک کل Totaldry weight	0.57^{**}	0.42^{**}	0.58^{**}

**: معنی‌دار در سطح ۱ درصد

**: Significant at 1%

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدل *AquaCrop* برای گیاه ذرت در منطقه کرج ارزیابی شد. نتایج بیان می‌کند مدل *AquaCrop* قادر به شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تاثیر تیمارهای مختلف شوری با دقت مناسب می‌باشد. با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه و نتایج به دست آمده از تجزیه تحلیل آماری در نرم‌افزار *SAS ver 9.1* و نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد تحت تنش شوری در مدل *AquaCrop* ملاحظه می‌شود با افزایش شوری، عملکرد شبیه سازی شده در مدل *AquaCrop* کاهش می‌یابد به طوریکه بیشترین عملکرد متعلق به تیمار شاهد S_1و کمترین آن متعلق به تیمار تنش شوری شدید S_5 است و با گذشت زمان در برداشت دوم نیز همین روند ادامه یافته است.طبق تجزیه تحلیل آماری در نرم‌افزار *SAS ver 9.1* و نتایجبه دست آمده از مدل *AquaCrop*، بیشترین مقدار کاهش محصول نسبت به تیمار شاهد و بیشترین خطای شبیه سازی عملکرد در مدل مربوط به تیمار S_5 و کمترین مقدار کاهش محصول نسبت به تیمار شاهد مربوط به تیمار شاهدS_2و کمترین خطای شبیه سازی عملکرد در مدل مربوط به تیمار S_1 می‌باشد. طبق نتایج تحقیقات هنگ و همکاران (۱۳) بر روی ذرت و نتایج خرسند و همکاران (۱۷) و نتایج به دست آمده در این مطالعه، در می‌یابیم که مدل*AquaCrop* در تنش‌های کم و متوسط عملکرد ذرت را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند ولی در تنش‌های زیاد دقت شبیه‌سازی کم می‌شود. با توجه به مقدار شاخص سازگاری d روند کاهش عملکرد محصول با افزایش شوری در مدل با روند عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه سازگاری دارد.میزان R^2برآورد شده و مقایسه‌ی مقادیر محصول اندازه‌گیری شده نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل *AquaCrop*، برای تیمارهای مختلف نشان داد که متغییرها با هم همبستگی قابل قبولی دارند. طبق شاخص *CRM*، مدل *AquaCrop* در شبیه سازی عملکرد ذرت تحت شرایط شوری تمایل به مقدار ناچیزی بیش‌برآورد دارد و با افزایش میزان شوری، تمایل مدل برای بیش‌برآورد بیشتر شده و خطای مدل در شبیه سازی عملکرد افزایش می یابد. یکی از دلایل این نتیجه گیری از مدل *AquaCrop* را می‌توان به معادلات حاکم بر پدیده‌ی انتقال املاح نسبت داد. عوامل مختلف بر انتقال املاح در نیمرخ خاک موثرند؛ از جمله انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح، تخریب املاح، رسوب و... که در *AquaCrop* تنها فرایندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته شده است و براساس معادله‌ی *CDE*[1]، انتقال املاح بررسی می‌شود، در حالی که املاح تحت تاثیر

1-CDE: Convection-Diffusion Equation

فرایندهای دیگر نیز قرار دارند. طبق نتایج محمدی (۳۲)، در ارزیابی مدل *AquaCrop* به منظور شبیه سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم تحت شرایط هم‌زمان تنش شوری و خشکی، مدل *AquaCrop* توانست عملکرد محصول، زیست توده و کارایی مصرف آب برای گندم در شرایط شوری و کم آبی به خوبی شبیه سازی کند (۲۳). در مجموع نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات مشابه موجود مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داده شد که مقادیر خطای برآورد مدل *AquaCrop* برای ذرت در منطقه کرج با خطای برآورد سایر تحقیقات تفاوت چندانی ندارد.توصیه می شود در تحقیقات آتی، مدل *AquaCrop* برای سایر نباتات و در اقلیم های مختلف ایران ارزیابی شود.

منابع

1- Alizade H.A., Nazari B., Parsinezhad M., Ramezani etedali H., and Janbaz H.2010. Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in karaj area. Iranian Journal of Irrigation and drainage, P:273-283.(in Persian with English abstract)
2- Allen R.G., Preira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper, NO.56, Rome, Italy.
3- Ashofteh Beiragi M., Ebrahimi M., Mostafavi K.h., Golbashy M., Khavari Khorasani S. 2011. A study of Morphological Basis of corn (*Zea mays* L.) yield under drought stress condition using Correlation and Path Coefficient Analysis. Journal of Cereals and Oilseeds, 2(2):32-37.
4- Babazadeh H., and sarai Tabrizi M.2012. Assessment of AquaCrop Model under Soybean Deficit Irrigation Management Conditions. Journal of Water and Soil, 2(26):329-339.(in Persian with English abstract)
5- Blanco F.F., Folegatti M.V., Gheyi H.R., and Fernandes P.D. 2008. Growth and yield of corn irrigated with saline water. Science Agriculture, 65(6):574-580.
6- Cicek N., and Cakirlar H. 2002. The effect of salinity on some physiological parameters in two maize cultivars. BULG. Journal Plant Physiology, 28:66-74.
7- Demir Kaya M., Gamze Okc u., Atak M., and Yakup C.2006. Seed treatments toovercome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthusannuus* L.). Europ. J. Agronomy, 24:291–295.
8- Doorenbos J., Kassam A.H. 1979. "Yield response to water". irrigation and drainage. Paper No. 33, FAO. Rome.
9- Droogers P., Torabi M., Akbari M., and Pazira E. 2001. Field-scale modeling toexplore salinity problems in irrigated agriculture. Irrigation and Drainage, 50:77-90.
10- Eker S., and Comertpay G. 2009. Effect of Salinity Stress on Dry Matter Production and IonAccumulation in Hybrid Maize Varieties. Turk J Agric, 365-373.
11- Emdad M.R., and Fardad H. 2000. Effect of salt and water stress on corn yield production. Iranian Journal of Agriculture Science, 3(31): 641-654. (in Persian with English abstract)
12- FAO. 2008. FAOSTAT. Land and plant nutritionmanagement service. Available at http://www.fao.org/ ag/Agl/agll/spuch.
13- Heng L.K., Hsiao T.C., Evett S., Howell T., and Steduto P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize Agron. J. 101:488–498.
14- Heydariniya M., Naseri A.A., andBoromand Nasab S. 2012. Investigation of AquaCrop model application in irrigation planning of sunflower in ahvaz. Journal of Water Engineering, 5(12):37-50.(in Persian)
15- Hoffman G.J., Mass E.V., Prichard T.L., and Meyer J.L. 1983. Salt tolerance of corn in the Sacramento-San Joaquin Delta of California. Irrigation, Science, 4:31–44.
16- Iqbal M., Shen Y., Stricevic R., Pei H., Sun H., Amiri E., Penas A., and del 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.
17- Khorsand A., Verdinejad V.R., and Shahidi A.2014.Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. Journal of Water and Irrigation Management, 4(1):89-104. (in Persian)
18- Kroes J.G., and Van Dam J.C. 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wagenningen, Report 1649.
19- Kuo Sh.F., Lin B.J., and Shieh H.J. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Mmanagement Journal, 82:433-451.
20- Liu H.F., Genard M., Guichard S., and Bertin N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes, Journal of Experimental Botany, 13(58):3567-3580.
21- Manchanda G., and Garg N. 2008. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. Acta Physiologia Plantarum, 30:595-618.
22- Mass E.V.1986. Crop tolerance to saline soil and water. Proe. US Pak Biosaline Res. Workshop, Karachi,

Pakistan, pp:205-219.
23- Mohammadi M., Ghahraman B., Davary K., Ansari H., and Shahidi A. 2015. Validation of AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Yield and Water Use Efficiency under Simultaneous Salinity and Water Stress. Journal of Water and Soil. 1(29): 67-84.(in Persian with English abstract)
24- Patel N, Kumar P., and Sign N. 2008. Performance evaluation of AquaCrop in simulating Potato yield under varying water availability condition. Indian Agricultural Research Institute, New Delhi-110012.
25- Raes D. 2002. Reference manual of Budget model. K. U. Leuven, Faculty of Agricultural and Applied Biological sciences, Institute for Land and Water Management, Leuven, Belgium.
26- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy, 101:438–447.
27- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
28- Soltani Mohamadi A., kashkooli H.A., Naderi A., and Boromand nasab S.2012.Interaction of Water and Salinity Stresses on Yield and Yield Components of Maize during Different Stages in Ahvaz Climate Conditions.Journal of Iranian Water Research (IWRJ), 5(9):161-170.(in Persian)
29- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: Consepts and underlying principles. Agron. J, 101:426-437.

Journal of Water and Soil
Vol. 30, No. 5, Nov.-Dec. 2016, p. 1426-1439

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۰، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۵، ص. ۱۴۳۹-۱۴۲۶

Evaluation of the AquaCrop Model to Simulate Maize Yiled Response under Salinity Stress

A. Mehrazar[1]- J. Soltani[2*]- O. Rahmati[3]

Received: 06-06-2015
Accepted: 01-03-2016

Introduction: Limited water resources and its salinity uptrend has caused reducing water and soil quality and consequently reducing the crop production. Thus, use of saline water is the management strategies to decrease drought and water crisis. Furthermore, simulation models are valuable tools for improving on-farm water management and study about the effects of water quality and quantity on crop yield.. The AquaCrop model has recently been developed by the FAO which has the ability to check the production process under different propositions. The initial version of the model was introduced for simulation of crop yield and soil water movement in 2007, that the effect of salinity on crop yield was not considered. Version 4 of the model was released in 2012 in which also considered the effects of salinity on crop yield and simulation of solute Transmission in soil profile.

Material and methods: In this project, evaluation of the AquaCrop model and its accuracy was studied in the simulating yield of maize under salt stress. This experiment was conducted in Karaj, on maize hybrid (Zea ma ys L) in a sandy soil for investigation of salinity stress on maize yield in 2011-2012. This experiment was conducted in form of randomized complete block design in four replications and five levels of salinity treatments including 0, 4.53, 9.06, 13.59 and 18.13 dS/m at the two times sampling. To evaluate the effect of different levels of salinity on the yield of maize was used Version 4 AquaCrop model and SAS ver 9.1 software. The model calibration was performed by comparing the results of the field studies and the results of simulations in the model. In calculating the yield under different scenarios of salt stress by using AquaCrop, the model needs climate data, soil data, vegetation data and information related to farm management. The effects of salinity on yield and some agronomic and physiological traits of hybrid maize (Shoot length, root length, dry weight and crop yield) under different levels of NaCl solution osmotic potential were also investigated by SAS ver 9.1 software. Data's mean comparisons were performed by Duncan's multiple range test. To assess the accuracy of AquaCrop Model for Simulation of the Maize Performance under Salt Stress used from Indicators RMSE, MAE, CRM, NSE, d and Er.

Results and Discussion: The results of RMSE and MAE indices showed that AquaCrop model can simulate maize yield under the salinity stress. Accuracy decreased and crop yield prediction underestimated with increasing salinity from treatment 0 to 18.13 ds/m in the first and second harvest. The highest yield related to salinity treatment of 0 dS/m and the lowest yield related to salinity treatment 18.13 dS/m. yeild simulation error increased by increasing salinity, the highest and lowest error of yield simulation in model respectively related to salinity treatments 18.13 and 0 dS/m. The highest and lowest error was in the first harvest respectively 0.56 and 13.1 percent and in the second harvest respectively 0.42 and 21.79 percent, that in the comparison with the results of studies conducted by Steduto and colleagues on maize is not much different. The results comparison in the first and second harvest showed that soil salinity was increased by increasing irrigation number in second harvest, so the error in second harvest is greater than first harvest and the maximum error is related to treatment 18.13 ds/m in the second harvest 21.79 percent.The coefficient of determination R2 for the first and second harvest is respectively 0.850 and 0.834, that indicates a high correlation between yeild values of measured and predicted by the AquaCrop model. CRM index was negative and near zero in both harvest under Salinity different scenarios. According to CRM value, AquaCrop model was overestimated and the model was simulated maize yield under the salinity stress a little more than measured yield. The d statistic index value is close to unity, indicates that yield values in model is compatible with actual values. NSE index was calculated for the first and second harvest respectively 0.81 and 0.84, that is close to one and showed that the model has suitable performance in the yield simulation. Comparison of means by Duncan's multiple range test and analysis of

1, 2 and 3-Ms.c Student, Assistant Professor and Ms.c Student, Irrigation and Drainage Engineering Department, Abouraihan Campus, University of Tehran
(*-Corresponding Author Email: jsoltani@ut.ac.ir)

variance in the software SAS ver 9.1 indicated Salinity has a very significant effect on all traits including shoot length, root length, dry weight and crop yield that all traits were decreased significantly by increasing salinity.

Conclusion: Comparison of the results of AquaCrop model and statistical analysis in software SAS ver 9.1 showed that maize yield was reduced with increasing salinity. According to index CRM, AquaCrop model was simulated maize yield under the salinity stress more than measured yield in farm. The results showed that the AquaCrop model simulated well maize yield in moderate and low stress, but accurately simulation slightly decreased in high stress. The results of this study was compared with other research and indicated that the error values of AquaCrop model in Karaj is not much different with the error values of other research.

Keywords: Crop yield, Modeling, Saline water, Statistical analysis, Water management