تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۴ (ص ۴۹۸-۴۸۷)

ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک

محمد حسن‌لی[۱]، پیمان افراسیاب[۲]، حامد ابراهیمیان*[۳]
دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه زابل
استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه زابل
استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۳/۳۱)

چکیده

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یکی از راه‌کارهای مدیریت مصرف آب در کشاورزی و پیش‌بینی اثر آب‌های شور بر عملکرد محصول و شوری خاک است. اخیراً فائو نسخهٔ جدید مدل AquaCrop را ارائه کرده است که می‌تواند اثر آبیاری با آب شور را بر میزان عملکرد محصول و شوری خاک محاسبه کند. در این تحقیق دو مدل AquaCrop و SALTMED در شرایط استفاده از آب شور در تناوب با آب شیرین برای کشت گیاه ذرت علوفه‌ای ارزیابی شد. بدین منظور آزمایش مزرعه‌ای برای نُه تیمار (در شرایط مختلف کاربرد آب شور و شیرین) در منطقهٔ کرج انجام شد و عملکرد محصول و شوری پروفیل خاک اندازه‌گیری و با دو مدل مذکور شبیه‌سازی شد. مقدار R^2 برای شوری خاک و عملکرد محصول در مدل SALTMED به ترتیب برابر ۰/۸۴۳ و ۰/۷۳۳ و برای مدل SALTMED به ترتیب برابر ۰/۷۵۸ و ۰/۸۴۶ به دست آمد. خطای نسبی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد محصول از ۲/۹ تا ۳۰/۸ درصد و در تخمین شوری خاک از ۵/۹ تا ۴۵/۸ درصد متغیر بود. همچنین خطای نسبی مدل SALTMED در تخمین عملکرد محصول از ۰/۹ تا ۲۴/۷ درصد و در تخمین شوری خاک از ۲/۲- تا ۳۸/۲ درصد متغیر بود.

کلیدواژگان: آبیاری قطره‌ای، ذرت علوفه‌ای، شبیه‌سازی، کاربرد تناوبی آب شور.

مقدمه

پایداری منابع آب تا حد زیادی به مدیریت و مصرف مناسب آب کشاورزی وابسته است. به‌کارگیری آب شور برای مصارف کشاورزی موضوعی چالش‌برانگیز است و در صورت مصرف زیاد آب با تجمع املاح در خاک تهدیدی برای کشاورزی پایدار و امنیت غذایی به شمار می‌رود که نیازمند مدیریت کوتاه‌مدت و بلندمدت است (Tyagi, 2003). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یکی از ابزارهای مدیریتی در این زمینه است. در سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی برای مطالعهٔ مدیریت آبیاری و تأثیر تنش شوری در سطح مزرعه به کار رفته است. نسخهٔ جدید مدل AquaCrop میزان عملکرد محصول تحت تنش‌های شوری و نیز شوری نیمرخ خاک را برآورد می‌کند (FAO, 2012). همچنین در دههٔ گذشته مدل SALTMED به منظور مدیریت یکپارچهٔ آب در مزرعه برای سیستم‌های مختلف آبیاری، محصول، خاک، و کیفیت آب آبیاری توسعه پیدا کرده است (Ragab, 2002).

مطالعات بسیاری در زمینهٔ ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop انجام شده است. Hang *et al.* (2009) این مدل را برای محصول ذرت در سه منطقهٔ زاراگوزا در اسپانیا و تکزاس و فلوریدا در ایالات متحدهٔ امریکا ارزیابی کردند. مدل در شبیه‌سازی آب مصرفی گیاه در شرایط تبخیرـ تعرق و باد زیاد توانایی خوبی داشت. همچنین توانست بیوماس، عملکرد دانه، و سطح سایه‌انداز تحت شرایط بدون تنش آبی و با تنش آبی متوسط را در حد مناسب شبیه‌سازی کند. اما در تنش آبی شدید، به‌خصوص در مراحل حساس رشد گیاه، مدل عملکرد مناسبی نداشت. Stricevic *et al.* (2011) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول‌های ذرت، آفتابگردان، و چغندرقند در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در صربستان استفاده کردند. نتایج نشان داد این مدل می‌تواند در تصمیم‌گیری اولیه و در انتخاب گیاهان با توجه به شرایط کمبود آب مفید باشد. Abedinpour *et al.* (2012) ارزیابی کارآیی مدل AquaCrop را برای محصول ذرت در محیط نیمه‌خشک هند تحت رژیم‌های متغیر آبیاری (دیم به‌علاوهٔ آبیاری به میزان ۵۰٪ و ۷۵٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی) و نیتروژن (۰ و ۷۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) انجام دادند. عملکرد مناسبی از مدل در برآورد بیوماس، عملکرد دانه، و بهره‌وری آب گزارش شد. Katerji *et al.* (2013) پارامترهای گیاهی ذرت را در شرایط تنش آبی توسط مدل

* نویسندهٔ مسئول: Ebrahimian@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

AquaCrop در ایتالیا شبیه‌سازی کردند. مدل به طور مناسبی بیوماس تجمعی روزانه را در شرایط بدون تنش و تنش آبی متوسط شبیه‌سازی کرد. اما عملکرد خوبی در شرایط تنش آبی شدید نداشت. Masanganise *et al.* (2013) برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در گذشته (۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰) و پیش‌بینی آن در آینده (۲۰۴۶ تا ۲۰۵۶) از مدل AquaCrop در زیمبابوه استفاده کردند. نتایج نشان داد این مدل ابزاری قابل اتکا و مفید برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول با توجه به تغییر اقلیم است. Khorsand *et al.* (2014) عملکرد مدل AquaCrop را در پیش‌بینی عملکرد گندم و رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی در کرج ارزیابی کردند. عملکرد دانه با دقت زیادی شبیه‌سازی شد؛ اما مدل در پیش‌بینی شوری خاک در مقایسه با رطوبت خاک و عملکرد دانه خطای بیشتری داشت. Ziaii *et al.* (2014) مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize را در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت تحت شرایط کوددهی سنتی و کودآبیاری در منطقهٔ کرج مقایسه کردند و در نهایت مدل AquaCrop را برای استفادهٔ کشاورزان و برنامه‌ریزان در سطح منطقه توصیه کردند.

همچنین مطالعاتی دربارهٔ مدل SALTMED انجام شده است. Ragab *et al.* (2005 a and 2005 b) در کشورهای مصر و سوریه برای محصول گوجه‌فرنگی با استفاده از روش‌های آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای و تحت مدیریت‌های اختلاط و تناوب آب آبیاری شور و شیرین مدل SALTMED را واسنجی و صحت‌سنجی کردند. کارآیی این مدل به منزلهٔ ابزاری برای کارشناسان در مدیریت سیستم‌های آبیاری در مناطق مستعد شوری تأیید شد. Golabi *et al.* (2009) کارآیی مدل SALTMED را در شبیه‌سازی سیستم‌های آبیاری و زهکشی مزارع نیشکر خوزستان بررسی کردند. نتایج نشان داد اختلاف معناداری بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شدهٔ شوری خاک وجود ندارد و این مدل می‌تواند به مثابهٔ ابزاری کارآمد استفاده شود. Montenegro *et al.* (2010) اعلام کردند مدل SALTMED به طور مناسب رطوبت خاک و عملکرد محصولات هویج و کلم را در برزیل شبیه‌سازی کرد. Razzaghi *et al.* (2011) در یک آزمایش لایسیمتری در دانمارک با استفاده از مدل SALTMED واکنش گیاه گنه‌گنه به شوری خاک را ارزیابی کردند. در این تحقیق عملکرد دانه، مادهٔ خشک، شوری آب آبیاری، و شوری خاک به‌خوبی شبیه‌سازی شد. Oster *et al.* (2012) مدل‌های ENVIRO-GRO، HYDRUS، SALTMED، UNSACHEM، و SWAP را برای تعیین تأثیر تنش شوری و رطوبتی بر عملکرد ذرت علوفه‌ای ارزیابی کردند. در همهٔ سطوح شوری و آبیاری، مدل SALTMED عملکرد محصول را کمتر از سایر مدل‌ها شبیه‌سازی کرد. Mehanna *et al.* (2012) صحت‌سنجی مدل SALTMED را تحت شرایط مختلف اعمال کود و تنش خشکی برای لوبیاسبز در مصر انجام دادند. مدل پیش‌بینی مناسبی برای توزیع شوری و رطوبت خاک در شرایط آبیاری قطره‌ای داشت. Hirich *et al.* (2012) در کشور مراکش برای سه محصول گنه‌گنه، نخود، و ذرت شیرین با تیمارهای کم‌آبیاری مدل SALTMED را واسنجی و صحت‌سنجی کردند. مدل به‌خوبی داده‌های رطوبت خاک، عملکرد محصول، و مادهٔ خشک را برای سه محصول یادشده شبیه‌سازی کرد. Silva *et al.* (2013) عملکرد دانه و مادهٔ خشک نخود و رطوبت خاک را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در دو سال خشک و تر در جنوب پرتغال توسط مدل SALTMED شبیه‌سازی کردند. مدل با دقت بالایی پارامترهای مذکور را شبیه‌سازی کرد. Rameshwaran *et al.* (2015) در مطالعه‌ای گلخانه‌ای در ترکیه اثر آبیاری با آب شور بر عملکرد فلفل را با استفاده از مدل SALTMED شبیه‌سازی کردند. توانایی مدل در تخمین رطوبت خاک در سه لایهٔ ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر و نیز عملکرد محصول به اثبات رسید. Aly *et al.* (2015) در مطالعه‌ای گلخانه‌ای در عربستان از مدل SALTMED تحت رژیم‌های کم‌آبیاری استفاده کردند. نتایج نشان داد مدل به طور مناسبی می‌تواند شوری و رطوبت خاک و نیز عملکرد محصول خیار را شبیه‌سازی کند.

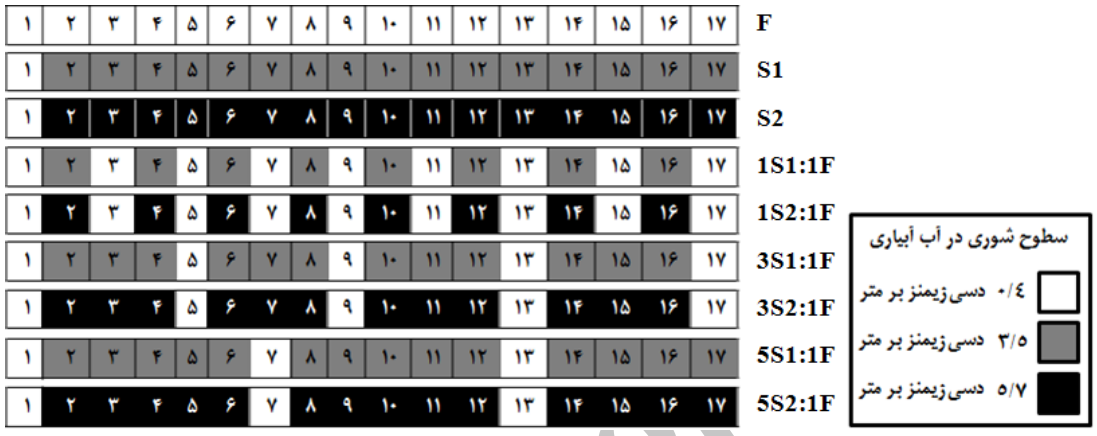
با توجه به اینکه اخیراً تنش شوری در نسخهٔ جدید مدل AquaCrop اضافه شده است، مطالعات بسیار محدودی برای ارزیابی این مدل در شرایط تنش شوری انجام شده است. بنابراین، هدف این تحقیق ارزیابی مدل AquaCrop و مقایسهٔ عملکرد آن با مدل SALTMED در شرایط استفاده از آب شور در تناوب با آب شیرین برای محصول ذرت علوفه‌ای در منطقهٔ کرج بود تا بتوان به قابلیت دو مدل مذکور در تخمین شوری خاک و عملکرد محصول در مدیریت‌های مختلف کاربرد آب شور و شیرین پی برد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای در سال ۱۳۹۱ در یک فصل زراعی در مزرعهٔ پژوهشی مرکز تحقیقات آب و خاک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، واقع در کرج، انجام شد. طول جغرافیایی محل آزمایش ۵۰ درجه و ۵۹ دقیقهٔ شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقهٔ شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۳۷ متر است. کرج دارای آب و هوای مدیترانه‌ای با متوسط

Archive of SID
www.SID.ir

بارندگی سالیانه برابر ۲۶۵ میلی‌متر است. بالاترین میانگین دمای ماهیانه در تیرماه (۲۴٫۵ درجهٔ سلسیوس) و پایین‌ترین میانگین در دی‌ماه (۱٫۲ درجهٔ سلسیوس) رخ می‌دهد. بر اساس داده‌های سال ۱۳۹۱ ایستگاه هواشناسی کرج، بارش قابل ملاحظه‌ای (بیش از ۱ میلی‌متر) در طول دورهٔ اعمال تیمارها رخ نداد. آزمایش برای کشت ذرت علوفه‌ای (سینگل کراس ۷۰۴) و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با نُه تیمار و در سه تکرار و در بیست و هفت کرت آزمایشی انجام شد. نحوهٔ اعمال نُه تیمار و استفادهٔ ثابت و متناوب از آب شور و غیر شور در شکل ۱ می‌آید. در نام‌گذاری تیمارها حروف F، S1، و S2 به ترتیب بیانگر سطح شوری ۰٫۴، ۳٫۵، و ۵٫۷ دسی‌زیمنس بر متر و اعداد ماقبل آن‌ها معرف تناوب آبیاری هر سطح شوری در هر تیمار هستند. همچنین در تیمارهای اول تا سوم که قبل از آن عددی وجود ندارد، به طور ثابت، از یک سطح شوری استفاده شد.



شکل ۱. شمای کلی تیمارهای مورد نظر (شماره‌ها نوبت‌های آبیاری را نشان می‌دهند)

شوری آب آبیاری ۳٫۵ و ۵٫۷ دسی‌زیمنس بر متر بر اساس درصد کاهش عملکرد محصول ۲۵ و ۵۰ درصد انتخاب شد (Allen *et al.*, 1998). مساحت هر کرت ۹ متر مربع شامل چهار ردیف کشت با فاصلهٔ ۷۵ سانتی‌متر و طول ۳ متر بود. سیستم آبیاری از نوع قطره‌ای نواری بود و میزان آب ورودی در هر کرت با استفاده از کنتور حجمی تنظیم می‌شد. آب آبیاری غیر شور از کانال عبوری از کنار مزرعه به مخازن ذخیره پمپاژ شد و برای تهیهٔ آب شور نمکِ خامِ صنعتی (موسوم به نمک شکری) به مقدار لازم بر اساس رابطهٔ $TDS = 640 \times K \times EC$ (Smedema and Rycroft, 1983) در آب حل شد و سپس آب شور به کمک سیستم پمپاژ ثانویه به کرت‌ها رسانده شد. در رابطهٔ مذکور، TDS مقدار کل نمک‌های محلول در آب (میلی‌گرم در لیتر)، EC هدایت الکتریکی محلول آب شور (دسی‌زیمنس بر متر)، و K درصد خلوص نمک (۰٫۸۶) را نشان می‌دهد. در جدول ۱ برخی خصوصیات شیمیایی آب غیر شور و شور می‌آید.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی آب غیر شور و شور

مدل/ تیمارها	EC (dS/m)	pH	K^+ (mg/l)	Na^+ (meq/l)	$Ca^{2+}+Mg^{2+}$ (meq/l)	Cl^- (mg/l)	SAR
آب غیر شور	۰٫۴	۷٫۴۷	۱٫۹	۱٫۴	۱۲٫۶	۷۲	۱٫۰۵
آب شور سطح اول	۳٫۵	۷٫۴۷	۲٫۸	۳۱٫۴	۱۲٫۷	۱۳۴۹	۱۲٫۴۵
آب شور سطح دوم	۵٫۷	۷٫۴۵	۳٫۲	۵۷٫۴	۱۲٫۹	۲۲۹۳	۲۲٫۶۰

برای همهٔ تیمارها تا مرحلهٔ هشت‌برگی آبیاری بر حسب ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در هر کرت صورت گرفت. با توجه به خصوصیات خاک مزرعه و نیاز آبی گیاه ذرت، دور آبیاری برابر چهار روز در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی ذرت (K_c) در دوره‌های ابتدایی، میانی، و انتهایی از نشریهٔ فائو ۵۶ به ترتیب برابر ۰٫۳، ۱٫۲، و ۰٫۶ استخراج شد (Allen *et al.*, 1998). مقدار مجاز تخلیهٔ رطوبت خاک ۰٫۷۵ در نظر گرفته شد (Doorenbos and Kassam, 1979). بافت خاک مزرعه لوم‌رسی بود. عمق ریشهٔ ذرت نیز، به سبب وجود لایهٔ نفوذناپذیر در خاک، ۶۰ سانتی‌متر تعیین شد. تبخیر- تعرق پتانسیل با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0 (به روش پنمن- مانتیث) و با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه به دست آمد. اولین آبیاری برای هر

Archive of SID

www.SID.ir

تیمار تناوبی با آب غیر شور آغاز شد. کاهش میزان تبخیر- تعرق گیاه در اثر تنش شوری با استفاده از ضریب تنش (رابطهٔ ۱) انجام شد (Allen *et al.*, 1998):

$$K_s = ۱ - \frac{b}{K_y}\left(EC_e - EC_{e-threshold}\right) \qquad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

K_s ضریب تنش ناشی از شوری، K_y ضریب حساسیت عملکرد محصول که مقدار آن برای گیاه ذرت ۱٫۲۵ است، b کاهش عملکرد برای هر دسی‌زیمنس بر متر افزایش شوری که مقدار آن برای گیاه ذرت ۰٫۰۷۴ است، $EC_{e\text{-threshold}}$ آستانهٔ تحمل شوری که مقدار آن برای ذرت علوفه‌ای ۱٫۸ دسی‌زیمنس بر متر است. مقادیر مذکور بر اساس نشریهٔ فائو ۵۶ (Allen *et al.*, 1998) استخراج شد. EC_e هدایت الکتریکی عصارهٔ اشباع خاک است (۱٫۵ برابر EC_{iw}، هدایت الکتریکی آب آبیاری). بنابراین برای شوری آب آبیاری ۳٫۵ و ۵٫۷ دسی‌زیمنس بر متر مقدار K_s به ترتیب برابر ۰٫۶ و ۰٫۸ به دست آمد و برای تعیین نیاز آبیاری در تبخیر- تعرق مرجع ضرب شدند. بدیهی است در شرایط بدون تنش این ضریب برابر ۱ است. برای محاسبهٔ نیاز آب‌شویی (LR) در آبیاری با آب غیر شور در این تحقیق با توجه به دور آبیاری ثابت و طولانی‌تر از آبیاری قطره‌ای مرسوم از رابطهٔ ۲ استفاده شد (Ayers and Westcot, 1989):

$$LR = \frac{EC_{iw}}{۵EC_e - EC_{iw}} \qquad \text{(رابطهٔ ۲)}$$

اولین آبیاری در ۲۳ تیرماه ۱۳۹۱ انجام شد و بیست و یک روز بعد تنش‌های شوری اعمال شد. در مجموع هفده آبیاری در طول فصل رشد انجام شد. برداشت و نمونه‌برداری از محصول هشتاد و چهار روز بعد از کاشت در مرحلهٔ خمیری شدن دانه‌ها انجام شد. وزن کل تر با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰٫۱ گرم اندازه‌گیری شد و سپس برای اندازه‌گیری وزن خشک گیاه نمونه‌ها در بسته‌های کاغذی گذاشته شدند و به مدت هفتاد و دو ساعت در آون در دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفتند. برای تعیین شوری خاک در انتهای فصل نمونه‌برداری از خاک با استفاده از آگر ضربه‌ای در سه عمق ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر برای هر تیمار صورت گرفت.

مدل AquaCrop

برای شبیه‌سازی فرایند رشد گیاه و شوری نیمرخ خاک از مدل AquaCrop 4.0، که سازمان خواربار جهانی (فائو) توسعه داده است، استفاده شد. این مدل قادر است میزان عملکرد محصول را در شرایط کم‌آبیاری و در صورت وجود تنش شوری تخمین بزند. برای محاسبهٔ میزان عملکرد محصول از رابطهٔ ۳، که بر اساس تبخیر- تعرق نسبی و همچنین بر اساس معادلهٔ بیلان آب عمل می‌کند، استفاده شد:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \qquad \text{(رابطهٔ ۳)}$$

Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر- تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر- تعرق است.

تنش شوری خاک ضریب رشد گیاه (Canopy Growth Coefficient, CGC) را نسبت به بیشینه کاهش می‌دهد. برای شبیه‌سازی تأثیر تنش شوری بر مقدار بیوماس، AquaCrop گروهی از ضریب‌های تنش را، که مبتنی بر توسعهٔ کانوپی و بسته شدن روزنه‌هاست، در نظر می‌گیرد. مدل جریان آب در داخل خاک را بر اساس معادلهٔ بیلان آبی به کار می‌گیرد که شامل فرایندهای رواناب، نفوذ، توزیع مجدد یا زهکشی داخلی، نفوذ عمقی، صعود مویینگی، و تبخیر- تعرق است. فرایندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی برای شبیه‌سازی حرکت نمک در خاک در نظر گرفته شد. حرکت نمک در خاک به دو صورت عمودی و افقی تحقق می‌پذیرد. برای حرکت عمودی نمک در خاک به سمت پایین از روابط زهکشی استفاده می‌شود و حرکت عمودی به سمت بالا بر اثر صعود مویینگی و تبخیر از سطح خاک صورت می‌پذیرد. برای حرکت افقی نمک در خاک، مدل از روابط پخش آب استفاده می‌کند (Steduto *et al.*, 2008). مدل AquaCrop وزن خشک کل گیاه (زیست‌توده) را شبیه‌سازی می‌کند. برای شبیه‌سازی عملکرد وزن تر ذرت علوفه‌ای، ابتدا مقادیر مادهٔ خشک شبیه‌سازی شد و سپس این مقادیر بر نسبت وزن خشک به وزن تر در هر تیمار تقسیم شد. نسبت وزن خشک به وزن تر به طور میانگین در نُه تیمار موجود برابر ۰٫۲۲ به دست آمد.

داده‌های ورودی مدل AquaCrop شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک، و مدیریت مزرعه است. داده‌های اقلیمی شامل چهار بخش میزان تبخیر- تعرق گیاه مرجع روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه، مقادیر بارندگی روزانه، و میانگین سالیانهٔ غلظت CO_2 است. از اطلاعات آماری سال ۱۳۹۱ ایستگاه هواشناسی کرج برای محاسبهٔ تبخیر- تعرق مرجع ET_o به روش پنمن- مانتیث (Allen *et al.*, 1998) استفاده شد. غلظت CO_2 موجود در اتمسفر از مقادیر محاسبه‌شده در مدل (اندازه‌گیری‌شده و تخمین‌زده‌شده از سال ۱۹۰۲ تا سال ۲۰۹۹ در رصدخانهٔ Mauna Loa واقع در هاوایی) به دست آمد. مقادیر بارندگی در فصل رشد نیز بسیار ناچیز و به صورت روزانه به مدل داده شد.

Archive of SID

www.SID.ir

داده‌های گیاهی دو نوع ورودی دارند که برخی از آن‌ها ثابت (Conservative) و برخی دیگر متغیر و غیر ثابت (Non-Conservative) هستند. مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای اکثر گیاهان زراعی به منزلهٔ پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند و با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده‌اند. همهٔ پارامترهای مربوط به مکان و پارامترهای ویژهٔ گیاهی، مانند حداکثر عمق ریشه، تراکم گیاه، زمان کاشت، و مدیریت آبیاری در گروه پارامترهای مخصوص کاربر (غیر ثابت) طبقه‌بندی می‌شوند که باید به‌درستی وارد شوند.

داده‌های مدیریتی مزرعه به دو بخش اصلی تقسیم شده‌اند: ۱. مدیریت مزرعه و حاصلخیزی آن و ۲. مدیریت آبیاری. حاصلخیزی مزرعه بدون محدودیت و به طور کامل در نظر گرفته شد. داده‌های مدیریت آبیاری شامل روش آبیاری و مقادیر و کیفیت آب آبیاری در طول فصل رشد است. از روش آبیاری قطره‌ای و مقادیر آب آبیاری و شوری آن در تیمارهای مختلف استفاده شد.

مدل SALTMED

اکثر مدل‌های طراحی‌شده برای یک سیستم آبیاری خاص یا یک فرایند خاص مثل حرکت آب و املاح، نفوذ، آب‌شویی، جذب آب توسط ریشه، یا ترکیبی از این‌ها طراحی شده است. مدل SALTMED 2010 با استفاده از سیستم‌های آبیاری مختلف انواع خاک و لایه‌بندی آن، محصولات مختلف، تدابیر مختلف مدیریت آب آبیاری (مثل اختلاط یا تناوب آب شور و شیرین)، نیاز آب‌شویی، و کیفیت آب این کمبود در طراحی مدل‌های موجود را تا حدی برطرف کرده است. مدل SALTMED شامل معادلات تبخیر- تعرق، جذب آب توسط گیاه، انتقال آب و املاح تحت سیستم‌های مختلف آبیاری، زهکشی، و ارتباط بین عملکرد محصول و مصرف آب است. تبخیر- تعرق با معادلهٔ پنمن مانتیث اصلاح‌شده محاسبه می‌شود (Allen *et al.*, 1998). در صورت نداشتن داده‌های هواشناسی (مانند دما، تابش، سرعت باد) و در صورت داشتن داده‌های تبخیر از تشت کلاس A، مدل SALTMED می‌تواند از این داده‌ها برای محاسبهٔ تبخیر- تعرق مرجع با توجه به روش فائو ۵۶ استفاده کند.

SALTMED نرخ واقعی جذب آب را بر اساس رابطه‌ای که Cardon and Letey (1992) پیشنهاد کردند (رابطهٔ ۴) محاسبه می‌کند:

(رابطهٔ ۴)

$$S(z,t)=\left[\frac{S_{max}(t)}{1+\left(\frac{a(t)h+\pi}{\pi_{50}(t)}\right)^{3}}\right]\lambda(z,t)$$

(رابطهٔ ۴ الف)

$$\lambda(z)=\frac{5}{3}L \quad for \quad z\le 0/2L$$

(رابطهٔ۴ ب)

$$\lambda(z)=\frac{25}{12}L\times\left(1-\frac{z}{L}\right) \quad for \quad 0/2L<z\le L$$

$$\lambda(z)=0/0 \quad for \quad z>L$$

(رابطهٔ ۴ ج)

S جذب آب (d^{-1})، $S_{max}(t)$ حداکثر پتانسیل جذب آب توسط ریشه در زمان t، z عمق که رو به پایین مثبت در نظر گرفته می‌شود، λ(z) کسر وابسته به زمان و عمق جرم کل ریشه، L حداکثر عمق ریشه، h ارتفاع فشار ماتریک، π ارتفاع فشار اسمزی، $\pi_{50}(t)$ مقدار وابسته به زمان فشار اسمزی که در آن $S_{max}(t)$ به اندازهٔ ۵۰ درصد کاهش یافته است، a(t) ضریب وزنی که برای پاسخ دیفرانسیلی یک محصول به فشار محلول و ماتریک محاسبه می‌شود. ضریب a(t) برابر $\pi_{50}(t)/h_{50}(t)$ است که $h_{50}(t)$ فشار ماتریک در جایی است که $S_{max}(t)$ ۵۰ درصد کاهش یافته است.

به دلیل ارتباط تنگاتنگ بین جذب آب و تولید محصول نهایی، عملکرد نسبی محصول (RY) با مجموع جذب آب واقعی در طول فصل تقسیم بر مجموع حداکثر جذب آب (تحت شرایط بدون تنش) تخمین زده می‌شود. عملکرد واقعی (AY) به کمک رابطهٔ ۵ به دست می‌آید:

$$AY=RY\times Y_{max}$$

(رابطهٔ ۵)

Y_{max} حداکثر محصول قابل حصول تحت شرایط مساعد و بدون تنش است.

جریان آب انتقالی عمودی در یک بخش واحد و پایدار ناحیهٔ ریشه با معادلهٔ ریچاردز توصیف می‌شود. نرخ و جهت حرکت محلول در سیستم خاک عمدتاً به مسیر حرکت آب بستگی دارد. اما توسط پخشیدگی و انتشار هم مشخص می‌شود. با ترکیب انتشار و پخشیدگی و همرفت، شار کل جریان (J) با توجه به رابطهٔ Hillel (1977) به دست می‌آید (رابطهٔ ۶):

$$J=-(D_h+D_s)(\partial c/\partial x)+\bar{v}\theta c$$

(رابطهٔ ۶)

c غلظت جسم حل‌شده در حلال آب، $\bar{v}$ سرعت متوسط

Archive of SID

www.SID.ir

جریان (متر بر ثانیه)، D_s ضریب پخشیدگی، و D_h ضریب انتشار املاح در خاک است.

داده‌های ورودی مدل شامل خصوصیات خاک (شامل عمق هر افق خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت خاک اشباع، ضریب پخشیدگی خاک، ضریب انتشار طولی و عرضی، رطوبت و شوری اولیهٔ نیمرخ خاک، داده‌های جدول‌بندی‌شدهٔ مقادیر رطوبت خاک در مقابل پتانسیل آب خاک، و رطوبت خاک در مقابل هدایت هیدرولیکی)، خصوصیات گیاه (ضریب گیاهی K_c، K_{cb}، عمق ریشه و گسترش جانبی، ارتفاع گیاه و عملکرد نهایی حداکثر پتانسیل مشاهده‌شده در منطقه تحت شرایط بهینه، حداکثر و حداقل عمق ریشه، تاریخ روزهای کاشت و جوانه‌زنی و برداشت، مدت مراحل رشد گیاهی، شاخص سطح برگ، و شاخص برداشت)، داده‌های هواشناسی (شامل مقادیر روزانهٔ دمای بیشینه، دمای کمینه، رطوبت نسبی، تابش خالص، سرعت باد، و بارش روزانه)، مدیریت آبیاری (شامل نوع سیستم آبیاری، تاریخ و مقدار آب آبیاری اعمال‌شده، و سطح شوری و نیتروژن آن)، و پارامترهای مدل (شامل تعدادی از فضاهای جهت عمودی و افقی، پارامترهای اعوجاج، پارامترهای پخشیدگی، پارامترهای جذب، موقعیت گیاه نسبت به منبع تغذیهٔ آبیاری، و حداکثر گام زمانی برای محاسبه) است. در صورت نبود اطلاعات دقیق، پایگاه داده‌های مدل با بیش از دویست نوع گیاه و چهل نوع خاک مختلف موارد پیش‌فرض را ارائه می‌دهد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها

واسنجی و صحت‌سنجی دو مدل با استفاده از داده‌های تیمار اول (F) انجام شد. بدین منظور داده‌های ورودی در اختیار مدل قرار گرفت. با توجه به اینکه در تیمار اول تنش شوری وجود نداشت، عملکرد محصول در تیمار اول برای تیمارهای بعدی به منزلهٔ دادهٔ ورودی حداکثر میزان عملکرد محصول در شرایط بدون تنش در نظر گرفته شد. با استفاده از مؤلفه‌های گیاهی اندازه‌گیری‌شده، عملکرد محصول در پایان فصل زراعی، و نیز داده‌های ورودی خاک تلاش شد در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نزدیک‌ترین نتایج به مقادیر مشاهده‌ای حاصل شود. مرحلهٔ صحت‌سنجی نیز با استفاده از سایر تیمارها انجام شد.

ارزیابی مدل‌ها

ارزیابی مدل‌ها در تخمین عملکرد محصول و شوری خاک با استفاده از شاخص‌های خطای نسبی[1] (RE)، ضریب باقی‌مانده[2] (CRM)، و ضریب تبیین (R^2) به کمک روابط ۷ تا ۹ انجام شد:

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times ۱۰۰ \qquad \text{(رابطهٔ ۷)}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=۱}^{n} O_i - \sum_{i=۱}^{n} P_i}{\sum_{i=۱}^{n} O_i} \times ۱۰۰ \qquad \text{(رابطهٔ ۸)}$$

$$R^۲ = \frac{\left[\sum_{i=۱}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)\left(P_i - \overline{P}\right)\right]^۲}{\sum_{i=۱}^{n}\left(O_i - \overline{O}\right)^۲ \times \sum_{i=۱}^{n}\left(P_i - \overline{P}\right)^۲} \qquad \text{(رابطهٔ ۹)}$$

P_i مقادیر تخمینی مدل، O_i مقادیر مشاهده‌ای، n تعداد مشاهدات، $\overline{P}$ میانگین مقادیر P_i، و $\overline{O}$ میانگین مقادیر O_i است. ضریب تبیین نشان‌دهندهٔ نسبت پراکندگی میان مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی و شاخص CRM بیانگر تمایل مدل (در حالت کلی) برای بیش‌برآورد (مقادیر منفی) یا کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌هاست (Loague and Green, 1991).

یافته‌ها و بحث

واسنجی مدل‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی و واسنجی مدل AquaCrop برای پارامترهای ثابت گیاهی از مقادیر پیش‌فرض برای گیاه ذرت استفاده شد. مقادیر داده‌های متغیر در جدول ۲ می‌آید:

داده‌های خصوصیات خاک ورودی به مدل (واسنجی‌شده) در جدول ۳ می‌آید. برای سایر داده‌های خاک از مقادیر پیش‌فرض استفاده شد. رطوبت اولیهٔ خاک در حد پژمردگی دائم در نظر گرفته شد.

در جدول ۴ برخی داده‌های گیاهی (واسنجی‌شده) ورودی مدل SALTMED می‌آید. برای داده‌های خاک نیز همانند مدل AquaCrop از جدول ۳ استفاده شد. سایر داده‌ها بر اساس شبیه‌سازی مدل با استفاده از این داده‌ها و مقادیر پیش‌فرض موجود در پایگاه داده‌های مدل بود. داده‌هایی مثل شوری آب آبیاری، مقدار آبیاری، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی، بارش، و رطوبت نسبی در طول زمان تغییر می‌کرد و به صورت فایل داده‌ها در مدل وارد شد.

1. Relative Error
2. Coefficient of Residual Mass

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. مقادیر پارامترهای گیاهی استفاده‌شده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی ۹۰٪	۶٫۵	سانتی‌متر مربع	واسنجی
بیشینهٔ رشد کانوپی	۹۶	درصد	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۶۰	سانتی‌متر	واسنجی
بهره‌وری آب	۳۳٫۷	گرم بر متر مربع	پیش‌فرض
حد پایین آستانهٔ شوری	۲	دسی‌زیمنس بر متر	پیش‌فرض
حد بالای آستانهٔ شوری	۱۰	دسی‌زیمنس بر متر	پیش‌فرض
شاخص برداشت مرجع	۴۸	درصد	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۶	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا بیشینهٔ رشد کانوپی	۷۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۸۴	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دورهٔ پیری	۱۰۱	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا بلوغ	۱۲۵	روز	واسنجی

جدول ۳. داده‌های خاک استفاده‌شده در مدل AquaCrop.

توضیح پارامتر	مقدار	واحد
وزن مخصوص ظاهری	۱٫۳۵	گرم بر سانتی‌متر مربع
بافت		لوم‌رسی
عمق خاک زراعی	۶۰	سانتی‌متر
شوری اولیه	۲٫۰	دسی‌زیمنس بر متر
دبی آبیاری	۴	لیتر در ساعت
رطوبت اشباع	۰٫۶۲	گرم بر گرم
رطوبت ظرفیت زراعی	۰٫۳۶	گرم بر گرم
هدایت هیدرولیکی	۱۰۰	میلی‌متر بر ساعت

جدول ۴. داده‌های ورودی به مدل SALTMED.

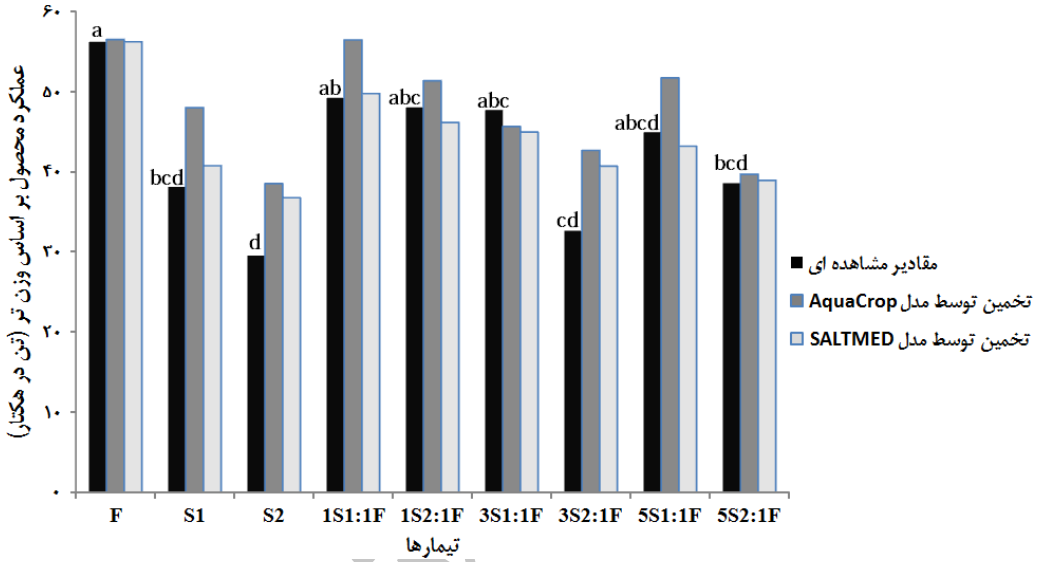
توضیح پارامتر	مقدار	واحد
حداکثر طول ریشه	۶۰	سانتی‌متر
حداکثر عملکرد محصول	۵۶٫۲	تن در هکتار
ضرایب گیاهی اولیه، میانی، و انتهایی	۰٫۶و۱٫۰،۲٫۳	-
طول روزدوره‌های ابتدایی، توسعه، میانی، و انتهایی	۲۰،۳۰،۳۰،۴	روز
کل دورهٔ رشد	۸۴	روز

عملکرد محصول

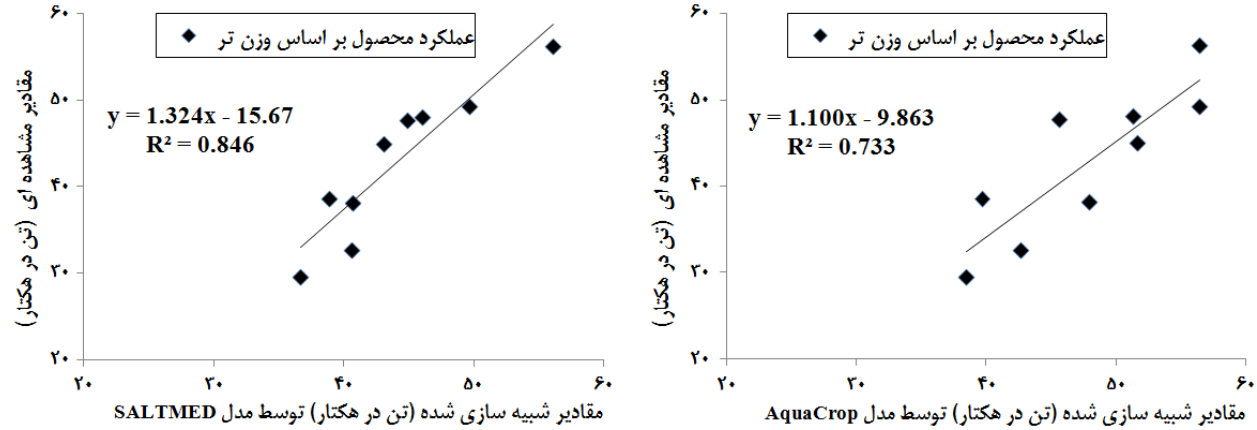
نتایج مطالعهٔ میدانی نشان داد با افزایش تنش شوری عملکرد محصول کاهش می‌یابد و با استفاده از مدیریت‌های استفادهٔ تناوبی از آب شور و شیرین این تنش می‌تواند تقلیل یابد و عملکرد محصول در مقایسه با استفادهٔ ثابت از آب شور افزایش یابد. بر این اساس تیمارهای F و S2 به ترتیب دارای بیشترین و کمترین عملکرد محصول بودند. همچنین مقایسهٔ میانگین‌های مقادیر مشاهده‌ای عملکرد وزن تر به روش آزمون دانکن نشان داد هرچند تیمار F بیشترین عملکرد را دارد، تفاوت معناداری با تیمارهای 1S1:1F، 1S2:1F، 3S1:1F، و 5S1:1F ندارد (شکل ۲). این بدان معنی است که استفاده از مدیریت‌های تناوبی آب شور و غیر شور یک‌درمیان در دو سطح شوری و مدیریت‌های سه‌درمیان و پنج‌درمیان در سطح شوری ۳٫۵ دسی‌زیمنس بر متر به منظور دستیابی به عملکرد محصول مطلوب قابل توصیه است. مدل‌های AquaCrop و SALTMED برای همهٔ تیمارها اجرا شد و مقادیر مشاهده‌شدهٔ عملکرد محصول در مطالعهٔ میدانی و شبیه‌سازی‌شده توسط دو مدل مقایسه شد. در شکل ۲ شبیه‌سازی خوب و رضایت‌بخش هر دو مدل در عملکرد محصول برای تیمارهای مختلف می‌آید. با توجه به اینکه مدل در شرایط تنش شوری از معادلات و روابط بیشتری برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند، دلیل احتمالی دقت کم شبیه‌سازی در تیمارهای دارای تنش شوری خطای تجمعی مدل بعد از استفاده از روابط مختلف است. نتایج نشان داد همبستگی مناسبی بین مقادیر تخمینی و مشاهداتی برای هر دو مدل

Archive of SID
www.SID.ir

وجود دارد؛ طوری که مقدار ضریب تبیین برای عملکرد محصول در مدل AquaCrop برابر ۰٫۷۳۳ و برای مدل SALTMED برابر ۰٫۸۴۶ به دست آمد (شکل ۳). همچنین مقدار ضریب CRM برای مدل‌های AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۱۱٫۸- و ۳٫۲- درصد به دست آمد که نشان‌دهندهٔ بیش‌برآورد در هر دو مدل نسبت به داده‌های مشاهده‌ای عملکرد محصول است. یکی از علت‌هایی که مدل در تخمین عملکرد محصول بیش‌برآورد داشت احتمالاً قلیایی بودن آب آبیاری است (جدول ۱). هیچ‌یک از دو مدل نمی‌توانند قلیاییت آب آبیاری را در نظر بگیرند؛ به همین دلیل مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ عملکرد محصول بیشتر از مقادیر شبیه‌سازی‌شده بود. Pulvento *et al.* (2013)، Rameshwaran *et al.* (2015)، و Aly *et al.* (2015) برای مدل SALTMED و تحقیقات Heng *et al.* (2009)، Katerji *et al.* (2013)، و Ziaii *et al.* (2014) برای مدل AquaCrop بیش‌برآورد در عملکرد محصول را گزارش کردند.



شکل ۲. مقایسهٔ مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی عملکرد محصول توسط مدل‌های AquaCrop و SALTMED برای هر تیمار
حروف انگلیسی مشترک نشان‌دهندهٔ عدم تفاوت معنادار هر تیمار بر اساس آزمون دانکن است.



شکل ۳. همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی عملکرد محصول توسط مدل‌های AquaCrop (راست) و SALTMED (چپ) برای نُه تیمار مطالعه‌شده

مقادیر R^2 متفاوتی برای عملکرد محصول با استفاده از مدل SALTMED در شرایط تنش شوری گزارش شده است. مقدار R^2 گزارش‌شده توسط Rameshwaran *et al.* (2015) از ۰٫۸۱ تا ۰٫۹۳ متغیر بود. Akbari Fazli *et al.* (2013) با استفاده از این مدل تحت شرایط اعمال زهاب در مراحل پایانی رشد گندم مقدار R^2 برابر ۰٫۹۹ را برای عملکرد دانه گزارش کردند. مقدار ضریب R^2 برای عملکرد محصول توسط مدل AquaCrop تحت شرایط تنش شوری نیز در مطالعات مختلفی گزارش شده است. Khorsand *et al.* (2014) مقدار ضریب R^2 را برابر ۰٫۹۵ گزارش دادند. Kumar *et al.* (2014) عملکرد گندم را تحت رژیم‌های مختلف آب شور توسط این مدل پیش‌بینی و مقدار R^2 را برای عملکرد دانه ۰٫۹۴ گزارش کردند. در مطالعهٔ Masanganise *et al.* (2013) مقدار ضریب R^2 برای عملکرد محصول ذرت برابر ۰٫۷۲۷ به دست آمد. در مجموع و با توجه به

www.SID.ir

مطالعات مختلف، مقدار ضریب تبیین در تحقیق حاضر برای عملکرد محصول برای هر دو مدل مناسب بود و مدل SALTMED در شرایط تنش شوری در مقایسه با مدل AquaCrop نسبتاً عملکرد بهتری داشت.

مقادیر خطای نسبی عملکرد محصول برای هر تیمار در جدول ۵ می‌آید. مقدار خطای نسبی در مرحلهٔ واسنجی برای مدل AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۰٫۵ و ۰٫۰ درصد به دست آمد. در مرحلهٔ صحت‌سنجی حداکثر خطای نسبی به‌دست‌آمده از دو مدل AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۳۰٫۸ و ۲۴٫۷ درصد برای تیمار 3S2:1F و حداقل خطای نسبی به‌دست‌آمده برای دو مدل نام‌برده به ترتیب ۲٫۹ و ۰٫۹ درصد برای تیمار 5S2:1F بود. میانگین مقادیر قدر مطلق خطای نسبی (|RE|) دو مدل AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۱۶٫۳ و ۹٫۰ درصد به دست آمد که نشان‌دهندهٔ عملکرد بهتر مدل SALTMED در تخمین عملکرد محصول بود. تفاوت عملکرد این دو مدل را می‌توان متفاوت بودن معادلات حاکم و ساختار محاسبات در تخمین عملکرد محصول دانست.

جدول ۵. درصد خطای نسبی (RE) تخمین عملکرد محصول در هر تیمار برای دو مدل AquaCrop و SALTMED

مدل	تیمار واسنجی	تیمارهای صحت‌سنجی							میانگین مقادیر |RE| در مرحلهٔ صحت‌سنجی
	F	S1	S2	1S1:1F	1S2:1F	3S1:1F	3S2:1F	5S1:1F	5S2:1F
AquaCrop	۰٫۵	۲۵٫۹	۳۰٫۴	۱۴٫۷	۶٫۹	-۴٫۳	۳۰٫۸	۱۵٫۰	۲٫۹	۱۶٫۳
SALTMED	۰٫۰	۶٫۹	۲۴٫۴	۱٫۱	-۳٫۹	-۵٫۸	۲۴٫۷	-۳٫۹	۰٫۹	۹٫۰

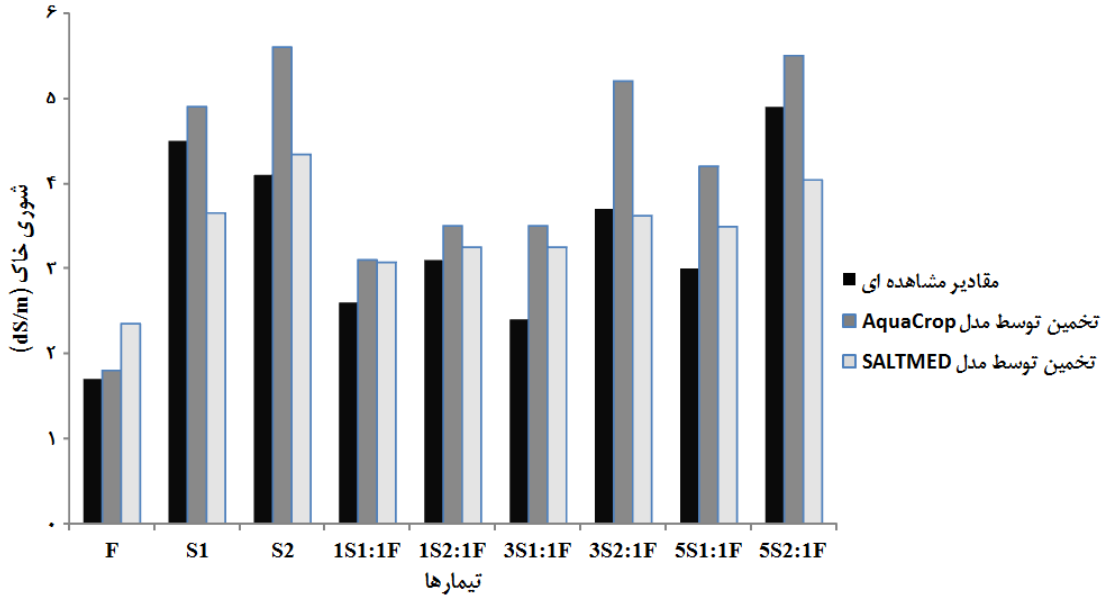
مقادیر درصد خطای متفاوتی برای عملکرد محصول با استفاده از مدل SALTMED در شرایط تنش شوری گزارش شده است. Ragab *et al.* (2005b) مقادیر قدر مطلق خطای نسبی (|RE|) را از ۰٫۰۰ تا ۲۱٫۴۹ (میانگین ۵٫۷۳) درصد در مصر گزارش دادند. Razzaghi *et al.* (2011) مقادیر |RE| عملکرد دانهٔ گندم را از ۰٫۸۴ تا ۲٫۱۶ (میانگین ۱٫۴۸) درصد اعلام کردند. مقدار خطای نسبی برای عملکرد محصول توسط مدل AquaCrop تحت شرایط تنش شوری نیز در مطالعات معدودی گزارش شده است. Khorsand *et al.* (2014) میانگین |RE| را برابر ۴٫۴۸ درصد گزارش دادند. Kumar *et al.* (2014) مقادیر |RE| را از ۹٫۹۹ تا ۲۹٫۲۵ (میانگین ۱۹٫۹۴) درصد برای بیوماس گندم اعلام کردند و اظهار داشتند با افزایش شوری آب آبیاری خطای مدل نیز افزایش می‌یابد. در مجموع و با توجه به مطالعات مختلف، در تحقیق حاضر پیش‌بینی هر دو مدل در عملکرد محصول (به جز تیمارهای S2 و 3S2:1F) از دقت خوبی برخوردار بود.

شوری نیمرخ خاک

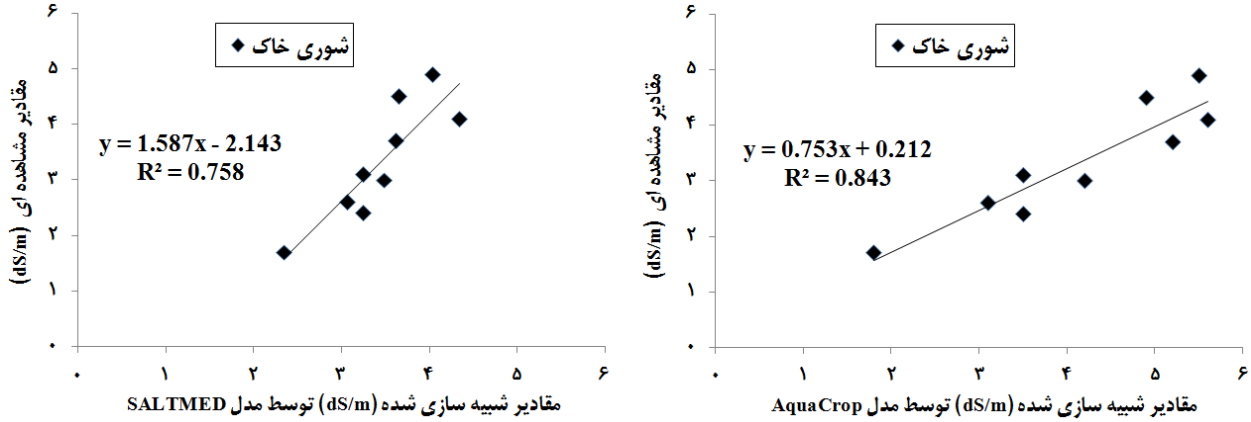
مدل‌های AquaCrop و SALTMED برای برآورد شوری نیمرخ خاک برای همهٔ تیمارها اجرا و با مقادیر مشاهده‌ای ارزیابی شد (شکل ۴). داده‌های مشاهده‌ای، میانگین شوری خاک در سه عمق ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر است که در انتهای فصل رشد (دو روز بعد از برداشت محصول) اندازه‌گیری شد. همچنین معادلهٔ همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی توسط دو مدل برازش داده شد (شکل ۵) و مقدار ضریب تبیین برای مدل AquaCrop برابر ۰٫۸۴۳ و در مدل SALTMED برابر ۰٫۷۵۸ به دست آمد. مقادیر خطای نسبی شوری خاک برای هر تیمار در جدول ۶ می‌آید. مدل AquaCrop در تیمارهای S2، 3S1:1F، 3S2:1F، و 5S2:1F و مدل SALTMED در تیمارهای F و 3S1:1F خطای زیادی داشت؛ طوری که حداکثر خطای نسبی برای مدل AquaCrop در تیمار 3S1:1F با مقدار ۴۰٫۵ درصد و برای مدل SALTMED در تیمار F با مقدار ۳۸٫۲ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد مدل SALTMED مقدار خطای نسبی کمتری نسبت به مدل AquaCrop دارد. اما مدل AquaCrop نسبت به مدل SALTMED همبستگی بهتری میان داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی داشت و روند تغییرات شوری را بهتر شبیه‌سازی کرد. مقدار ضریب CRM در تخمین مقادیر شوری خاک برای مدل‌های AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۲۴٫۳- و ۳٫۵- درصد به دست آمد که نشان‌دهندهٔ بیش‌برآورد در هر دو مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده است. برخلاف نتایج، Golabi *et al.* (2009) و Mohammadi *et al.* (2014) برای مدل SALTMED و Khorsand *et al.* (2014) برای مدل AquaCrop کم‌برآورد مقادیر شوری خاک را گزارش کردند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴. مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری‌شده و تخمینی شوری خاک توسط مدل‌های AquaCrop و SALTMED برای هر تیمار



شکل ۵. همبستگی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و تخمینی شوری خاک توسط مدل‌های AquaCrop (راست) و SALTMED (چپ) برای نُه تیمار

جدول ۶. درصد خطای نسبی (RE) تخمین شوری خاک در هر تیمار برای دو مدل AquaCrop و SALTMED

مدل/ تیمارها	F	S1	S2	1S1:1F	1S2:1F	3S1:1F	3S2:1F	5S1:1F	5S2:1F	میانگین مقادیر |RE|
AquaCrop	۵/۹	۸/۹	۳۶/۶	۱۹/۲	۱۲/۹	۴۵/۸	۴۰/۵	۴۰/۰	۱۲/۲	۲۴/۷
SALTMED	۳۸/۲	-۱۸/۹	۵/۹	۱۸/۱	۴/۸	۳۵/۴	-۲/۲	۱۶/۳	-۱۷/۶	۱۷/۵

در مطالعات معدودی عملکرد مدل SALTMED در مقادیر شوری خاک ارزیابی شده است. Golabi *et al.*(2009) در بررسی شوری خاک شش مزرعهٔ نیشکر بیشترین و کمترین مقدار R^2 را به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۷۹ (میانگین ۰/۹۱) گزارش کردند. مقادیر R^2 را Razzaghi *et al.* (2011) برای اعماق ۴۰ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر خاک به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۱ گزارش دادند. Mehanna *et al.* (2012) مقادیر R^2 را از ۰/۸۱ تا ۰/۹۱ اعلام کردند. Akbari Fazli *et al.* (2013) مقادیر R^2 را برابر ۰/۹۲ گزارش دادند. Mohammadi *et al.* (2014) رطوبت و شوری خاک را با استفاده از مدل SALTMED در شرایط اقلیمی سیستان شبیه‌سازی و مقادیر قدر مطلق خطای نسبی را از ۱/۱ تا ۲۸/۵ (میانگین ۱۷/۰) درصد گزارش دادند. Aly و همکاران (2015) مقادیر R^2 میان داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی شوری خاک را در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر برابر ۰/۷۴ و در عمق ۴۵ تا ۷۵ سانتی‌متر برابر ۰/۹۳ اعلام کردند. قدر مطلق خطای نسبی شوری خاک از ۰/۰ تا ۵۰/۰ (میانگین ۱۳/۷) درصد متغیر بود. با توجه به نتایج مطالعات انجام‌شده، می‌توان نتیجه گرفت عملکرد مدل SALTMED در تحقیق حاضر مناسب بود. در خصوص شبیه‌سازی شوری خاک با مدل AquaCrop، با توجه به جدید بودن این قابلیت در نسخهٔ اخیر، این مدل فقط در مطالعهٔ Khorsand *et al.* (2014) مقدار R^2 برابر ۰/۵۴ و میانگین خطای نسبی ۵۷/۴ درصد را برای شوری خاک داشت. در تحقیق حاضر مقادیر R^2 و خطای نسبی مقادیر مناسب‌تری نشان داد. یکی از دلایل نتیجه‌گیری ضعیف مدل AquaCrop در

Archive of SID
www.SID.ir

شبیه‌سازی شوری می‌تواند معادلات حاکم بر پدیدهٔ انتقال املاح باشد. عوامل مختلفی مانند انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح، و تخریب املاح بر انتقال املاح در نیمرخ خاک مؤثرند؛ در حالی که در مدل AquaCrop فقط فرایندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته شده است (Khorsand *et al.*, 2014).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، دو مدل AquaCrop و SALTMED در شرایط استفاده از آب شور در تناوب با آب شیرین برای کشت گیاه ذرت علوفه‌ای در منطقهٔ کرج مقایسه و ارزیابی شد. بدین منظور عملکرد محصول و پروفیل شوری خاک در نُه تیمار مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد همبستگی مناسبی بین مقادیر تخمینی و مشاهداتی برای هر دو مدل وجود دارد؛ طوری که مقدار ضریب تبیین برای عملکرد محصول در مدل AquaCrop برابر ۰٫۷۳۳ و برای مدل SALTMED برابر ۰٫۸۴۶ به دست آمد. میانگین مقادیر قدر مطلق خطای نسبی عملکرد محصول در مرحلهٔ صحت‌سنجی برای دو مدل AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۱۶٫۳ و ۹٫۰ درصد بود که توانایی نسبتاً خوب دو مدل را در شبیه‌سازی عملکرد ذرت نشان می‌دهد. در بعضی تیمارها شوری خاک توسط دو مدل خطای نسبی زیادی داشت. اما هر دو مدل روند مناسبی از شبیه‌سازی شوری خاک ارائه دادند. مقدار ضریب تبیین برای مدل‌های AquaCrop و SALTMED به ترتیب ۰٫۸۴۳ و ۰٫۷۵۸ به دست آمد. مقدار خطا در مدل SALTMED کمتر از مدل AquaCrop، اما روند شبیه‌سازی شوری خاک در مدل AquaCrop بهتر بود. به طور کلی می‌توان گفت مدل‌های AquaCrop و SALTMED ابزارهایی مفید برای مدیریت و پیش‌بینی اثر تنش شوری‌اند و هر دو مدل به‌خوبی توانستند جریان آب را در خاک در اثر آبیاری، انتقال نمک در خاک، و جذب آب توسط گیاه در شرایط تنش شوری در فصل رشد به‌خوبی شبیه‌سازی کنند. با وجود این، به علت اینکه تأثیر تنش شوری به‌تازگی به قابلیت مدل AquaCrop اضافه شده است و حالت آزمایشی دارد، تحقیقات بیشتری نیاز است تا کارآیی این مدل در شرایط مختلف تنش شوری بررسی شود.

REFERENCES

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

Akbari Fazli, R., Gholami, A., Andarzian, B., Ghoosheh, M., and Darvishpasand, Z. (2013). Investigating the effect of applying drainaged water on wheat yield using SALTMED model. *Journal of Novel Applied Sciences*, 2(S3), 1003-1011.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO

Aly, A. A., Al-Omran, A. M., and Khasha, A. A. (2015). Water management for cucumber: Greenhouse experiment in Saudi Arabia and modeling study using SALTMED model. *Journal of soil and water conservation*, 70(1), 1-11.

Ayers, R. S. and Westcot, D. W. (1989) *Water quality for agriculture*. Rome: FAO

Cardon, E. G. and Letey, J. (1992). Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society American Journal* 56,1876-1880.

Doorenbos, J. and Kassam, A. H. (1979) *Yield response to water*. Rome: FAO

Food and Agriculture Organization. (2012). *AquaCrop update version 4.0*. Rome: FAO

Golabi, M., Naseri, A. A., and Kashkuli, H. A. (2009). Evaluation of SALTMED model performance in irrigation and drainage of sugarcane farms in Khuzestan province of Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(2), 874-880.

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. *Agronomy Journal*, 101, 488–498.

Hillel. D. (1977). Computer simulation of soil-water dynamics; a compendium of recent work. Ottawa: IDRC

Hirich, A., Choukr-Allah, R., Ragab, R., Jacobsen, S-E., EL-Youssfi, L., and El-Omari, H. (2012). The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, 3(2), 342-359.

Katerji, N., Campi, P., and Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14– 26.

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. *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. *Irrigation and Drainage*, 63, 474–487.

Loague, K. and Green, R. E. (1991) Statistical and graphical methods for evaluating solute transport

Archive of SID

www.SID.ir

models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7, 51-73.

Masanganise J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E., and Mhizha, T. (2013). Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*, 3(4), 157-163.

Mehanna, H. M., Sabreen, R. H. P., and El-Hagarey, M. E. (2012). Validation of SALTMED model under different conditions of drought and fertilizer for snap bean in delta, Egypt: Minta International Conferencefor Agdculture ana Irrigation in the Nile Basin Countries, 26-29 March, El-Minia, Egypt.

Mohammadi, E., Hassanli, M., Gharahdaghi, M. M., and Mohammadi, M. (2014) Evaluation of soil moisture and salinity using SALTMED model in the climation condition of Sistan: 2nd Iranian Conference on Agricultural Soil and Water Management, 20-21 May, Karaj, Iran (In Farsi).

Montenegro, S. G., Montenegro, A., and Ragab, R. (2010). Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. *Irrigation Science*, 28, 301-316.

Oster, J. D., Letey, J., Vaughan, P., and Wu, L., Qadir, M. (2012). Comparison of transient state models that include salinity and matric stress effects on plant yield. *Agricultural Water Management*, 103,167-175.

Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., Andria, R. D., and Ragab, R. (2013) SALTMED model to simulate yield and dry matter for quinoa crop and soil moisture content under different irrigation strategies in south Italy. *Irrigation and Drainage*, 62, 229–238.

Ragab, R. (2002). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, 17,345-361.

Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arsalan, A., and Ghaibeh, A. (2005a). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management 1-The SALTMED model and its calibration using field data from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, 78, 67-88.

Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arsalan, A., and Ghaibeh, A. (2005b). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management 2-The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, 78, 89-107.

Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A., and Ragab, R. (2014) The effect of saline irrigation water on the yield of pepper: experimental and modeling study. *Wiley Online Library*: Retrieved February 18, 2015, from http:// onlinelibrary. wiley. com/ doi/ 10. 1002/ird.1867/abstract

Razzaghi, F., Plauborg, F., Ahmadi, S. H., Jacobsen, S-E., Anderson, M. N., and Ragab, R. (2011). Simulation of quinoa (chenopodium quinoa wild.) response to soil salinity using the SALTMED model. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 15-23 Oct., Tehran, Iran.

Silva, L. L., Ragab, R., Duarte, I., Lourenc, E., Simo˜es, N., and Chaves, N. N. (2013). Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. *Irrigation Science*, 31, 651–659.

Smedema L. K. and Rycroft. D. W. (1983). *Land drainage: Planning and design of agricultural drainage systems*. Cornell University Press: Ithaca N.Y

Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L., Izzi, G., and Hoogeveen, J. (2008). AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes*, 80(A), 285-292.

Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., and Maksimovic, L. (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*, 98, 1615– 1621.

Tyagi, N. K. (2003) Managing saline and alkali water for higher productivity. In Kijne, J. W., Barker, R., Molden, D. (Eds.), Water Productivity in Agriculture: *Limits and Opportunities for Improvement*. (pp. 69–88). CABI: Wallingford.

Ziaii, Gh., Babazadeh, H., Abbasi, F., and Kaveh, F. (2014) Evaluation of the AquaCrop and CERES-Maize models in assessment of soil water balance and maize yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4), 435-445 (In Farsi).

Archive of SID

www.SID.ir