

شبیه‌سازی شوری خاک و عملکرد ذرت در شرایط کاربرد آب شور با استفاده از مدل‌های SWAP و SALTMED

محمد مهدی قره‌داغی^{۱*}، سید محمود طباطبایی و محمد حسن‌لی

دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه زابل.

mehdi_gharahdaghi@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه زابل.

smtabataba2000@yahoo.com

دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه زابل.

hassanli@alumni.ut.ac.ir

چکیده

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یکی از راه‌کارهای پیش‌بینی اثرات آب‌های شور بر عملکرد محصول و شوری خاک می‌باشد. در این تحقیق شوری خاک و عملکرد ذرت علوفه‌ای در شرایط آبیاری با آب شور با استفاده از دو مدل SWAP و SALTMED ارزیابی شدند. بدین منظور آزمایش‌های مزرعه‌ای در تیمارهای مختلف استفاده ثابت و تناوبی آب شور و غیر شور (با اعمال آب غیر شور در تناوب یک در میان، سه در میان و پنج در میان آب شور) در دو سطح شوری ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر در منطقه‌ی کرج انجام شد. هدایت الکتریکی آب غیر شور ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. عملکرد محصول و شوری خاک اندازه‌گیری و توسط دو مدل مذکور شبیه‌سازی شد. مقدار ضریب تبیین (R^2) برای شوری خاک و عملکرد محصول در مدل SWAP به ترتیب ۰/۷۵۴ و ۰/۵۸۷ و برای مدل SALTMED به ترتیب برابر ۰/۷۵۸ و ۰/۸۴۶ به دست آمد. قدر مطلق خطای نسبی ($|RE|$) مدل SWAP در تخمین عملکرد محصول از ۱/۷ تا ۲۶/۳ درصد و در تخمین شوری خاک از ۲/۵ تا ۳۲/۴ درصد متغیر بود. هم‌چنین $|RE|$ 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.

واژه‌های کلیدی: کاربرد تناوبی آب شور و غیر شور، آبیاری قطره‌ای، ذرت علوفه‌ای.

۱- آدرس نویسنده مسئول: زابل، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

* - دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۴ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۴

مقدمه

مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب و نمک در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی مناسب وضعیت رطوبت و نمک خاک هستند و می‌توان از آن‌ها در مطالعات آب و خاک استفاده کرد (دروگوز و همکاران، ۲۰۰۰). در سال‌های اخیر مدل‌های مختلفی برای مطالعه مدیریت آبیاری و شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک گسترش یافته است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل HYDRUS (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۸)، SWAP (کروز و همکاران، ۱۹۹۹) و SALTMED (رجب، ۲۰۰۲) اشاره کرد.

مدل SWAP به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد محصول، زهکشی، مدیریت آب در کشت آبی و بیلان آب در سیستم‌های هیدرولوژیکی و جریان آب و املاح در سیستم‌های هیدرولوژیکی کشاورزی در کشورهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. اساس مدل ارتباط فیزیکی پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه می‌باشد (سینگ و همکاران ۲۰۰۶). در مطالعه‌ای مدل‌های CERES، WOFOST و SWAP برای شبیه‌سازی رطوبت خاک و عملکرد محصول گندم زمستانه و جو بهار مورد مقایسه قرار داده شدند. مدل‌های CERES و SWAP بر خلاف مدل WOFOST عملکرد دانه‌ی گندم و جو را به خوبی شبیه‌سازی نمودند (ایتزینگر و همکاران، ۲۰۰۴). در پژوهشی شبیه‌سازی شوری خاک و انتقال املاح در شرایط کم‌آبیاری با آب شور با استفاده از مدل SWAP انجام شد و گزارش داده شد که این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در منطقه‌ی خشکی از چین برای ارزیابی بلند مدت شیوه‌ها و سناریوهای مختلف آبیاری به کار رود (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۱). در مطالعه‌ای دیگر استفاده از آب شور برای محصول گندم در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک هند با استفاده از مدل SWAP شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با استفاده از آب شور با شوری ۸/۰ دسی‌زیمنس بر متر به جای آب آبیاری با شوری ۳/۶ دسی‌زیمنس بر متر در مرحله‌ی قبل

از کاشت گندم می‌توان تا ۸۰ درصد عملکرد محصول پتانسیل را احراز کرد (ورما و همکاران، ۲۰۱۲). در پژوهشی دیگر شوری خاک و عملکرد محصول گندم تحت رژیم‌های آب شور با استفاده از مدل SWAP شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد مدل قادر است که شوری خاک در ناحیه‌ی ریشه و عملکرد محصول گندم را با دقت قابل قبولی تحت شرایط استفاده از آب شور شبیه‌سازی نماید (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). در ایران نیز در پژوهشی عملکرد گندم در شرایط کم‌آبیاری و شوری در منطقه‌ی بیرجند توسط مدل SWAP شبیه‌سازی شد و ضریب تبیین بین عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی ۰/۸۳ به دست آمد (نحوی‌نیا و همکاران، ۱۳۸۹). در مطالعه‌ای دیگر در منطقه‌ی درودزن کارآیی مصرف آب و عملکرد گندم با استفاده از مدل SWAP شبیه‌سازی شد و ضریب تبیین بین عملکرد شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی ۰/۹۸ به دست آمد (شیرشاهی و همکاران، ۱۳۹۳).

در مطالعه‌ای ارزیابی مدل SALTMED در مصر و سوریه برای محصول گوجه‌فرنگی با استفاده از آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای و تحت مدیریت‌های اختلاط و تناوب آب شور و غیرشور انجام شد و کارآیی مدل در مدیریت سیستم‌های آبیاری در مناطق مستعد شوری تأیید شد (رجب و همکاران، ۲۰۰۵). در مطالعه‌ای دیگر کارآیی مدل SALTMED در شبیه‌سازی سیستم‌های آبیاری و زهکشی مزارع نیشکر خوزستان بررسی شد. نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی شوری خاک وجود نداشت (گلایبی و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای در دانمارک شبیه‌سازی واکنش گیاه گنه‌گنه به شوری خاک و شوری آب آبیاری با استفاده از مدل SALTMED انجام شد. در این تحقیق عملکرد دانه با خطای نسبی ۰/۰۴- درصد شبیه‌سازی شد (رزاقی و همکاران، ۲۰۱۱). در پژوهشی مدل‌های ENVIRO- و UNSACHEM، SALTMED، HYDRUS، GRO و SWAP برای تعیین تأثیر تنش شوری و رطوبتی بر

که در آن:

$K_{y,k}$: ضریب حساسیت عملکرد در مرحله ی رشد k ،
 $T_{p,k}$: تعرق پتانسیل (سانتی متر) و $T_{a,k}$: تعرق واقعی
 (سانتی متر) در طول دوره k می باشد. عملکرد نسبی انتهای
 فصل رشد توسط مجموع هر مرحله رشد محاسبه می-
 شود. همرفت، انتشار و پخشیدگی سه فرآیند اصلی انتقال
 املاح به کار رفته در مدل می باشد (رابطه ۲):

$$J = qc = \theta \left(D_{dif} + D_{dis} \right) \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

که در رابطه بالا، J : جرم کل املاح عبوری در واحد سطح
 در واحد زمان ($g \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$)، q : جریان عمودی به
 پایین ($cm^{-2} \cdot day^{-1}$)، D_{dif} : ضریب پخشیدگی املاح
 ($cm^2 \cdot day^{-1}$)، D_{dis} : ضریب انتشار املاح ($cm^2 \cdot day^{-1}$) و
 $\frac{\partial c}{\partial z}$: شیب غلظت املاح است. در این مدل تأثیر شوری بر
 عملکرد محصول به دو طریق تعریف شده است: (۱)
 توسط یک حداقل سطح شوری بحرانی که تنش شوری
 رخ می دهد و (۲) توسط کاهش جذب آب ریشه در بالاتر
 از شوری بحرانی.

مدل SALTMED

مدل SALTMED 2010 با استفاده از
 سیستم های آبیاری مختلف، انواع خاک و لایه بندی آن،
 محصولات، تدابیر مختلف مدیریت آبیاری و کیفیت آب
 متفاوت، قادر به شبیه سازی رطوبت، شوری و نیتروژن
 خاک، عملکرد محصول، سهم آبشویی و سطح آب
 زیرزمینی می باشد. تبخیر-تعرق با استفاده از معادله پنمن
 مانیت اصلاح شده محاسبه می شود (آلن و همکاران،
 ۱۹۹۸). در صورت نداشتن داده های هواشناسی (مانند دما،
 تابش و سرعت باد) و در صورت داشتن داده های تبخیر از
 تشت کلاس A، مدل می تواند از این داده ها برای
 محاسبه ی تبخیر-تعرق مرجع با توجه به روش فائو ۵۶
 استفاده کند. SALTMED نرخ واقعی جذب آب را بر
 اساس رابطه کاردون ولتی (۱۹۹۲) محاسبه می کند:

عملکرد ذرت علوفه ای ارزیابی شدند. در تمامی سطوح
 شوری و آبیاری، مدل SALTMED عملکرد محصول را
 کمتر از سایر مدل ها شبیه سازی کرد و نتایج مدل های
 SWAP و HYDRUS شباهت زیادی داشتند (اوستر و
 همکاران، ۲۰۱۲). در پژوهشی دیگر عملکرد گنه گنه،
 نخود و ذرت شیرین با تیمارهای کم آبیاری با فاضلاب
 تصفیه شده با استفاده از مدل SALTMED شبیه سازی
 شد. عملکرد محصولات گنه گنه، نخود و ذرت شیرین با
 میانگین خطای نسبی به ترتیب ۳/۹۱، ۵/۷۵ و ۱۳/۸۲
 درصد شبیه سازی شد (اوستر و همکاران، ۲۰۱۲). در
 تحقیقی دیگر اثر آبیاری با آب شور بر عملکرد فلفل با
 استفاده از مدل SALTMED شبیه سازی شد. توانایی
 مدل در تخمین رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی متر و نیز
 عملکرد محصول به اثبات رسید (رامشوران و همکاران،
 ۲۰۱۴).

مدل SWAP

مدل SWAP 2.07 مدلی یک بعدی است که
 می تواند برای شبیه سازی جریان آب، املاح و گرما در
 خاک، ناهمگنی خاک، تبخیر-تعرق روزانه، رشد و
 عملکرد محصول و مدیریت آبیاری و زهکشی به کار رود
 (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). حرکت آب در خاک توسط
 معادله ریچاردز که ترکیبی از قانون داریسی و معادله
 پیوستگی است، شبیه سازی می شود. در این مدل سه گزینه
 شامل مدل تفصیلی گیاه، مدل تفصیلی چمن و مدل ساده
 گیاهی برای شبیه سازی رشد و عملکرد گیاه وجود دارد
 که در این تحقیق از گزینه سوم استفاده شد. در مدل ساده
 گیاهی، کانوبی سبز که موجب قطع بارش، نفوذ و سایه-
 اندازی می شود ملاک ورود داده ها می باشد. برای هر
 مرحله توسعه، عملکرد واقعی $Y_{a,k}$ (تن در هکتار) نسبت
 به عملکرد پتانسیل $Y_{p,k}$ (تن در هکتار) توسط معادله
 دورنباس و کسام (۱۹۷۹) محاسبه می شود:

$$1 - \left(\frac{Y_{a,k}}{Y_{p,k}} \right) = K_{y,k} \left(\frac{1 - T_{a,k}}{T_{p,k}} \right) \quad (1)$$

ضریب انتشار طولی و عرضی، رطوبت و شوری اولیه و داده‌های جدول‌بندی‌شده‌ی مقادیر رطوبت در مقابل پتانسیل آب خاک و رطوبت در مقابل هدایت هیدرولیکی)، خصوصیات گیاه (K_c و K_{cb} ، عمق ریشه و گسترش جانبی، ارتفاع گیاه و عملکرد نهایی حداکثر/پتانسیل مشاهده‌شده، تاریخ روزهای کاشت، جوانه‌زنی و برداشت، مدت مراحل رشد گیاهی، شاخص سطح برگ و شاخص برداشت)، داده‌های هواشناسی (مقادیر روزانه‌ی دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی، تابش خالص، سرعت باد و بارش)، مدیریت آبیاری (نوع سیستم آبیاری، تاریخ و مقدار آب آبیاری و سطح شوری و نیتروژن آن) و پارامترهای مدل (پارامترهای اعوجاج، پخشیدگی و جذب، موقعیت گیاه نسبت به منبع تغذیه‌ی آبیاری و حداکثر گام زمانی برای محاسبه) می‌باشد.

هدف از انجام این تحقیق، شبیه‌سازی عملکرد محصول و شوری خاک توسط دو مدل SWAP و SALTMED در شرایط استفاده از آب شور در تناوب با آب غیرشور برای محصول ذرت علوفه‌ای در منطقه کرج بود تا بتوان به قابلیت دو مدل مذکور در تخمین شوری خاک و عملکرد محصول در مدیریت‌های مختلف کاربرد آب شور و غیر شور پی برد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای در سال ۱۳۹۱ در یک فصل زراعی در مزرعه 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 دقیقه‌ی شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه‌ی شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۳۷ متر می‌باشد. کرج دارای آب و هوای مدیترانه‌ای با متوسط بارندگی سالیانه برابر ۲۶۵ میلی‌متر است. بارش قابل ملاحظه‌ای (بیش از یک میلی‌متر) در طول دوره اعمال تیمارها رخ نداد. آزمایش برای کشت ذرت علوفه‌ای

$$S(z,t) = \left[\frac{S_{\max}(t)}{1 + \left(\frac{a(t)h + \pi}{\pi(50)t} \right)^3} \right] \lambda(z,t) \quad (۳)$$

$$\lambda(z) = 5/3L \text{ for } z \leq 0.2L \quad (۳ \text{ الف})$$

$$\lambda(z) = 25/12L * (1-z/L) \text{ for } 0.2L < z \leq L \quad (۳ \text{ ب})$$

$$\lambda(z) = 0.0 \text{ for } z > L \quad (۳ \text{ ج})$$

که در آن:

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، $\lambda(z)$: 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 اندازه‌ی ۵۰٪ کاهش یافته است، a(t): ضریب وزنی که برای پاسخ دیفرانسیلی یک محصول به فشار محلول و ماتریک محاسبه می‌شود.

به دلیل ارتباط تنگاتنگ بین جذب آب و تولید محصول نهایی، عملکرد نسبی محصول با مجموع جذب آب واقعی در طول فصل تقسیم بر مجموع حداکثر جذب آب (تحت شرایط بدون تنش) تخمین زده می‌شود. عملکرد واقعی نیز با ضرب در حداکثر محصول قابل حصول تحت شرایط مساعد و بدون تنش به دست می‌آید. جریان آب انتقالی عمودی در یک بخش واحد و پایدار ناحیه ریشه توسط معادله ریچاردز توصیف می‌شود. با ترکیب انتشار، پخشیدگی و همرفت، شار کل جریان (J) با توجه به رابطه‌ی هیلل (۱۹۷۷) بدست می‌آید:

$$J = -(D_h + D_s) \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) + \bar{v} \theta c \quad (۴)$$

که در آن:

C: غلظت جسم حل شده در آب، \bar{v} : سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، D_s : ضریب پخشیدگی و D_h : ضریب انتشار املاح در خاک می‌باشد. داده‌های ورودی مدل شامل خصوصیات خاک (عمق هر افق خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع، ضریب پخشیدگی،

خالص آبی گیاه و یک بار با آب شیرین به میزان نیاز خالص آبی گیاه به اضافه‌ی نیاز آبخویی (3S1:1F).
 ۷- آبیاری با آب شور ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شیرین به طور تناوبی به صورت سه بار آب شور به میزان نیاز خالص آبی گیاه و یک بار با آب شیرین به میزان نیاز خالص آبی گیاه به اضافه‌ی نیاز آبخویی (3S2:1F).
 ۸- آبیاری با آب شور ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر و شیرین به طور تناوبی به صورت پنج بار آب شور به میزان نیاز خالص آبی گیاه و یک بار با آب شیرین به میزان نیاز خالص آبی گیاه به اضافه‌ی نیاز آبخویی (5S1:1F).
 ۹- آبیاری با آب شور ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شیرین به طور تناوبی به صورت پنج بار آب شور به میزان نیاز خالص آبی گیاه و یک بار با آب شیرین به میزان نیاز خالص آبی گیاه به اضافه‌ی نیاز آبخویی (5S2:1F).
 نحوه اعمال نه تیمار استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. حروف 1F, S1 و S2 در شکل ۱ بیانگر سطوح شوری به ترتیب ۰/۴، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و اعداد ما قبل آن‌ها معرف تناوب آبیاری هر سطح شوری در هر تیمار است.

(سینگل کراس ۷۰۴) و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با نه تیمار و در سه تکرار و در ۲۷ کرت آزمایشی انجام شد. تیمارهای این تحقیق شامل موارد زیر بود:
 ۱- آبیاری با آب شیرین (۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر) به طور ثابت به میزان نیاز خالص آبی گیاه (F).
 ۲- آبیاری با آب شور ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر به طور ثابت به میزان نیاز خالص آبی گیاه (S1).
 ۳- آبیاری با آب شور ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر به طور ثابت به میزان نیاز خالص آبی گیاه (S2).
 ۴- آبیاری با آب شور ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر و شیرین به طور تناوبی به صورت یک بار آب شور به میزان نیاز خالص آبی گیاه و یک بار با آب شیرین به میزان نیاز خالص آبی گیاه به اضافه‌ی نیاز آبخویی (1S1:1F).
 ۵- آبیاری با آب شور ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شیرین به طور تناوبی به صورت یک بار آب شور به میزان نیاز خالص آبی گیاه و یک بار با آب شیرین به میزان نیاز خالص آبی گیاه به اضافه‌ی نیاز آبخویی (1S2:1F).
 ۶- آبیاری با آب شور ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر و شیرین به طور تناوبی به صورت سه بار آب شور به میزان نیاز

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	F
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	S1
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	S2
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	1S1:1F
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	1S2:1F
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	3S1:1F
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	3S2:1F
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	5S1:1F
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	5S2:1F

سطوح شوری در آب آبیاری

۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر

۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر

۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر

شکل ۱- شمای کلی از تیمارهای مورد نظر (شماره‌ها، نوبت‌های آبیاری را نشان می‌دهند)

ورودی در هر کرت با استفاده از کنتور حجمی تنظیم می‌شد. برای تهیه آب شور، نمک خام صنعتی (نمک شکر) به مقدار لازم با توجه به رابطه $TDS = 640 \times K \times EC$ (اسمیدما و رایکرافت، ۱۹۸۳) در آب حل شده و سپس توسط سیستم پمپاژ ثانویه به کرت‌ها اعمال شد. در رابطه مذکور، TDS مقدار کل

شوری آب آبیاری با توجه به درصد کاهش عملکرد مورد نظر در این آزمایش (۲۵ و ۵۰ درصد) برابر ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر انتخاب شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). مساحت هر کرت نه مترمربع شامل چهار ردیف کشت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و طول سه متر بود. سیستم آبیاری از نوع قطره‌ای نواری بود و میزان آب

نمک‌های محلول در آب (میلی‌گرم در لیتر)، EC هدایت الکتریکی محلول آب شور (دسی‌زیمنس بر متر) و K درصد خلوص نمک (۰/۸۶) می‌باشد. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های شیمیایی آب شور و غیر شور نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی آب شور و غیر شور.

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

مرجع ضرب شدند. این ضریب در شرایط بدون تنش برابر یک می‌باشد. برای محاسبه نیاز آبی (LR) در آبیاری با آب غیرشور در این تحقیق با توجه به دور آبیاری ثابت و طولانی‌تر از آبیاری قطره‌ای مرسوم، از رابطه ۶ استفاده شد (آپرز و وستکات، ۱۹۸۵):

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}} \quad (6)$$

اولین آبیاری ۲۳ تیرماه ۱۳۹۱ انجام و ۲۱ روز بعد تنش‌های شوری اعمال شد. در مجموع ۱۷ آبیاری در طول فصل رشد انجام گردید. برداشت و نمونه‌برداری از محصول ۸۴ روز بعد از کاشت در مرحله خمیری شدن ۰/۱ گرم اندازه‌گیری و سپس برای اندازه‌گیری وزن خشک گیاه، نمونه‌ها را به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. برای تعیین شوری خاک در انتهای فصل نمونه‌برداری از خاک با استفاده از اگر ضربه‌ای در سه عمق ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر برای هر تیمار صورت گرفت.

داده‌های ورودی مدل SWAP شامل چهار بخش داده‌های آب و هوایی، ویژگی‌های خاک، داده‌های گیاه و آبیاری و پارامترهای انتقال املاح می‌باشد. داده‌های آب و هوایی روزانه شامل بارش، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و تشعشع آفتابی است. داده‌های ورودی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. مدل SWAP با توجه به معادله‌ی و گنوختن-معلم (ون-گنوختن، ۱۹۸۰؛ معلم، ۱۹۷۶) ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را توصیف می‌کند. خلاصه‌ای از ویژگی‌های گیاهی به کار رفته در مدل در جدول ۲ ارائه شده است.

برای کلیه تیمارها تا مرحله هشت برگی آبیاری برحسب ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه در هر کرت صورت گرفت. با توجه به ویژگی‌های خاک مزرعه و نیاز آبی گیاه ذرت، دور آبیاری برابر چهار روز در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی ذرت (K_e) در دوره‌های ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر ۰/۳، ۱/۲ و ۰/۶ در نظر گرفته شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). بافت خاک مزرعه لوم رسی بود. عمق ریشه‌ی ذرت به خاطر وجود لایه‌ی غیر قابل نفوذ در خاک، ۶۰ سانتی‌متر تعیین شد. تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0 (به روش پنمن-مانتیت) و داده‌های هواشناسی روزانه به دست آمد. اولین آبیاری برای هر تیمار با آب غیر شور آغاز شد. کاهش میزان تبخیر-تعرق گیاه در اثر تنش شوری، با استفاده از ضریب تنش اعمال گردید (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y} (EC_e - EC_{e-threshold}) \quad (5)$$

که در آن:

K_s: ضریب تنش ناشی از شوری، K_y: ضریب حساسیت عملکرد محصول که مقدار آن برای گیاه ذرت ۱/۲۵ می‌باشد، b: کاهش عملکرد برای هر دسی‌زیمنس بر متر افزایش شوری که مقدار آن برای گیاه ذرت ۰/۰۷۴ می‌باشد، EC_{e-threshold}: آستانه‌ی تحمل شوری که مقدار آن برای ذرت علوفه‌ای ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). EC_e: هدایت الکتریکی عصاره‌ی 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

جدول ۲- داده‌های ورودی خاک و گیاه در مدل SWAP

مقدار	پارامتر (گیاه)	مقدار	پارامتر (خاک)
۸۴	طول دوره رشد (day)	۶۰	عمق لایه‌ی خاک (cm)
۲/۲۱	حداکثر ارتفاع گیاه (m)	لوم رسی	بافت خاک
۰/۶	حداکثر عمق ریشه (m)	۰/۶۲	رطوبت اشباع (gr/gr)
۱/۸	آستانه تحمل شوری ($dS.m^{-1}$)	۰/۰۱۰۶	پارامتر شکل α (cm^{-1})
۷/۴	شیب کاهش شوری (%)	۱/۴۸۶۴	پارامتر شکل n
		۲/۴	هدایت هیدرولیکی (m/day)

قبول، واسنجی و شبیه‌سازی صورت گرفت (جدول ۳). در این تحقیق واسنجی برای تیمار F و صحت‌سنجی برای هشت تیمار باقیمانده انجام شد.

پارامترهای مربوط به انتقال املاح در محیط متخلخل از شوری خاک ناحیه‌ی ریشه تأثیر می‌پذیرد. بنابراین در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه، با تغییر پارامترهای پیشنهاد شده‌ی مدل در محدوده‌های قابل

جدول ۳- پارامترهای توصیف‌کننده‌ی نیم‌رخ خاک در مدل SWAP

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۲/۰	شوری اولیه‌ی خاک ($dS.m^{-1}$)	۱/۵	حداکثر ضخامت لایه‌ی ماندابی (cm)
۰/۴	شوری اولیه‌ی آب آبیاری ($dS.m^{-1}$)	۱/۳	فاکتور گیاهی خاک لخت
۴۰	طول انتشار α_L (cm)	۰/۹۵	پارامتر β_p Boeston ($cm^{1/2}$)
۵	ضریب پخشیدگی در آب D_w ($cm^2 day^{-1}$)	۰/۵	حداقل بارش برای راه‌اندازی مجدد مدل (cm)

و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی، بارش و رطوبت نسبی در طول زمان تغییر می‌کرد و به صورت فایل داده‌ها در مدل وارد شد. واسنجی این مدل همانند مدل SWAP بر اساس تیمار F و صحت‌سنجی بر اساس هشت تیمار باقیمانده صورت گرفت. در جدول ۴ حداکثر عملکرد محصول بر اساس تیمار F در شرایط بدون تنش در نظر گرفته شده است.

در جدول ۴ برخی پارامترهای گیاهی و خصوصیات خاک (واسنجی‌شده) ورودی مدل SALTMED ارائه شده است. سایر داده‌ها بر اساس شبیه‌سازی مدل با استفاده از این داده‌ها و مقادیر پیش-فرض موجود در پایگاه داده‌های مدل اتخاذ گردید. رطوبت اولیه خاک در حد پژمردگی دائم فرض شد. داده‌هایی مثل شوری آب آبیاری، مقدار آبیاری، دمای حداقل

جدول ۴- داده‌های ورودی گیاهی و خاک به مدل SALTMED

مقدار	پارامتر (گیاه)	مقدار	پارامتر (خاک)
۱/۳۵	حداکثر طول ریشه (cm)	۶۰	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)
لوم رسی	حداکثر عملکرد محصول (ton/ha)	۵۶/۲	کلاس بافت خاک
۶۰	ضرایب گیاهی اولیه، میانی و انتهایی	۰/۳، ۰/۱۲ و ۰/۶	عمق خاک زراعی (cm)
۲/۰	طول روز دوره‌های ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی	۲۰، ۳۰، ۳۰، ۴	شوری اولیه خاک ($dS.m^{-1}$)
۴	کل دوره‌ی رشد (day)	۸۴	دبی آبیاری (lit/hr)
۰/۶۲			رطوبت اشباع (gr/gr)
۰/۳۶			رطوبت ظرفیت زراعی (gr/gr)

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

که در آن:

P_i : مقادیر تخمینی توسط مدل، O_i : مقادیر مشاهده‌ای، n: تعداد مشاهدات، \bar{P} : میانگین مقادیر P_i و \bar{O} : میانگین مقادیر O_i می‌باشد (جاکوودیس و کونتویانیس، ۱۹۹۵).

ارزیابی مدل‌ها

ارزیابی مدل‌ها با استفاده از دو شاخص خطای نسبی RE^2 و ضریب تعیین R^2 انجام شد:

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \quad (۷)$$

همچنین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی توسط مدل با آزمون آماری t استیودنت و در حالت نمونه‌های جفتی^۳ مورد مطالعه‌ی آماری قرار گرفت (پیغمبری، ۱۳۸۸).

نتایج و بحث

عملکرد محصول

نتایج حاصله از مطالعه‌ی میدانی نشان داد که با افزایش تنش شوری عملکرد محصول کاهش می‌یابد و با استفاده از مدیریت‌های استفاده‌ی تناوبی از آب شور و غیر شور این تنش می‌تواند تقلیل یابد و عملکرد محصول در مقایسه با استفاده‌ی ثابت از آب شور افزایش یابد. بر این اساس تیمارهای F و $S2$ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین عملکرد محصول بودند (شکل ۲). همان‌طور که انتظار می‌رفت با استفاده از مدیریت‌های یک در میان، سه در میان و پنج در میان تنش شوری کاهش یافت. مدل‌های SWAP و SALTMED برای تمام تیمارها اجرا گردید و مقادیر مشاهده‌شده‌ی عملکرد محصول در مطالعه‌ی میدانی و شبیه‌سازی‌شده توسط دو مدل مورد مقایسه قرار گرفت.

در شکل ۲ شبیه‌سازی خوب و رضایت‌بخش هر دو مدل در عملکرد محصول برای تیمارهای مختلف نشان داده شده است. 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 می‌باشد. نتایج نشان داد همبستگی مدل SALTMED در مقایسه با مدل SWAP از دقت بالاتری برخوردار بود، به طوری که مقدار ضریب تبیین برای عملکرد محصول در مدل SWAP برابر ۰/۵۸۷ و برای مدل SALTMED برابر ۰/۸۴۶ بدست آمد (شکل ۳).

تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای عملکرد

محصول توسط مدل‌های SWAP و SALTMED وجود نداشت. مقادیر R^2 متفاوتی برای عملکرد محصول با استفاده از مدل SALTMED در شرایط تنش شوری گزارش شده است. مقدار R^2 گزارش شده در مطالعه‌ای از ۰/۸۱ تا ۰/۹۳ متغیر بود (رامشوران و همکاران، ۲۰۱۴). مقدار R^2 به دست آمده در تحقیق حاضر (۰/۸۴۶) نیز در همین محدوده بود. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از این مدل تحت شرایط اعمال زهاب در مراحل پایانی رشد گندم مقدار R^2 برابر ۰/۹۹ برای عملکرد دانه گزارش شد (اکبری فضلی و همکاران، ۲۰۱۳). مقدار ضریب R^2 برای عملکرد محصول توسط مدل SWAP تحت شرایط تنش شوری نیز در مطالعات مختلفی گزارش شده است.

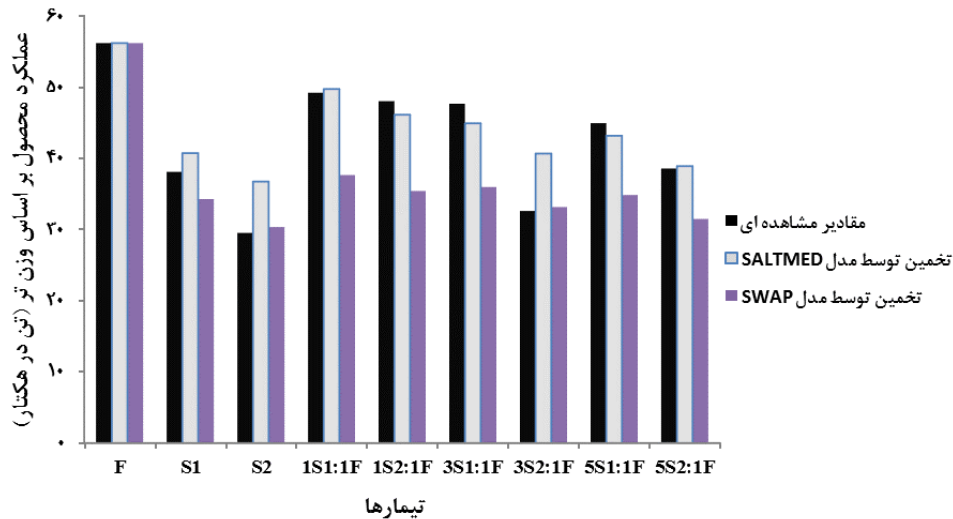
در مطالعه‌ای این ضریب ۰/۹۵ گزارش شد (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای دیگر مدل SWAP برای برآورد عملکرد ذرت دانه‌ای در شرایط کم-آبیاری در ایران ارزیابی شد و مقدار ضریب R^2 بین داده-های مشاهده‌ای و تخمینی عملکرد محصول ۰/۹۹ گزارش شد (کریمی و اسدی، ۱۳۹۱). در تحقیقی دیگر که شبیه-سازی رطوبت و شوری خاک و نیز عملکرد محصول تحت شرایط محدودیت توأم آبیاری و شوری با استفاده از مدل SWAP انجام شده بود، مقدار ضریب R^2 برای عملکرد وزن خشک گندم و ذرت علوفه‌ای برابر ۰/۸۵ گزارش شد (نوری و همکاران، ۱۳۸۹). در پژوهشی دیگر که مدل SWAP برای برآورد عملکرد چغندر قند تحت کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری ارزیابی شده بود، مقدار ضریب R^2 بین عملکرد مشاهده‌ای و تخمینی ۰/۸۳ به دست آمد (خانی و همکاران، ۱۳۸۶). در مجموع و با توجه به مطالعات مختلف مقدار ضریب تبیین در تحقیق حاضر برای عملکرد بیوماس برای هر دو مدل قابل قبول بود و مدل SALTMED در شرایط تنش شوری عملکرد بهتری در مقایسه با مدل SWAP داشت.

مقادیر خطای نسبی عملکرد محصول برای هر تیمار در جدول ۵ نشان داده شده است. مقدار خطای نسبی در مرحله واسنجی برای مدل SWAP و

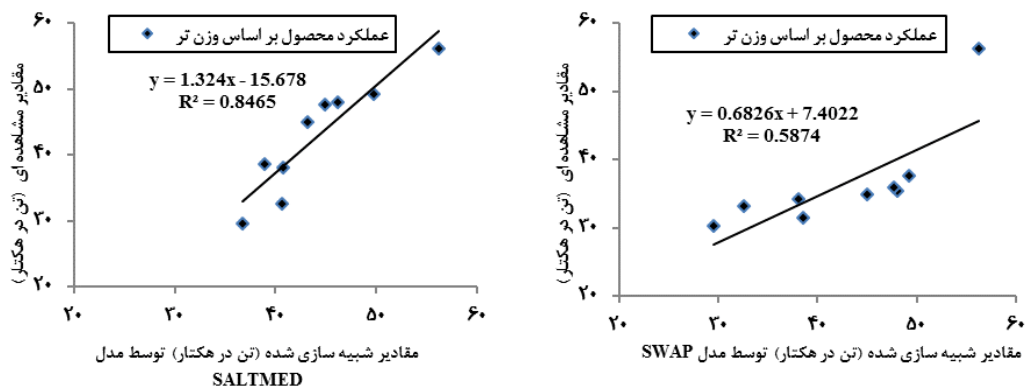
³Paired varieties

نسبی (RE) دو مدل SWAP و SALTMED به ترتیب ۱۶/۲ و ۹/۰ درصد بدست آمد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل SALTMED در تخمین عملکرد محصول بود. تفاوت عملکرد این دو مدل را می‌توان به متفاوت بودن معادلات حاکم در تخمین عملکرد محصول دانست.

SALTMED صفر درصد به دست آمد. در مرحله‌ی صحت‌سنجی حداکثر خطای نسبی به دست آمده از دو مدل SWAP و SALTMED به ترتیب ۲۶/۳- (در تیمار 1S2:1F) و ۲۴/۷ (در تیمار 3S2:1F) درصد و حداقل خطای نسبی به دست آمده برای دو مدل نام‌برده به ترتیب ۱/۷ (در تیمار 3S2:1F) و ۰/۹ (در تیمار 5S2:1F) درصد بود. میانگین مقادیر قدر مطلق خطای



شکل ۲- مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی عملکرد محصول توسط مدل‌های SWAP و SALTMED برای هر تیمار



شکل ۳- همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی عملکرد محصول توسط مدل‌های SWAP (راست) و SALTMED (چپ) برای ۹ تیمار مورد مطالعه

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

RE میانگین مقادیر	صحت‌سنجی								واسنجی	
	5S2:1	5S1:1	3S2:1	3S1:1	1S2:1	1S1:1	S2	S1	F	مدل
در مرحله صحت-سنجی	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
۱۶/۲	-۱۸/۴	-۲۲/۵	۱/۷	-۲۴/۶	-۲۶/۳	-۲۳/۵	۲/۸	-۱۰/۰	-/۰	SWAP
۹/۰	۰/۹	-۳/۹	۲۴/۷	-۵/۸	-۳/۹	۱/۱	۲۴/۴	۶/۹	-/۰	SALTMED

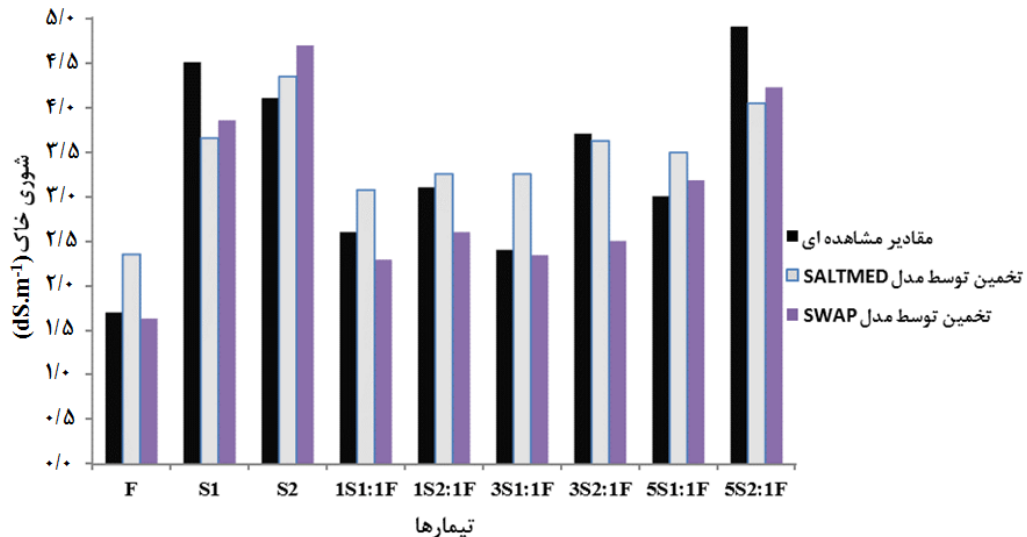
مقادیر درصد خطای متفاوتی برای عملکرد محصول با استفاده از مدل SALTMED در شرایط تنش

تیمارهای S2 و 3S2:1F از دقت خوبی برخوردار بود.

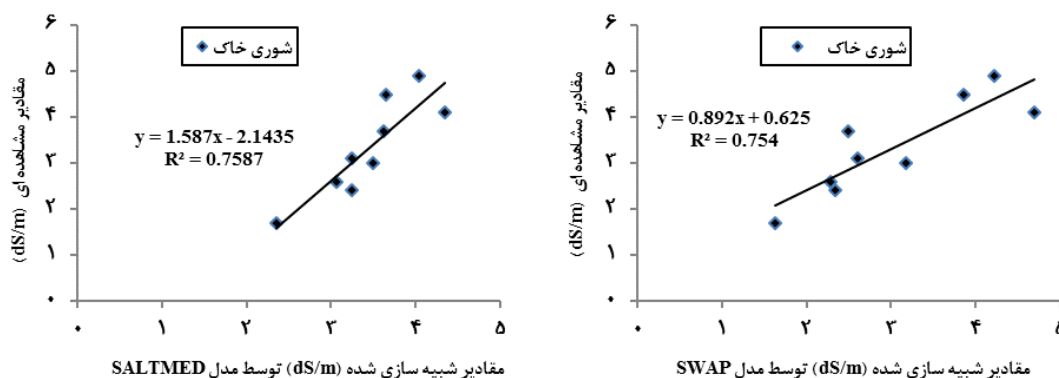
شوری پروفیل خاک

شبیه‌سازی شوری خاک در هر دو مدل برای همه‌ی تیمارها اجرا شد و با مقادیر مشاهده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۴). داده‌های مشاهده‌ای، میانگین شوری خاک در سه عمق ۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر می‌باشند که در انتهای فصل رشد (دو روز بعد از برداشت محصول) اندازه‌گیری شد. هم‌چنین معادله‌ی همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی توسط دو مدل برازش داده شد (شکل ۵) و مقدار ضریب تبیین برای مدل SWAP برابر ۰/۷۵۴ و در مدل SALTMED برابر ۰/۷۵۸ بدست آمد. مقادیر خطای نسبی شوری خاک برای هر تیمار در جدول ۶ نشان داده شده است. حداکثر خطای نسبی شوری خاک برای مدل SWAP در تیمار 3S2:1F با مقدار ۳۲/۵ درصد و برای مدل SALTMED در تیمار F با مقدار ۳۸/۲ درصد به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد مدل SWAP مقدار خطای نسبی کمتری نسبت به مدل SALTMED داشت، اما همبستگی دو مدل، شبیه به یکدیگر بودند.

شوری گزارش شده است. مقادیر قدر مطلق خطای نسبی (|RE|) از صفر تا ۲۱/۴۹ (میانگین ۵/۷۳) درصد در مطالعه‌ای در مصر گزارش شد (رجب و همکاران، ۲۰۰۵ ب). در مطالعه‌ای دیگر مقادیر |RE| عملکرد دانه‌ی گنه-گنه از ۰/۸۴ تا ۲/۱۶ (میانگین ۱/۴۸) درصد گزارش شد (رزاقی و همکاران، ۲۰۱۱). هم‌چنین در شرایط کم‌آبایی مقادیر |RE| از صفر تا ۲۹/۰۸ (میانگین ۱۳/۸۲) درصد برای عملکرد ذرت شیرین به دست آمد (هیریچ و همکاران، ۲۰۱۲). مقدار خطای نسبی برای عملکرد محصول توسط مدل SWAP تحت شرایط تنش شوری نیز در مطالعات مختلفی گزارش شده است. در مطالعه‌ای مقدار |RE| برابر ۸/۳ درصد برای عملکرد نسبی گندم گزارش شد (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). درصد خطای نسبی مطلق عملکرد نسبی شبیه‌سازی‌شده در تحقیقی دیگر از ۴/۲ تا ۹/۷ درصد متغیر بود (ورما و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه‌ای دیگر خطای نسبی عملکرد دانه‌ی جو بهاره در خاک‌های مختلف ۱۳/۰-، ۱۵/۴ و ۵۱/۵ درصد و برای گندم پاییزه مقادیر ۱۱/۷-، ۱۱/۱- و ۱۸/۴- درصد گزارش شد (ایتزینگر و همکاران، ۲۰۰۴). در مجموع و با توجه به مطالعات مختلف، در تحقیق حاضر پیش‌بینی هر دو مدل در عملکرد محصول (به جز



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی شوری خاک توسط مدل‌های SWAP و SALTMED برای هر تیمار.



شکل ۵- همبستگی مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی شوری خاک توسط مدل‌های SWAP (راست) و SALTMED (چپ) برای ۹ تیمار.

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

مدل/ تیمارها	S2	S1	F	IS1:1F	IS2:1F	3S1:1F	3S2:1F	5S1:1F	5S2:1F	میانگین مقادیر RE
SWAP	۱۴/۴	-۱۴/۴	-۴/۱	-۱۱/۹	-۱۶/۱	-۲/۵	-۳۲/۴	۶/۰	-۱۳/۹	۱۲/۹
SALTMED	۵/۹	-۱۸/۹	۳۸/۲	۱۸/۱	۴/۸	۳۵/۴	-۲/۲	۱۶/۳	-۱۷/۶	۱۷/۵

های کم‌آبیاری، مقادیر R^2 میان داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی شوری خاک در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر را برابر ۰/۷۴ و در عمق ۴۵ تا ۷۵ سانتی‌متر برابر ۰/۹۳ گزارش شد و قدر مطلق خطای نسبی شوری خاک از صفر تا ۵۰/۰ (میانگین ۱۳/۷) درصد متغیر بود (علی و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعات مختلفی عملکرد مدل SWAP برای شوری خاک نیز گزارش شده است. در مطالعه‌ای مقدار |RE| برابر ۹/۶ درصد و مقدار R^2 برابر ۰/۹۶ گزارش شد (کومار و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه‌ای دیگر میانگین خطای نسبی شوری خاک از ۱۸/۴۰ تا ۵۵/۲۱ (میانگین ۳۲/۶۸) درصد گزارش شد (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به نتایج مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت عملکرد مدل SALTMED و SWAP در تحقیق حاضر در حد قابل قبولی بود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقایسه و ارزیابی دو مدل SWAP و SALTMED در شرایط استفاده از آب شور در تناوب با آب غیر شور برای کشت گیاه ذرت علوفه‌ای در منطقه‌ی کرج انجام شد. بدین منظور عملکرد محصول و شوری خاک در نه تیمار مختلف بررسی شد. نتایج

تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای شوری خاک توسط مدل‌های SWAP و SALTMED وجود نداشت. در مطالعات معدودی عملکرد مدل SALTMED در مقادیر شوری خاک ارزیابی شده است. در بررسی شوری خاک شش مزرعه‌ی نیشکر بیشترین و کمترین مقدار R^2 به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۷۹ (میانگین ۰/۹۱) گزارش شد (گلایی و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعه‌ای دیگر مقادیر R^2 برای اعماق ۴۰ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۶۰ سانتی-متر خاک به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۱ گزارش شد (رزاقی و همکاران، ۲۰۱۱).

در پژوهشی دیگر در شبیه‌سازی مدل تحت شرایط مختلف اعمال کود و تنش خشکی برای محصول لوبیاسبز، مقادیر R^2 از ۰/۸۱ تا ۰/۹۱ گزارش شد (مهانا و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه‌ی اکبری فضلی و همکاران (۲۰۱۳) مقادیر R^2 برابر ۰/۹۲ گزارش شد. در مطالعه‌ای دیگر در شبیه‌سازی رطوبت و شوری خاک در شرایط اقلیمی سیستان، مقادیر قدر مطلق خطای نسبی از ۱۱/۱ تا ۲۸/۵ (میانگین ۱۷/۰) درصد گزارش شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهشی دیگر برای شبیه‌سازی شوری و رطوبت خاک و نیز عملکرد خیار تحت رژیم-

نشان داد همبستگی مناسبی بین مقادیر تخمینی و مشاهداتی برای هر دو مدل بدست آمد. به طوری که مقدار ضریب تبیین برای عملکرد محصول در مدل SWAP برابر ۰/۵۸۷ و برای مدل SALTMED برابر ۰/۸۴۶ بدست آمد. میانگین مقادیر قدر مطلق خطای نسبی عملکرد محصول در مرحله‌ی صحت‌سنجی برای دو مدل SWAP و SALTMED به ترتیب ۱۶۲ و ۹/۰ درصد بود که نشان‌دهنده‌ی توانایی نسبتاً خوب دو مدل در شبیه‌سازی عملکرد ذرت می‌باشد. هم‌چنین هر دو مدل روند مناسبی از شبیه‌سازی شوری خاک ارائه دادند. مقدار ضریب تبیین برای مدل‌های SWAP و SALTMED به ترتیب ۰/۷۵۴ و ۰/۷۵۸ به دست آمد. به طور کلی می‌توان اظهار داشت که مدل‌های SWAP و SALTMED ابزارهای مفید برای مدیریت و پیش‌بینی اثرات تنش شوری هستند و این دو مدل به خوبی توانستند جریان آب در خاک در اثر آبیاری، انتقال نمک در خاک و جذب آب توسط گیاه در شرایط تنش شوری در فصل رشد را شبیه‌سازی کنند.

فهرست منابع

۱. پیغمبری، س. ا. ۱۳۸۸. طرح‌های آزمایشی در مطالعات کشاورزی. انتشارات دانشگاه تهران.
۲. خانی قریه‌گپی، م.، داوری، ک.، علیزاده، ا.، هاشمی‌نیا، س.م. و ذوالقفران، ا. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندر قند تحت کمیت‌ها و کیفیت‌های مختلف آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱(۲): ۱۰۷-۱۱۷.
۳. شیرشاهی، ف.، بابازاده، ح.، کاوه، ف. و امیری، ا. ۱۳۹۳. ارزیابی کارایی مصرف آب و برآورد عملکرد گندم با استفاده از مدل SWAP در بخشی از شبکه آبیاری و زهکشی درودزن، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۲): ۲۷۳-۲۸۳.
۴. کریمی گوغری، ش. و اسدی، ر. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد ذرت دانه‌ای در شرایط کم-آبیاری. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۶(۴): ۳۹۱-۴۰۴.
۵. محمدی، ا.، حسن‌لی، م.، قره‌داغی، م.م. و محمدی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی رطوبت و شوری خاک با استفاده از مدل SALTMED در شرایط اقلیمی سیستان. دومین کنفرانس ملی مدیریت آب و خاک کشاورزی، ۳۰ و ۳۱ اردیبهشت، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی.
۶. نحوی‌نیا، م.ج.، شهیدی، ع.، پارسی‌نژاد، م.، و کریمی، ب. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل SWAP در تخمین محصول گندم در شرایط کم‌آبیاری و شوری در منطقه بیرجند. مجله پژوهش آب ایران، ۴(۶): ۴۳-۵۸.
۷. نوری، ح.، لیاقت، ع.م.، پارسی‌نژاد، م.، وظیفه‌دوست، م. ۱۳۸۹. برآورد عملکرد گندم و ذرت علوفه‌ای در شرایط محدودیت توام آبیاری و شوری با استفاده از مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP. نشریه آب و خاک، ۲۴(۶): ۱۲۳۵-۱۲۲۴.
8. Akbari Fazli, R., Gholami, A., Andarzian, B., Ghoosheh, M. and Darvishpasand, Z. 2013. Investigating the effect of applying drained water on wheat yield using SALTMED model. *Journal of Novel Applied Sciences*, 2(S3): 1003-1011.
9. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. "Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements", *Irrig. And Drainage paper no. 56*. FAO, Rome.
10. 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.
11. Ayers, R.S., Westcot, D.W. 1985. *Water quality for agriculture: Irrigation and Drainage paper no. 29*. FAO, Rome, Italy, 174pp.
 12. 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.
 13. Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. *Yield Response to Water*. Irrigation & Drainage Paper No. 33. FAO, Rome.
 14. Droogers, P., Bastiaanssen, W.G.M., Beyazgül, M., Kayam, Y., Kite, G.W., Murray-Rust, H., 2000. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in Western Turkey. *Agricultural Water Management*, 43: 183–202.
 15. Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Zalud, Z., Dubrovsky, M., 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Model.* 171, 223–246.
 16. 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.
 17. Hillel, D. 1977. *Computer simulation of soil-water dynamics; a compendium of recent work*. IDRC, Ottawa, Canada.
 18. 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. *J. Mater. Environment Science* 3(2):342-359.
 19. Jacovides, C.P., and Kontoyiannis, H. 1955. Statistical procedures for the evaluation of Evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27: 365–371.
 20. Jiang, J., Feng, S., Huo, Z., Zhao, Z., Jia, B., 2011. Application of SWAP model to simulate water–salt transport under deficit irrigation with saline water. *Mathematical and Computer Modelling*, 45: 902–911.
 21. Kroes, J.G., van Dam, J.C., Huygen, J. and Vervoort, R.W. 1999. *Users Guide of SWAP version 2.0. Simulation of Water Flow, Solute Transport and Plant Growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*, Technical Document 53. DLOW in and Staring Centre, Wageningen.
 22. Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D.K., Parihar, S.S., Sahoo, R.N. 2015. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. *Agricultural Water Management*, 148: 72–83.
 23. 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 Conference for Agriculture and Irrigation in the Nile Basin Countries*, 26-29 March, El-Minia, Egypt.
 24. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resource Research*, 12 (3): 513–522.
 25. 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.
 26. Ragab, R. 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software* 17:345-361.
 27. Ragab, R., Malash, N., Abdel Gawad, G., Arsalan, A., and Ghaibeh, A. 2005. 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.
28. 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. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ird.1867.
 29. 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 October 2011, Tehran, Iran.
 30. Singh, R., Van Dam, J.C., Feddes, R.A., 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agricultural Water Management*, 82: 253–278.
 31. Šimůnek, J., Sejna, M. and van Genuchten, M.T. 1998. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media. Users Manual, Version 2.0, U.S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, 178 pp.
 32. Smedema L.K., Rycroft. D.W. 1983. *Land drainage: Planning and design of agricultural drainage systems*: Cornell University Press (Ithaca, N.Y.), 376pp.
 33. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
 34. Verma, A.K., Gupta, S.K., Isaac, R.K., 2012. Use of saline water for irrigation in monsoon climate and deep water table regions: simulation modeling with SWAP. *Agricultural Water Management*, 115: 186–193.