



## مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۵۱۲-۴۹۵

DOI: 10.22059/jwim.2021.325835.893

مقاله پژوهشی:

### ارزیابی مدل SWAP در برآورد رطوبت، شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور

مرتضی خوش‌سیمای چنار<sup>۱</sup>، حمیده نوری<sup>۲\*</sup>، ژایلا محمودی ملامحمود<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

#### چکیده

به منظور ارزیابی مدل SWAP پژوهشی در سال ۱۳۹۶ در مزرعه گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، واقع در کرج به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل سه هیبرید ذرت، سینگل کراس‌های ۷۰۴، ۴۰۰ و ۲۶۰ (به ترتیب V1، V2 و V3) و سه سطح شوری آب آبیاری ۰/۷، ۳ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر (به ترتیب S1، S2 و S3) بودند. در هر رقم ذرت برای واسنجی مدل از داده‌های عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در مزرعه در سطح شوری آب آبیاری ۳ دسی‌زیمنس بر متر (S2) و برای صحت‌سنجی آن از سطوح شوری آب آبیاری ۰/۷ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر (S2 و S3) استفاده شد. هم‌چنین برای ارزیابی مدل در برآورد رطوبت و شوری خاک، از داده‌های مزرعه‌ای تیمارهای VIS2 (واسنجی) و VIS3 (صحت‌سنجی) استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده، مدل SWAP عملکرد خوبی در برآورد رطوبت خاک داشته به طوری که در مرحله صحت‌سنجی در سه لایه خاک (۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متری) به ترتیب دارای RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۴  $\text{cm cm}^{-3}$  است و در پیش‌بینی شوری خاک لایه سطحی ۲۰-۰ سانتی‌متری دقت خوبی (RMSE برابر ۰/۶۷  $\text{mg cm}^{-3}$ ) دارد، اما با افزایش عمق خاک دقت مدل کاهش پیدا می‌کند. به طوری که RMSE به ترتیب در دو لایه ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری ۱/۱۶ و ۱/۱۹  $\text{mg cm}^{-3}$  به دست آمد. مدل اختلاف ذاتی بین ارقام مختلف گیاه ذرت را تشخیص داده و بهترین نتایج شبیه‌سازی برای رقم سینگل کراس ۷۰۴ به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** آبیاری قطره‌ای، ارقام ذرت، مدل‌سازی رشد گیاه، مدل SWAP.

### Evaluation of SWAP model in estimating soil water content, salinity and yield of three forage maize cultivars under saline water use conditions

Morteza Khoshsimaie Chenar<sup>1</sup>, Hamideh Noory<sup>2\*</sup>, Zhila Mahmoudi Molamahmoud<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Collage of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Collage of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. M.Sc. Graduated, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Collage of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: June 19, 2021

Accepted: September 28, 2021

#### Abstract

In order to evaluate the SWAP model a study was conducted in 2017 in the farm of the Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, located in Karaj as a factorial experiment in a randomized complete block design. The treatments consisted of three maize hybrids SC-704, SC-400 and SC-260 (V1, V2 and V3, respectively) and three levels of irrigation water salinity 0.7, 3 and 5  $\text{dS m}^{-1}$  (S1, S2 and S3, respectively). In each maize cultivar, for the model calibration, the crop yield data measured in the field from the salinity level of irrigation water 3  $\text{dS m}^{-1}$  and for its validation, the salinity levels of 0.7 and 5  $\text{dS m}^{-1}$  were used. Also, to evaluate the model in estimating soil moisture and salinity, field data of VIS2 (calibration) and VIS3 (validation) were used. Based on the obtained results, SWAP model has a good performance in estimating soil moisture so that in the validation stage in three soil layers (0-20, 20-40 and 40-60 cm) with RMSE (Root Mean Square Error) of 0.03, 0.03 and 0.04  $\text{cm cm}^{-3}$  respectively and has a good accuracy in predicting soil salinity of 0-20 cm surface layer (RMSE= 0.67  $\text{mg cm}^{-3}$ ) but with increasing soil depth, the accuracy of the model decreases so that RMSE of 1.16 and 1.19  $\text{mg cm}^{-3}$  were obtained in two layers of 20-40 and 40-60 cm, respectively. The SWAP model detected the inherent differences between different cultivars of maize and the best simulation results were obtained for SC 704.

**Keywords:** Crop growth modeling, Drip irrigation, Maize cultivars, SWAP model.

## مقدمه

برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور مفید بوده اما محدودیت‌های قابل توجهی نیز دارند، از جمله محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی و محیطی، کوتاه بودن زمان آزمایش، محدودیت تعداد سناریوهایی که توسط آزمایش بررسی می‌شود. گزینه‌های مدیریتی که به وسیله مطالعات صحرایی بررسی می‌شوند به دلیل زمان‌بر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌شوند. از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به عنوان طرح توسعه یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده کرد. دقت مدل‌های شبیه‌سازی به دقت داده‌های ورودی بستگی داشته و در صورت واسنجی صحیح، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های صحرایی و نیز صرف زمان و هزینه، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری به کار گرفته شوند (Mostafazade-fard *et al.*, 2009). در سالیان اخیر برای پاسخگویی به مسائل شوری و آب مصرفی گیاه مدل‌های شبیه‌سازی معتبری توسعه یافته‌اند که یکی از این مدل‌ها، مدل SWAP (خاک، آب، اتمسفر و گیاه) است. SWAP یک مدل اگروهیدرولوژیکی بر پایه ارتباط فیزیکی پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه است (Kroes *et al.*, 2017). این مدل از زیرمجموعه‌های مختلفی برای تحلیل اثرات متقابل میان حرکت آب، حرکت املاح، رشد و عملکرد محصول تحت رژیم‌های مختلف عمق و شوری آب آبیاری، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری و پیش‌بینی شوری نیم‌رخ خاک در طولانی مدت برخوردار است (Kroes *et al.*, 2017). مدل SWAP توسط پژوهش‌گران متعددی استفاده شده است (Kumar *et al.*, 2015; Amiri, 2017; Stahn *et al.*, 2017; Kamyab-Talesh *et al.*, 2017; Soltani *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2019; Li & Ren, 2019; Chen *et al.*, 2019; Zeyliger *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020; Hamada *et al.*, 2020; Pen *et al.*, 2020). نتایج

از مشکلات اساسی که همواره مانع بزرگی در برابر پیشرفت کشاورزی در جهان بوده است، شوری آب و خاک است. شوری خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا یکی از عوامل محدودکننده در تولید محصولات کشاورزی بوده و سالانه باعث کاهش میلیون‌ها تن تولیدات کشاورزی می‌شود. تخمین زده می‌شود که حدود ۸۳۰ میلیون هکتار از اراضی تحت تأثیر شوری و سدیم باشد که هر ساله در حال افزایش است (Qadir *et al.*, 2014). با توجه به این‌که بیش‌تر نقاط ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک واقع شده است، تولید محصول بدون در نظر گرفتن آبیاری امکان‌پذیر نیست. با توجه به تقاضای روزافزون برای آب در بخش کشاورزی، شرب و صنعت لزوم استفاده از آب‌های نامتعارف به عنوان بخشی از منابع آب آبیاری بیش از پیش احساس می‌شود. در این خصوص استفاده از منابع آب‌های شور نه تنها به عنوان یک انتخاب، بلکه به عنوان یک التزام پیش روی کشاورزان قرار خواهد گرفت. مطالعات مختلف نشان داده است که از آب شور می‌توان به طور موفقیت‌آمیزی در آبیاری گیاهان استفاده کرد (Jiang *et al.*, 2012; Malash *et al.*, 2012; Singh & Panda, 2012; Feng *et al.*, 2017; Minhas *et al.*, 2020). البته تأثیر استفاده از آب شور مانند تجمع نمک در لایه سطحی خاک که به صورت خطی به مقدار و کیفیت آب آبیاری ارتباط دارد، نیز گزارش شده است (Huang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2015; Rameshwaran *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2017; Diaz *et al.*, 2016).

در مناطقی که گیاهان تحت آبیاری هستند، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده بهینه از آب ضروری به نظر می‌رسد. اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق جهت استفاده بهینه از آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک با کاربرد مدل‌های ریاضی امکان‌پذیر می‌باشد. آزمایش‌های مزرعه‌ای

زمین و محدودیت منابع آبی در کشور، استفاده از منابع آب شور و لب‌شور افزایش یافته است. انجام آبیاری با آب شور در بلندمدت می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری در خاک ایجاد نماید. بنابراین پایش توزیع رطوبت و شوری خاک در نیمرخ خاک و پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط استفاده از آب شور برای برنامه‌ریزی صحیح در مدیریت آبیاری ضروری به‌نظر می‌رسد. علاوه بر این استفاده از ارقام متنوع ذرت با طول دوره رشد متفاوت (زودرس، میان‌رس، دیررس) در کشور گسترش یافته است. لذا این پژوهش به‌منظور ارزیابی و واسنجی مدل SWAP در برآورد رطوبت و شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

### مزرعه مورد مطالعه

این پژوهش در سال ۱۳۹۶ در مزرعه پژوهشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، واقع در کرج با طول جغرافیایی  $49^{\circ} 50'$  شرقی، عرض جغرافیایی  $48^{\circ} 35'$  شمالی (شکل ۱) و ارتفاع از سطح دریا ۱۲۹۲/۹ متر انجام شد. براساس داده‌های آماری ۳۰ ساله ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در مجاورت مزرعه، حداکثر و حداقل مطلق و میانگین دمای منطقه به ترتیب  $40^{\circ}C$ ،  $18^{\circ}C$  و  $13/5^{\circ}C$  درجه سانتی‌گراد است. بالاترین میانگین دمای ماهانه در تیرماه  $24/5^{\circ}C$  درجه سانتی‌گراد و پایین‌ترین میانگین در دی‌ماه  $1/2^{\circ}C$  درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. میانگین بارش سالانه منطقه مورد مطالعه حدود  $251/7$  میلی‌متر است و هم‌چنین حداکثر رطوبت نسبی ۶۴ درصد در بهمن‌ماه و حداقل آن ۲۷ درصد در خردادماه است. مزرعه مورد مطالعه مجهز به سیستم آبیاری قطره‌ای نواری است و منبع تأمین آب آن چاه عمیق است.

پژوهش‌های Vazifedoust *et al.* (2008) در زمینه پیش‌بینی رطوبت در خاک با استفاده از مدل SWAP نشان داد مدل به‌خوبی توانسته مقادیر رطوبت را در مزارع تحت آبیاری منطقه برخوردار اصفهان شبیه‌سازی کند. Ben-Asher *et al.* (2006) روند رشد درخت انگور را با مدل SWAP و تحت آبیاری با آب شور، شبیه‌سازی کردند. برای این منظور از شبیه‌ساز رشد گیاه تفضیلی و ساده مدل SWAP استفاده نمودند و دریافتند که در شرایط شور برای گیاه انگور، شبیه‌ساز رشد گیاه تفضیلی، اعتبار بیشتری نسبت به شبیه‌ساز ساده دارد. Jiang *et al.* (2011) به‌منظور بررسی رطوبت خاک و حرکت نمک و هم‌چنین پیش‌بینی اثر کم-آبیاری طولانی‌مدت با استفاده از آب شور بر روی حرکت نمک در منطقه ریشه گیاه گندم بهاره از مدل SWAP استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی شده نشان‌دهنده پایین‌بودن مقدار آب خاک، اما غلظت بالای نمک در منطقه ریشه گیاه تحت کم‌آبیاری است. مشاهده شد که شوری خاک با کاهش مقدار آب و افزایش شوری آب، افزایش می‌یابد. Kumar *et al.* (2015) مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی قابلیت مدل SWAP برای شبیه‌سازی حرکت نمک و عملکرد نسبی سه رقم مقاوم و یک رقم حساس به شوری گیاه گندم در منطقه آب‌وهوایی نیمه‌خشک هند انجام داده و گزارش کردند که مدل SWAP به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی حرکت نمک در منطقه توسعه ریشه و عملکرد نسبی گندم در شرایط استفاده از آب شور است. هم‌چنین Kamyab-Talesh *et al.* (2017) به‌منظور تعیین آستانه تحمل به شوری و شیب کاهش عملکرد محصولات گندم، جو و ذرت از مدل SWAP در بخش مرکزی ایران (سمنان) استفاده کردند که نتایج مطالعه ایشان نشان داد مدل SWAP عملکرد هر یک از محصولات فوق را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند.

در سال‌های اخیر با توجه به قرارگرفتن بخش بزرگی از مساحت کشور ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره

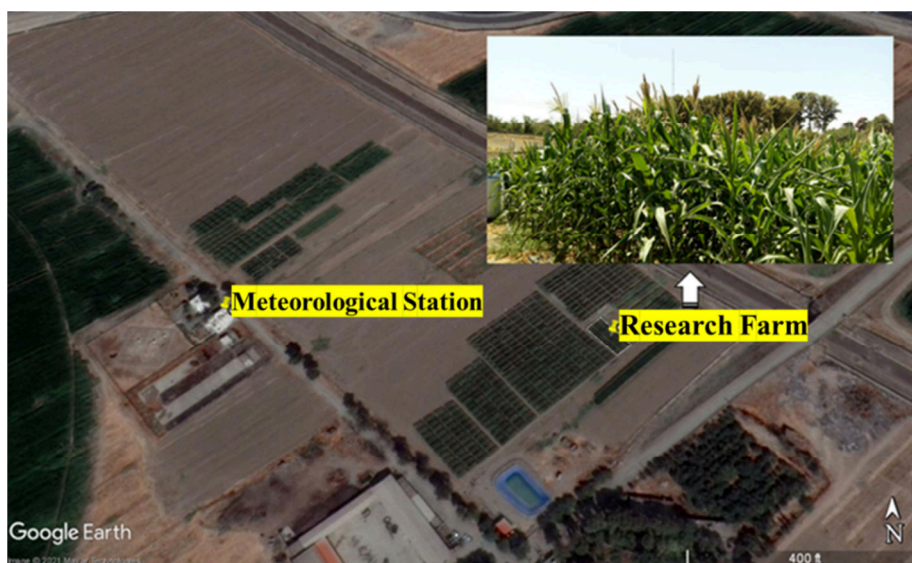


Figure 1. Location of studied farm and meteorological station

### آزمایش‌های مزرعه‌ای

این پژوهش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک-های کامل تصادفی با دو فاکتور و سه بلوک (تکرار) و در مجموع با ۹ تیمار و ۲۷ کرت آزمایشی انجام شد. مساحت هر کرت تقریباً ۱۲ مترمربع (۳×۴) که شامل چهار ردیف کشت گیاه ذرت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و طول چهار متر بود. فاکتورهای آزمایشی شامل سه رقم ذرت سینگل کراس ۷۰۴، سینگل کراس ۴۰۰ و سینگل کراس ۲۶۰ (V1، V2 و V3) و سه سطح شوری آب آبیاری ۰/۷، ۳ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر (S1، S2 و S3) برای اعمال تنش شوری بود.

عملیات کاشت به صورت دستی، عمق کاشت پنج تا هفت سانتی‌متر و فاصله کاشت بذر در هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. بعد از کاشت، همه تیمارها با منبع آب مزرعه آبیاری شدند و سپس تا مرحله چند برگ‌شدن ذرت، آبیاری سنگین انجام شد. سپس با توجه به ظرفیت زراعی و حداکثر تبخیر تعرق ذرت دور آبیاری سه روز در نظر گرفته شد. تبخیر تعرق مرجع توسط نرم‌افزار ETo Calculator (براساس رابطه پنمن-مانتیش) و با استفاده از

داده‌های هواشناسی روزانه که در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مجاور مزرعه ثبت می‌شود، به دست آمد. داده‌های روزانه هواشناسی شامل دمای هوای بیشینه و کمینه، متوسط رطوبت نسبی، متوسط سرعت باد، ساعات آفتابی، تابش خورشیدی و بارش بود. آبیاری مزرعه به صورت قطره‌ای و با استفاده از نوار تیپ با فاصله بین قطره‌چکان-های ۳۰ سانتی‌متر و دبی دو لیتر بر ساعت صورت گرفت. بدین منظور یک خط لوله اصلی نصب و سپس سه خط لوله فرعی از بالادست کرت‌های آزمایشی عبور داده شد. در ابتدای زمین روی خط لوله اصلی یک شیر کنترل، کنتور آب، فشارسنج و یک ونتوری سه‌چهارم اینچ برای تزریق آب‌شور به داخل لوله اصلی با اتصالات مربوطه قرار گرفت و فشار آب و نیز حجم آب آبیاری در خط لوله اصلی اندازه‌گیری شد. نوارهای آبیاری نیز به موازات ردیف‌های کاشت با اتصالات مربوطه به لوله‌های لترال متصل شده و کرت‌ها آبیاری شدند.

اعمال تنش شوری از مرحله چند برگ‌شدن ذرت آغاز شد. برای تهیه آب‌شور قبل از اعمال هر تیمار دبی لوله آبیاری و دبی تزریق ونتوری به صورت حجمی

نمونه‌برداری از خاک مزرعه در سه عمق به‌منظور تعیین بافت خاک انجام شد و بافت خاک از طریق مثلث بافت خاک USDA تعیین گردید. در عمق بیش‌تر از ۶۰ سانتی‌متر خاک زراعی مناسب یافت نشد و با توجه به نمونه‌برداری‌های اواسط فصل مشاهده شد جبهه رطوبتی بیش از این عمق پیشروی نکرد. با نمونه‌برداری از خاک مزرعه و با استفاده از صفحات فشاری رطوبت جرمی ظرفیت زراعی به‌دست آمد که با ضرب مقادیر حاصله در چگالی ظاهری، رطوبت حجمی ظرفیت زراعی به‌دست آمد. همچنین با استفاده از کیف بوختر و پمپ خلأ، عصاره‌ی اشباع محلول خاک ( $EC_e$ ) در اعماق مختلف مزرعه به‌دست آمد. جدول (۱) مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه را نشان می‌دهد.

**Table 1. Soil physical and chemical properties of experimental field**

Determination	Soil depth (cm)		
	0-20	20-40	40-60
Sand (%)	30	28	33
Silt (%)	40	42	38
Clay (%)	30	30	29
Soil texture	Clay loam	Clay loam	Clay loam
FC (% volume)	30.2	29.8	29.5
PWP (% volume)	13.5	13.5	13.7
Ks ( $cm\ d^{-1}$ )	12.77	12.75	10.57
Bd ( $g\ cm^{-3}$ )	1.35	1.40	1.41
EC ( $dS\ m^{-1}$ )	0.967	1.08	1.06
pH	7.71	7.83	7.81
Organic matter (%)	1.6	1.4	1.2

Bd: Bulk Density, Ks: Saturated Hydraulic Conductivity, FC: Field Capacity, PWP: Permanent Wilting Point, EC: Electric Conductivity

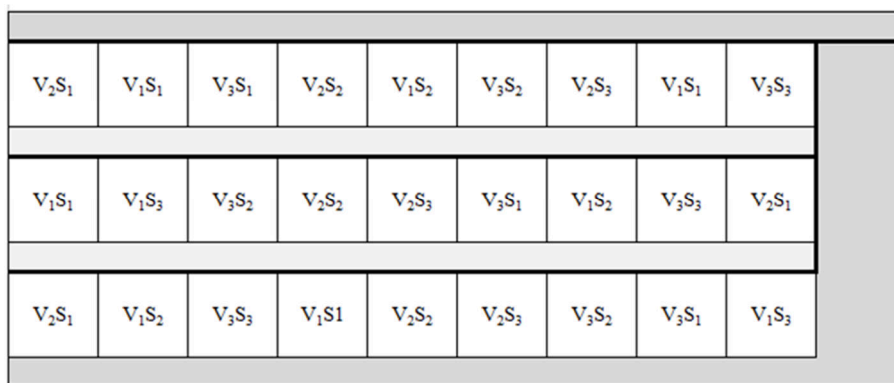
اندازه‌گیری شده و سپس مقدار شوری مخزن با استفاده از رابطه (۱) مشخص شد.

$$C^* = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (1)$$

که در آن  $C^*$  مقدار شوری موردنظر برای هر تیمار و  $C_1$  و  $C_2$  به‌ترتیب مقدار شوری آب آبیاری و شوری مخزن برحسب دسی‌زیمنس بر متر و  $Q_1$  و  $Q_2$  دبی لوله آبیاری و تزریق و نتوری برحسب لیتر بر ساعت است. برای تهیه آب با شوری‌های مختلف، ابتدا نمک خام صنعتی (موسوم به نمک شکر، NaCl) تهیه‌شده را در مخزن تهیه آب‌شور به میزانی که محاسبه شد، حل شده و به‌وسیله ونتوری به داخل لوله آبیاری تزریق می‌شد. میزان نمک مورد استفاده برای هر سطح شوری از رابطه (۲) محاسبه شد (Rhoades *et al.*, 1992).

$$TDS = K \times 640 \times EC \quad (2)$$

که در آن TDS مقدار کل نمک‌های محلول در آب براساس میلی‌گرم بر لیتر و EC هدایت الکتریکی محلول آب شور برحسب دسی‌زیمنس بر متر است. K ضریبی است که به درصد خلوص نمک مورد آزمایش بستگی دارد که با توجه به نمکی که در این آزمایش استفاده شد، این ضریب برابر  $0.86$  به‌دست آمد (Hassanli, 2013). در شکل (۲) شماتیکی از چیدمان طرح آورده شده است.



**Figure 2. Schematic of the experimental design and placement of treatments and its replicates; bold lines mark the irrigation pipes of each replicate**

در خاک، R رواناب،  $D_r$  زهکشی مصنوعی،  $S_t$  ذخیره سطحی آب و همگی براساس  $(LT^{-1})$  هستند. از SWAP می‌توان برای شبیه‌سازی رطوبت خاک، انتقال املاح، گرما، ناهمگنی خاک، تبخیر- تعرق روزانه، رشد و عملکرد محصول، آبیاری مزرعه و نیاز زهکشی آن استفاده کرد. ترکیب معادلات داری و پیوستگی منجر به معادله عمومی جریان آب در خاک‌های اشباع و غیر اشباع که تحت عنوان معادله ریچاردز شناخته می‌شود و به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \quad (4)$$

$$\frac{\partial [K(h)(\frac{\partial h}{\partial z} + 1)]}{\partial z} - S_a(h) - S_d(h) - S_m(h)$$

که در آن،  $\theta$  رطوبت حجمی  $(cm^3 cm^{-3})$ ، t زمان (d)،  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی  $(cm d^{-1})$ ، h هد فشار رطوبت خاک (cm)، z ارتفاع نقطه از سطح مبنا (cm)،  $S_a(h)$  مقدار جذب آب توسط ریشه گیاه  $(cm^3 cm^{-3} d^{-1})$ ،  $S_d(h)$  مقدار زهکشی از منطقه اشباع  $(cm^3 cm^{-3} d^{-1})$  و  $S_m(h)$  مقدار تبادل با منافذ ماکرو موجود در خاک  $(cm^3 cm^{-3} d^{-1})$  است. مدل SWAP از معادله ریچاردز به‌طور یکپارچه برای منطقه اشباع و غیر اشباع استفاده می‌کند. برای حل این معادله از روش عددی تفاضل‌های محدود و اعمال شرایط مرزی و استفاده از توابع هیدرولیکی خاک استفاده می‌شود. توابع هیدرولیکی خاک به‌عنوان روابط بین هدایت هیدرولیکی، رطوبت خاک و بار فشاری آب خاک تعریف می‌شوند (Kroes et al., 2017).

در طول دوره رشد، رشد گیاه بر پایه ارتفاع گیاه، سطح برگ و وزن خشک بوته از یک هفته بعد از اعمال تیمار تا پایان رسیدگی در چند نوبت اندازه‌گیری گردید. ارتفاع گیاه با استفاده از متر از محل طوقه تا زیر آخرین برگ برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. با توجه به تفاوت سه نوع واریته ذرت، برداشت و نمونه‌برداری از محصول به‌صورت علوفه‌ای برای رقم‌های زودرس سینگل‌کراس ۲۶۰ و ۴۰۰ و رقم دیررس سینگل‌کراس ۷۰۴ مطابق جدول (۲) انجام گرفت.

### مدل SWAP

SWAP یک مدل آگروهیدرولوژیکی یک بُعدی در مقیاس مزرعه مبتنی بر فرایندهای فیزیکی است که حرکت عمودی آب، املاح و گرما را در هر دو شرایط خاک اشباع و غیراشباع شبیه‌سازی می‌کند. این مدل برای شبیه‌سازی رطوبت خاک، انتقال املاح و رشد و عملکرد محصول در مقیاس مزرعه در طول دوره رشد توسعه یافته است. بیان آب مورد استفاده در مدل، تعامل بین آبیاری، تبخیر- تعرق و پارامترهای هیدرولوژیکی در یک ستون خاک غیراشباع و اشباع است (رابطه ۳).

$$\Delta W = \quad (3)$$

$P + I_{irr} + q_{bot} - ET_a - E_i - E_w - R - D_r - S_t$   
که در آن  $\Delta W$  تغییرات رطوبت در نیمرخ خاک، P بارش ناخالص،  $I_{irr}$  آب آبیاری،  $q_{bot}$  فلاکس جریان از انتهای ستون خاک،  $ET_a$  تبخیر- تعرق واقعی گیاه،  $E_i$  تبخیر آب از کانوپی گیاه،  $E_w$  تبخیر آب از ذخیره سطحی

**Table 2. Details of major activities and measured irrigation amount of three forage maize cultivars tested**

Maize cultivars	V1	V2	V3
Date of sowing	12 Jun 2017	12 Jun 2017	12 Jun 2017
Number of irrigations	28	23	23
Depth of irrigation (mm)	654.81	568.98	568.98
Rainfall during crop period (mm)	6.8	6.8	6.8
Date of harvesting	20 Sep 2017	5 Sep 2017	5 Sep 2017

املاح هستند (Kroes *et al.*, 2017). مدل SWAP طیف گسترده‌ای از شرایط مرزی بالا و پایین را در نظر می‌گیرد. تبخیر- تعرق پتانسیل، آبیاری و بارش شرایط مرزی بالا در سیستم را توصیف می‌کنند. علاوه بر این، شرایط مرزی پایین با گزینه‌های مختلف شامل عمق آب زیرزمینی، تابعی از زمان، شدت جریان از کف، تابعی از زمان، محاسبه شدت جریان از کف براساس مشخصات سفره آب، محاسبه شدت جریان براساس تابع نمایی، تعیین شدت جریان با توجه به بار هیدرولیکی آب در خاک، تابعی از زمان، جریان از کف برابر صفر، جریان زهکشی آزاد از کف با شیب هیدرولیکی برابر یک و جریان آزاد از منافذ خاک قابل توصیف است. توضیحات تکمیلی‌تر در مورد مدل SWAP در Kroes *et al.* (2017) ارائه شده است.

### داده‌های ورودی مدل SWAP

#### داده‌های هواشناسی

مدل SWAP از داده‌های هواشناسی به صورت روزانه استفاده می‌کند. داده‌های هواشناسی شامل بارندگی روزانه، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، فشار بخار و تابش خورشیدی برای ساخت فایل هواشناسی ورودی استفاده شد (شکل ۳).

#### مشخصات هیدرولیکی خاک و پارامترهای انتقال املاح

پارامترهای مورد نیاز برای توصیف خصوصیات هیدرولیکی خاک در مزرعه مورد مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و در جدول (۳) ارائه شده است. مدل SWAP با استفاده از پارامترهای معلم- ونگنوختن (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) خصوصیات هیدرولیکی خاک را برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در محیط متخلخل توصیف می‌کند. پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه از طریق نرم‌افزار RETC به دست آمدند.

مدل SWAP دارای سه ماژول برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه است. الف- ماژول تفصیلی رشد گیاه (Detailed crop growth)، ب- ماژول تفصیلی رشد چمن (Detailed grass growth) و ج- ماژول ساده رشد گیاه (Simple crop growth). در مطالعه حاضر، از ماژول تفصیلی گیاه برای شبیه‌سازی رشد گیاه و عملکرد آن استفاده شده است (Kroes *et al.*, 2017). ماژول تفصیلی گیاه در SWAP براساس مدل WOFOST (Van Diepen *et al.*, 1989; Boogaard *et al.*, 1998)، یک مدل شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل کمی رشد و تولید محصولات زراعی یکساله است. شرح کامل WOFOST در سایت [www.wur.nl](http://www.wur.nl) در دسترس است. WOFOST با کمی‌سازی فتوسنتز، تنفس، ذخیره و نحوه تأثیرپذیری آن‌ها از شرایط محیطی، رشد گیاه را شبیه‌سازی می‌کند. در بخش توسعه فنولوژیکی، براساس مجموع درجه حرارت، کل دوره رشد گیاه (Development stage, DVS) را به دو بخش دوره رویشی، از جوانه‌زنی (DVS=0) تا زمان گلدهی (DVS=1) و دوره زایشی، از گلدهی تا زمان رسیدگی فنولوژیکی (DVS=2) تقسیم می‌کند و نرخ رشد گیاه را برآورد می‌نماید.

در مدل SWAP عمق آبیاری می‌تواند در زمان‌های ثابت تعیین شود یا طبق تعدادی از معیارها برنامه‌ریزی شود. انتقال همرفت، انتشار و پخشیدگی سه فرایند اصلی انتقال املاح است که در SWAP استفاده می‌شود. شار کل املاح در مدل SWAP با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$J = J_{con} + J_{dif} + J_{dis} = qc - \theta(D_{dif} + D_{dis})\frac{\partial c}{\partial z} \quad (5)$$

که در آن،  $J$  شار املاح کل ( $\text{mg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $J_{con}$  شار همرفت ( $\text{mg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $J_{dif}$  شار پخشیدگی ( $\text{mg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ )،  $J_{dis}$  شار انتشار ( $\text{mg cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) و  $q$  جریان عمودی در انتها ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ )،  $D_{dif}$  ضریب پخشیدگی املاح ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ )،  $D_{dis}$  ضریب انتشار املاح ( $\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$ ) و  $\frac{\partial c}{\partial z}$  گرادینان غلظت

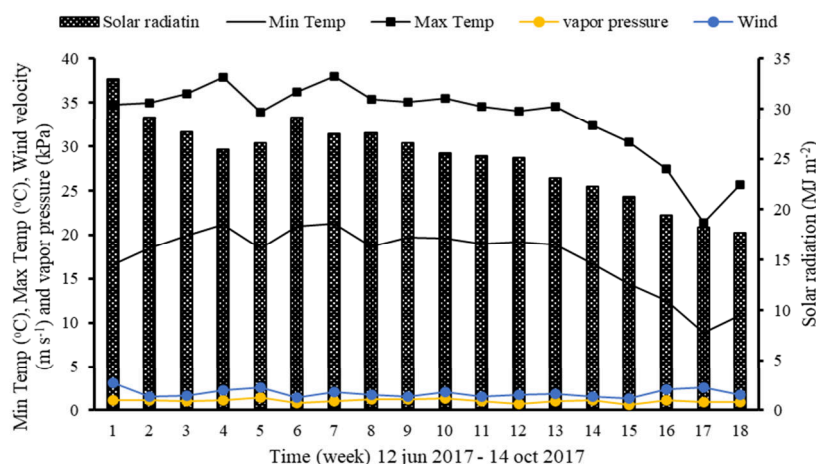


Figure 3. Weekly meteorological data during the crop growth period for 2017 in the research farm

Table 3. Mualem-van Genuchten parameters describing the hydraulic properties of soil in the study farm

Soil	Topsoil (cm)		Subsoil (cm)
	0-20	20-40	40-60
Residual water content, ORES (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup>	0.0809	0.0801	0.0773
Saturated water content, OSAT (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	0.4445	0.4432	0.4267
Parameter alpha of main drying curve, ALFA (cm <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	0.0097	0.0087	0.0103
Parameter n, NPAR <sup>2</sup>	1.4950	1.4982	1.4784
Exponent in hydraulic conductivity function, LEXP <sup>3</sup>	0.5	0.5	0.5
Saturated hydraulic conductivity, (cm d <sup>-1</sup> ) <sup>*</sup>	12.77	12.89	9.57

1. Measured; 2. Calibrated; 3. SWAP default; \* RETC software (Van Genuchten *et al.*, 1991)

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مراحل واسنجی مدل شامل انتخاب پارامترهای مدل و تعیین بازه‌های موردنظر هر پارامتر برای بهینه‌سازی اختلافات موجود بین مقدار مشاهده‌شده و پیش‌بینی شده است. واسنجی مدل به‌طور کلی به‌وسیله تنظیم پارامترهای ورودی و تعیین حدود ثابت برای هر یک صورت می‌گیرد، به‌طوری‌که مقادیر خروجی بسیار به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک باشد. صحت‌سنجی در اصل آزمودن مستقل مدل است، در مرحله‌ای که برآوردهای مدل با داده‌هایی که در واسنجی استفاده نشده است، آزموده می‌شود. هدف از صحت‌سنجی مدل اطمینان از کیفیت و ظرفیت برآوردهای مدل به‌وسیله مقایسه با داده‌های مزرعه‌ای است. برای صحت‌سنجی، شرایط ابتدایی، شرایط مرزی و همه پارامترهای ورودی مدل باید به‌صورت صحیح انجام شود.

### داده‌های گیاهی و آبیاری

داده‌های ورودی مدل SWAP مربوط به گیاه در جدول (۴) نشان ارائه شده است. غلظت آب آبیاری در هر سه رقم ذرت مورد مطالعه شامل ۰/۴۵، ۱/۹۲ و ۳/۲۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب است و مقادیر آبیاری در هر نوبت در طول فصل رشد در شکل (۴) ارائه شده است. سطح ویژه برگ (Specific Leaf Area, SLA) سه رقم ذرت مورد مطالعه تحت سه سطح شوری آب آبیاری که با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شده‌اند، در جدول (۵) نشان داده شده است.

$$SLA = \frac{LA}{10000 \times W} \quad (6)$$

که در آن LA مجموع مساحت برگ‌ها (m<sup>2</sup>) و W وزن خشک برگ‌های گیاه ذرت (kg) است. در جدول (۶) مقادیر مربوط به فاکتورهای تبدیل بیومس به ریشه، برگ و ساقه در تیمارهای آزمایشی ارائه شده است.



ارزیابی مدل SWAP در برآورد رطوبت، شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور

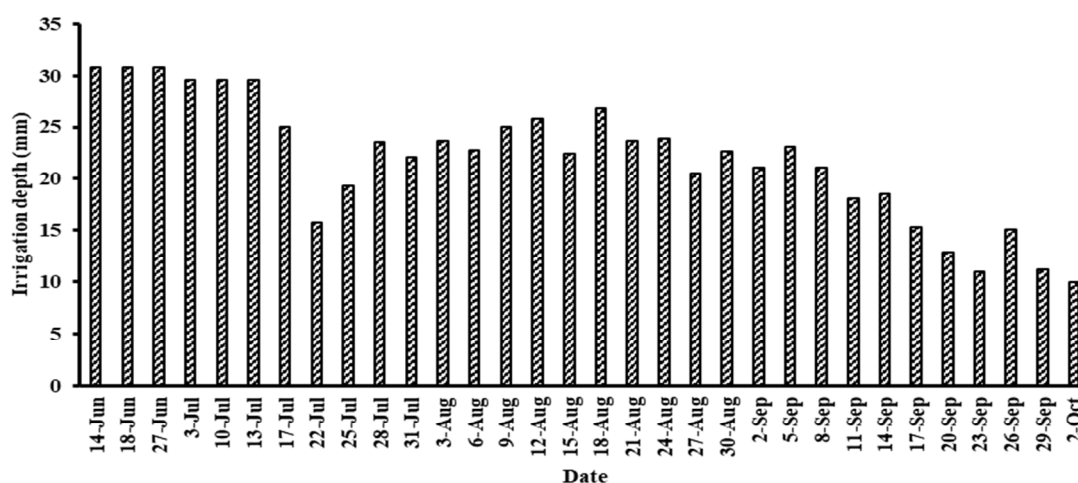
سه رقم ذرت علوفه‌ای مورد مطالعه، به ترتیب براساس داده‌های اندازه‌گیری شده در تیمارهای V2S2، V1S2 و V3S2 انجام شد و صحت‌سنجی براساس داده‌های اندازه‌گیری شده در دیگر تیمارها (V1S1، V1S3، V2S1، V2S3 و V3S1 و V3S3) انجام شد.

در این مطالعه واسنجی مدل برای رطوبت و شوری خاک در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ براساس داده‌های مزرعه‌ای تیمار V1S2 و صحت‌سنجی آن با استفاده از داده‌های تیمار V1S3 انجام شد. همچنین واسنجی مدل برای شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و عملکرد علوفه در هر

**Table 4. Crop input data of SWAP model for three forage maize cultivars of 704, 400 and 260 (V1, V2 and V3) studied in the research in 2017**

Main input data	Maize cultivars		
	V1	V2	V3
<b>GENERAL SECTION</b>			
Simulation period	12 Jun – 14 Oct	12 Jun – 14 Oct	12 Jun – 14 Oct
Concentration of irrigation water, (mg cm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	0.45, 1.92, 3.20	0.45, 1.92, 3.20	0.45, 1.92, 3.20
<b>CROP SECTION</b>			
Date of crop emergence, CROPSTART <sup>1</sup>	17 Jun 2017	17 Jun 2017	17 Jun 2017
Date of crop harvest, CROPEND <sup>1</sup>	20 Sep 2017	5 Sep 2017	5 Sep 2017
Maximum rooting depth, RDS (cm) <sup>1</sup>	60	60	60
Maximum crop height (cm) <sup>1</sup>	265, 265, 255	205, 205, 200	250, 230, 220
Crop reflection coefficient, ALBEDO <sup>2</sup>	0.3	0.3	0.3
Minimum canopy resistance, RSC (s m <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	131	131	131
Temperature sum from emergence to anthesis, TSUMEA (°C) <sup>2</sup>	1200.15	1100.15	975.15
Temperature sum from anthesis to maturity, TSUMAM (°C) <sup>2</sup>	800.25	620	755
Initial total crop dry weight, TDWI (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>3</sup>	20	20	20
Leaf area index at emergence, LAIEM (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) <sup>3</sup>	0.04836	0.04836	0.04836
Maximum relative increase in LAI, RGRLAI (m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	0.10519	0.15531	0.08788
Life span under leaves under optimum conditions, SPAN (d) <sup>2</sup>	36	30	33
Extinction coefficient for diffuse visible light, KDIF <sup>2</sup>	0.6	0.65	0.6
Extinction coefficient for direct visible light, KDIR <sup>2</sup>	0.75	0.72	0.75
Light use efficiency for real leaf, EFF (kg CO <sub>2</sub> J <sup>-1</sup> adsorbed) <sup>2</sup>	0.6	0.69	0.54
Threshold salt concentration in soil water, SALTMAX (mg cm <sup>-3</sup> ) <sup>*</sup>	6.845	2.820	2.690
Decline of root water uptake above threshold, SALTSLOPE (mg cm <sup>-3</sup> ) <sup>*</sup>	0.025	0.053	0.053

1. Measured; 2. Calibrated; 3. SWAP default; \* Khoshismaie chenar and Noory (2021)



**Figure 4. Irrigation input data of SWAP model for three forage maize cultivars of 704, 400 and 260 (V1, V2 and V3) studied in the research farm in 2017**

**Table 5. Specific leaf area (ha kg<sup>-1</sup>) of SWAP model input for three forage maize cultivars of 704, 400 and 260 (V1, V2 and V3) studied in the research farm in 2017**

Maize Cultivars	DVS	SLA in different water salinity		
		S1	S2	S3
V1	0	0.0030	0.00026	0.0014
	0.66	0.0011	0.0011	0.0011
	0.84	0.0011	0.0014	0.0014
	0.9	0.0007	0.0007	0.0007
	1.1	0.0008	0.001	0.001
	1.64	0.0008	0.001	0.001
	1.94	0.0007	0.0007	0.0008
V2	0	0.00135	0.00159	0.00239
	0.47	0.00134	0.00134	0.00144
	0.77	0.00116	0.00084	0.00084
	0.98	0.00104	0.00087	0.00087
	1.29	0.00072	0.00063	0.00062
	1.57	0.00064	0.00061	0.00079
	1.92	0.00064	0.00069	0.00065
V3	0	0.0027	0.0015	0.0013
	0.47	0.0012	0.0012	0.0012
	0.77	0.0011	0.0014	0.0014
	0.98	0.001	0.0007	0.0007
	1.29	0.0006	0.0006	0.0004
	1.57	0.0008	0.0007	0.0008
	1.92	0.0008	0.0008	0.0007

**Table 6. Partitioning factors of SWAP model for three forage maize cultivars of 704, 400 and 260 (V1, V2 and V3) studied in the research farm in 2017**

Partitioning	V1 * EC				V2 * EC				V3 * EC			
	DVS	S1	S2	S3	DVS	S1	S2	S3	DVS	S1	S2	S3
FRTB <sup>a</sup>	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4
	0.4	0.2	0.2	0.2	0.47	0.28	0.28	0.28	0.47	0.08	0.08	0.08
	0.66	0.15	0.18	0.18	0.77	0.13	0.13	0.13	0.77	0.4	0.05	0.05
	0.84	0.12	0.17	0.17	1	0.11	0.11	0.11	1	0.05	0.03	0.03
	0.95	0.12	0.11	0.13	1.29	0.15	0.11	0.15	1.29	0.19	0.09	0.21
	1	0	0	0	1.93	0.1	0.12	0.1	1.57	0.05	0.08	0.05
FLTB <sup>b</sup>	0	0.52	0.52	0.62	0	0.62	0.62	0.62	0	0.62	0.62	0.62
	0.4	0.69	0.59	0.69	0.47	0.6	0.6	0.6	0.47	0.68	0.68	0.68
	0.66	0.69	0.54	0.64	0.77	0.43	0.63	0.63	0.8	0.68	0.63	0.63
	0.95	0.5	0.59	0.52	0.98	0.52	0.5	0.5	0.95	0.59	0.34	0.33
	1.1	0.28	0.1	0.1	1.1	1	0.1	0.1	1.1	0.1	0.1	0.1
	1.2	0	0	0	1.2	0	0	0	1.2	0	0	0
FSTB <sup>c</sup>	0	0.48	0.48	0.38	0	0.38	0.38	0.38	0	0.38	0.38	0.38
	0.4	0.31	0.41	0.31	0.47	0.4	0.4	0.4	0.47	0.32	0.32	0.32
	0.66	0.31	0.46	0.36	0.77	0.57	0.37	0.37	0.8	0.32	0.37	0.37
	0.95	0.5	0.41	0.48	0.98	0.48	0.5	0.5	0.95	0.41	0.66	0.67
	1.1	0.22	0.4	0.4	1.1	0.4	0.4	0.4	1.1	0.4	0.4	0.4
	1.2	0	0	0	1.2	0	0	0	1.2	0	0	0
2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	

a) Fraction of total dry matter increases partitioned to the roots (kg kg<sup>-1</sup>) as function of development stage (DVS)

b) Fraction of total above ground dry matter increases partitioned to the leaves (kg kg<sup>-1</sup>) as function of development stage (DVS)

c) Fraction of total above ground dry matter increases partitioned to the stems (kg kg<sup>-1</sup>) as function of development stage (DVS)

باقی مانده (CRM) (Moriassi *et al.*, 2007) و ضریب

تعیین (R<sup>2</sup>) (رابطه های ۷ تا ۹) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSE = RMSE \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (9)$$

## ارزیابی مدل

ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و صحت سنجی با مقایسه

ارتفاع گیاه، عملکرد، رطوبت و شوری خاک

اندازه گیری شده و نتایج شبیه سازی شده انجام شد و از

آماره های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه

میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

ارزیابی مدل SWAP در برآورد رطوبت، شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور

رطوبت را بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه برآورد کرده است. در مجموع با توجه به شکل (۵) و مقدار خطای مدل در اعماق مختلف خاک (جدول ۷)، مدل رطوبت را به‌خوبی برآورد کرده است. بخشی از اختلاف بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ممکن است ناشی از محدودیت‌های ذاتی مدل SWAP باشد. برای مثال تأثیر پدیده پسماند رطوبت (Hysteresis) و جریان ترجیحی آب از میان منافذ درشت خاک در این مدل منظور نشده است. دلیل دیگر بی‌دقتی مدل‌ها، ساده‌سازی‌های مرتبط با بعضی داده‌های ورودی است.

که در رابطه‌های بالا  $S_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است و  $n$  تعداد مقادیر مشاهداتی و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

## نتایج و بحث

### رطوبت خاک

نتایج ارزیابی مدل در برآورد رطوبت در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی (شکل ۵ و جدول ۷) ارائه شده است. با توجه به شکل (۵) ملاحظه می‌شود که مدل رطوبت خاک را تا عمق ۴۰ سانتی‌متری خوب شبیه‌سازی کرده است و در عمق ۶۰ سانتی‌متری، مدل

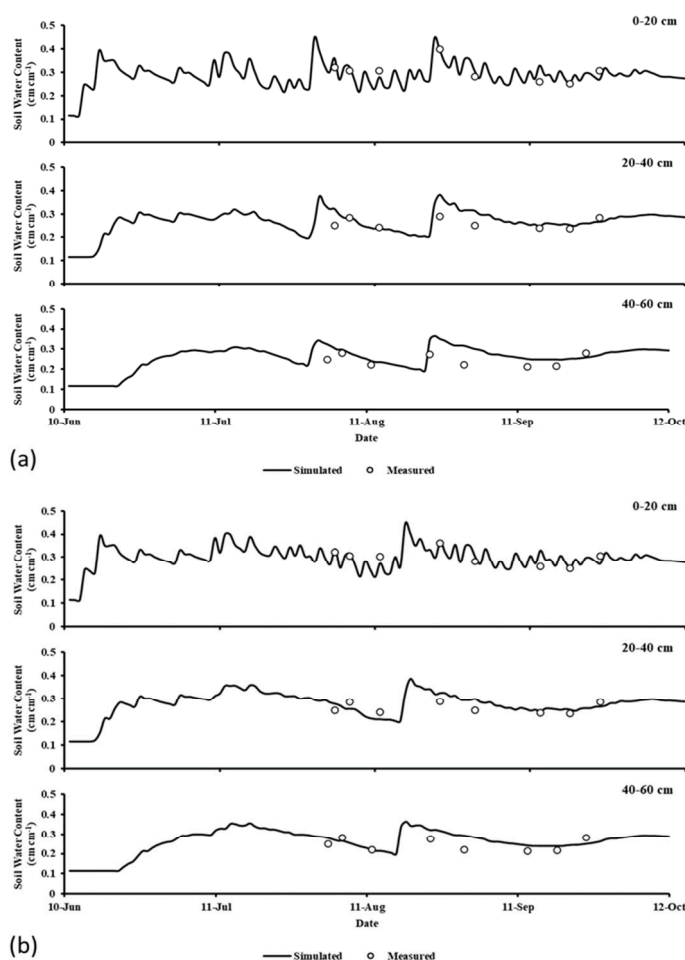


Figure 5. Soil water content measured and simulated by SWAP model of three layers of soil of the research farm in 2017 in two stages of calibration (a) and validation (b)

Table 7. The statistical result for simulating water content and soil salinity in the calibration and validation stages

Treatment	Soil layer (cm)	Soil water content (cm cm <sup>-3</sup> )				Soil salinity (mg cm <sup>-3</sup> )				
		CRM <sup>a</sup>	RMSE <sup>b</sup>	NRMSE <sup>c</sup>	R <sup>2d</sup>	CRM	RMSE	NRMSE	R <sup>2</sup>	
Calibration	VIS2	0-20	-0.04	0.03	11.36	0.99	0.03	0.31	6.89	1
		20-40	-0.11	0.05	17.74	0.98	-0.01	0.52	13.53	0.98
		40-60	-0.16	0.05	21.96	0.98	0.21	0.87	26.56	0.96
Validation	VIS3	0-20	-0.02	0.03	10.52	0.99	-0.002	0.67	12.74	0.99
		20-40	-0.02	0.03	11.43	0.99	0.17	1.16	23.75	0.86
		40-60	-0.07	0.04	14.83	0.98	0.32	1.19	35.49	0.95

a) Coefficient of residual mass (-)

b) Root means square error (cm cm<sup>-3</sup> for Soil water content and mg cm<sup>-3</sup> for soil salinity)

c) Normalized root means square error (%)

d) Coefficient of determination (-)

شوری خاک را تا عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک خوب شبیه‌سازی کرده است و انطباق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. با توجه به نتایج بخش رطوبت در عمق ۶۰ سانتی‌متری، مدل رطوبت را بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه برآورد کرده است که دلیلی بر پیش‌بینی کم شوری و غلظت نمک در این عمق است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار شوری و غلظت نمک مربوط به عمق سطحی خاک (۰-۲۰ سانتی‌متر) بوده است که توسط پژوهش‌گران متعددی نیز گزارش شده است (Kumar *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Diaz *et al.*, 2018).

با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری ارائه‌شده در جدول (۷)، در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مقادیر RMSE به‌جز عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک در مرحله صحت‌سنجی کم‌تر از ۱ میلی‌گرم در سانتی‌متر مکعب است، شاخص CRM نشان می‌دهد که مدل در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک در مرحله صحت‌سنجی و ۴۰ سانتی‌متری خاک در مرحله واسنجی مقادیر شوری خاک را بیش‌تر برآورد کرده است. مقادیر شاخص‌های آماری نشان داد که عملکرد مدل برای شبیه‌سازی شوری خاک در عمق‌های ۲۰ و ۴۰ مناسب بوده و با افزایش عمق خاک، دقت شبیه‌سازی مدل SWAP کاهش می‌یابد که با نتایج پژوهش‌ها (Verma *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2016) مطابقت

مقادیر RMSE نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده متناظر، صرف‌نظر از این که کم‌تر یا بیش‌تر باشد، وجود دارد. مقدار این شاخص در سه عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متر در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ و ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ است که در مجموع کم و قابل قبول است. مقدار CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای برآورد بالاتر یا پایین‌تر در مقایسه با اندازه‌گیری‌هاست. مقادیر مثبت برای CRM نشان‌دهنده برآورد کم‌تر مدل و مقادیر منفی آن به معنی برآورد بیش‌تر مدل نسبت به اندازه‌گیری‌هاست. براساس این شاخص مدل در هر سه عمق خاک و در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی تمایل به برآورد بیش‌تر دارد. مقدار NRMSE به‌جز تیمار VIS2 و عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک کم‌تر از ۲۰ درصد است (جدول ۷). مقادیر شاخص‌های آماری نشان دادند که عملکرد مدل برای شبیه‌سازی رطوبت خاک خوب و قابل قبول است که با نتایج پژوهش‌ها (Xu *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2016) مطابقت دارد.

### شوری خاک

نتایج ارزیابی مدل در برآورد شوری خاک در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در شکل (۶) و جدول (۷) ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل

ارزیابی مدل SWAP در برآورد رطوبت، شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور

تیمارهای مختلف و در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷) و شاخص‌های آماری ارائه‌شده (جدول ۸)، مشاهده می‌شود که مقادیر ارتفاع اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده انطباق خوبی دارند و با افزایش شوری آب آبیاری ارتفاع گیاه کاهش پیدا می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش‌ها (Chen *et al.*, 2009; Feizi *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015) مطابقت دارد.

دارد. اختلاف مشاهده‌شده بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده مدل در عمق ۶۰ سانتی‌متری خاک نسبت به عمق ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متری بیش‌تر بود که با نتایج پژوهش Kumar *et al.* (2015) مطابقت دارد.

### ارتفاع و عملکرد گیاه ذرت

شکل (۷) نتایج ارتفاع ذرت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در طول فصل رشد در

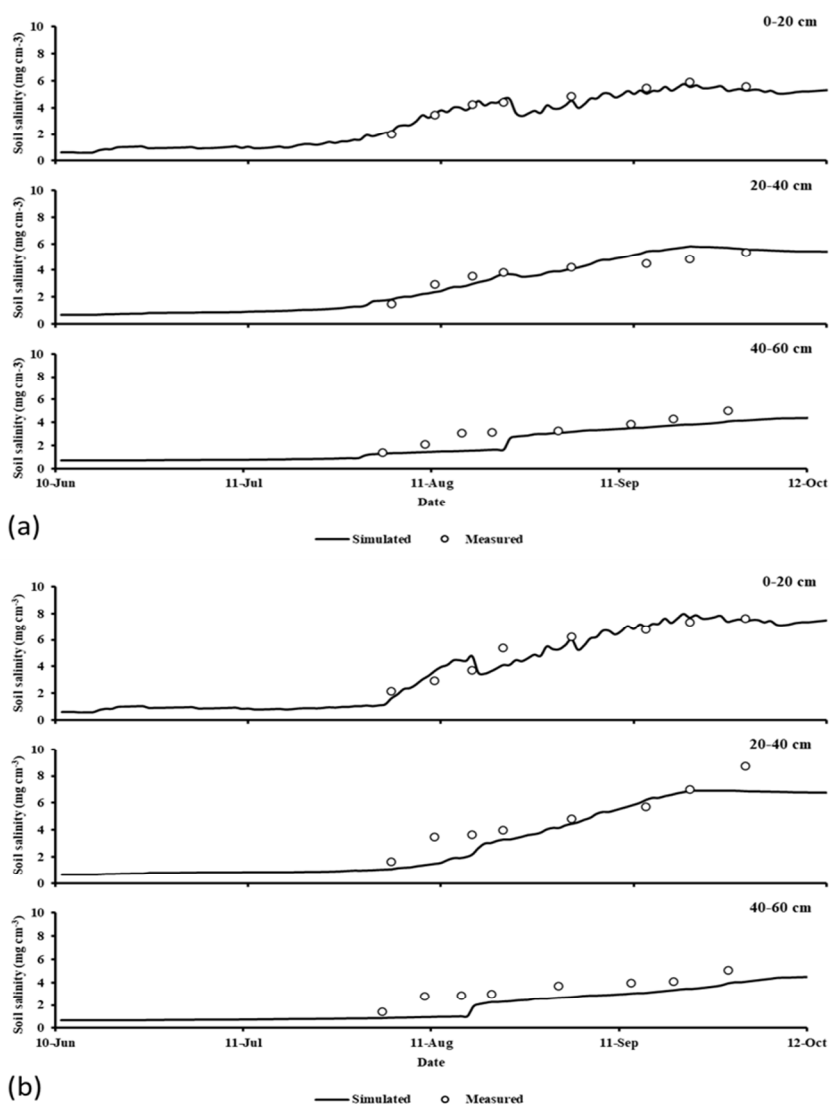
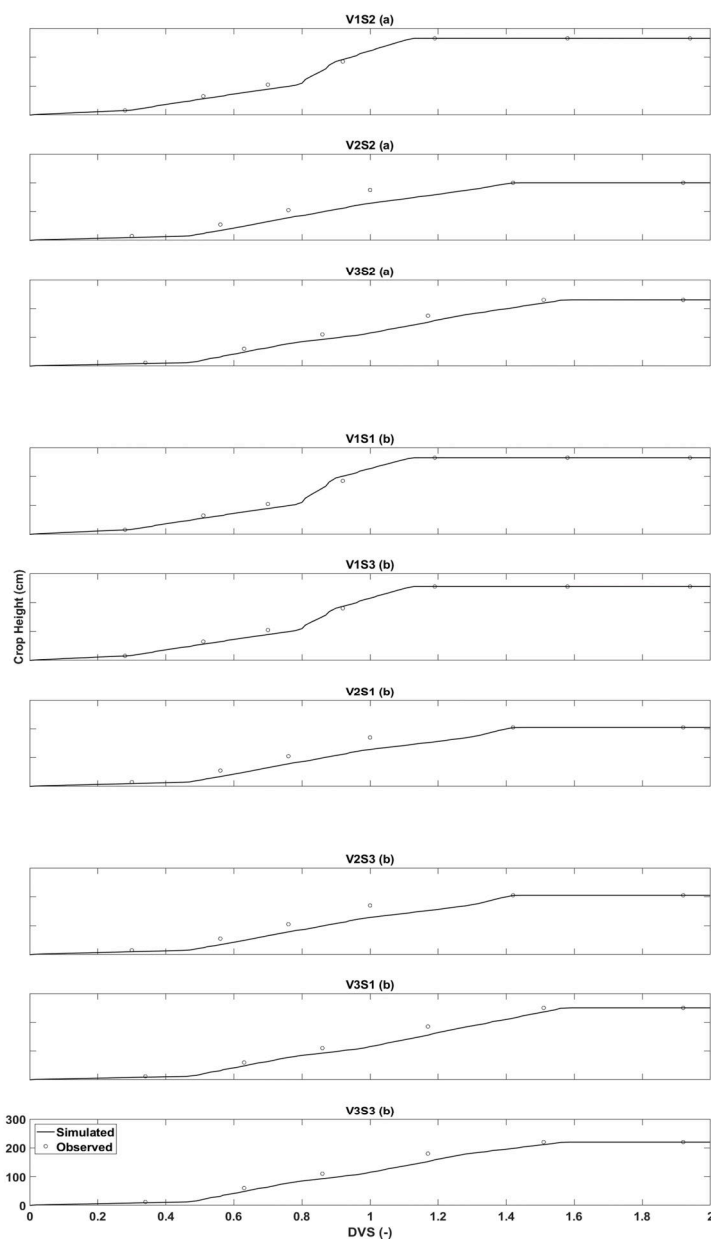


Figure 6. Soil salinity measured and simulated by SWAP model of three layers of soil of the research farm in 2017 in two stages of calibration (a) and validation (b)

**Table 8.** The statistical result for simulating crop height in the calibration and validation stages

	Treatment	Crop height			
		CRM (-)	RMSE (cm)	NRMSE (%)	R <sup>2</sup> (-)
Calibration	V1S2	0.02	8.29	4.98	0.99
	V2S2	0.15	23.47	18.77	0.93
	V3S2	0.09	13.43	9.86	0.99
Validation	V1S1	0.01	9.14	5.49	0.99
	V2S1	0.14	21.97	17.46	0.94
	V3S1	0.10	16.02	11.09	0.98
	V1S3	0.02	7.25	4.48	0.99
	V2S3	0.14	21.97	17.46	0.94
	V3S3	0.09	14.72	11.01	0.98



**Figure 7.** Crop height measured and simulated by SWAP model for three forage maize cultivars of 704, 400 and 260 (V1, V2 and V3) studied in the research farm in 2017 in two stages of calibration (a) and validation (b)

ارزیابی مدل SWAP در برآورد رطوبت، شوری خاک و عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای در شرایط استفاده از آب شور

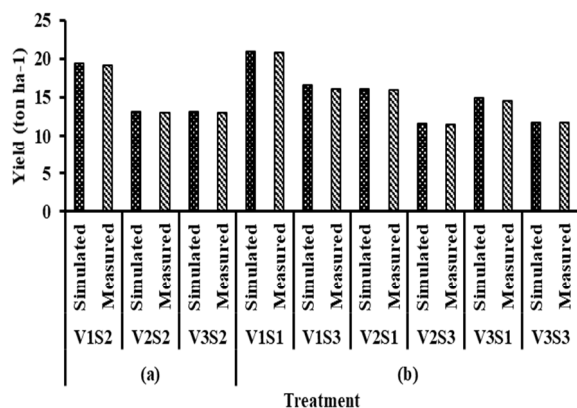


Figure 8. Crop yield measured and simulated by SWAP model in SC 704, 400 and 206 (V1, V2 and V3) maize cultivars in the research farm in 2017 in two stages of calibration (a) and validation (b)

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل SWAP برای پیش‌بینی رطوبت و شوری خاک، عملکرد و اجزای عملکرد سه رقم ذرت علوفه‌ای تحت آبیاری با آب شور با استفاده از داده‌های آزمایشی به‌دست‌آمده در سال ۱۳۹۶ واسنجی و صحت‌سنجی شد. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده هر رقم ذرت در تیمارهای با شوری آب آبیاری ۳ دسی‌زیمنس بر متر واسنجی و سپس با استفاده از تیمارهای شوری آب آبیاری ۰/۷ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر صحت‌سنجی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل SWAP عملکرد خوبی در برآورد رطوبت خاک داشته است، به‌طوری‌که مقدار RMSE در مرحله صحت‌سنجی در سه لایه خاک (۲۰-۴۰، ۰-۲۰) و ۶۰-۸۰ سانتی‌متری) به‌ترتیب ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ (cm cm<sup>-3</sup>) به‌دست آمد. مدل SWAP در پیش‌بینی شوری خاک لایه سطحی ۰-۲۰ سانتی‌متری دقت خوبی (RMSE برابر ۰/۶۷ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب) داشته است، اما با افزایش عمق خاک دقت مدل کاهش پیدا می‌کند، به‌طوری‌که مقدار RMSE به‌ترتیب در دو لایه ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری ۱/۱۶ و ۱/۱۹ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد. هم‌چنین بدون توجه به شوری آب آبیاری مدل

شاخص CRM نشان می‌دهد که در همه تیمارها و در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل تمایل به برآورد کم‌تر ارتفاع گیاه دارد. هم‌چنین شاخص NRMSE در همه تیمارها، به‌جز تیمارهای مربوط به رقم ذرت سینگل‌کراس V1 کوچک‌تر از ۲۰ درصد است که نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب مدل در برآورد ارتفاع گیاه ذرت در هر دو رقم V1 و V3 و عملکرد قابل قبول برای رقم V2 است. در هر سه رقم مورد مطالعه مدل به‌خوبی اختلاف ارتفاع بین ارقام را تشخیص داده و ارتفاع هر سه رقم ذرت مورد مطالعه با افزایش سطوح شوری کاهش می‌یابد.

در شکل (۸)، نتایج مقدار کل ماده خشک تولیدی سه رقم ذرت مورد مطالعه و در سه سطح شوری آب آبیاری توسط مدل SWAP در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ارائه شده است. مشخص است. شکل (۸) نتایج مقدار کل ماده خشک تولیدی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در تیمارهای مختلف و در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد. شاخص‌های R<sup>2</sup>، RMSE، CRM و NRMSE در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۹۹، ۱۳۶ کیلوگرم بر هکتار، ۰/۹ درصد و ۰/۰۸- و در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۹۹، ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار، ۲ درصد و ۰/۱۶- است. شاخص R<sup>2</sup> در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برابر ۱، RMSE در مرحله واسنجی، ۱۳۶ کیلوگرم بر هکتار و در مرحله صحت‌سنجی، ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار، هم‌چنین CRM در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، منفی بوده که نشان می‌دهد مدل SWAP تمایل به بیش‌برآورد ماده خشک کل دارد. نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش‌های Verma et al. (2010)، Kumar et al. (2012)، Hassanli (2013)، Jiang et al. (2015) و (2016) مطابقت دارد.

- Strategies for Better Yield of Safflower ('*Carthamus tinctorius*' L.) in An Arid Region. *Australian Journal of Crop Science*, 4(6), 408.
- Feng, G., Zhang, Z., Wan, C., Lu, P., & Bakour, A. (2017). Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system. *Agricultural Water Management*, 193, 205-213.
- Hamada, K., Inoue, H., Mochizuki, H., Asakura, M., Shimizu, Y., & Takemura, T. (2020). Evaluating Maize Drought and Wet Stress in a Converted Japanese Paddy Field Using a SWAP Model. *Water*, 12(5), 1363.
- Hassanli, M. (2013). *Management of using saline water in drip irrigation to increase water use efficiency and lands sustainability*. MSc thesis, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, collage of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, 86 pages. (In Persian).
- Huang, C. H., Xue, X., Wang, T., De Mascellis, R., Mele, G., You, Q. G., ... & Tedeschi, A. (2011). Effects of saline water irrigation on soil properties in northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 63(4), 701-708.
- Jiang, J., Feng, S., Huo, Z., Zhao, Z., & Jia, B. (2011). Application of the swap model to simulate water-salt transport under deficit irrigation with saline water. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 902-911.
- Jiang, J., Feng, S., Ma, J., Huo, Z., & Zhang, C. (2016). Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model. *Field Crops Research*, 196, 85-97.
- Jiang, J., Huo, Z., Feng, S., & Zhang, C. (2012). Effect of irrigation amount and water salinity on water consumption and water productivity of spring wheat in Northwest China. *Field Crops Research*, 137, 78-88.
- Kamyab-Talesh, F., Mostafazadeh-Fard, B., Vazifedoust, M., Shayannejad, M., & Navabian, M. (2017). Salt Tolerance Analysis of Crops Using the SWAP Model. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 14(2), 643-649.
- Khoshsimaie chenar, M. & Noory, H. (2021). Effect of Irrigation Water Salinity on Soil Salinity and Yield of Three Maize Hybrids in Drip Irrigation System. In: *The first national conference on irrigation deficiency and the use of unconventional water in agriculture in dry areas*, 17 February, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 57-70. (In Persian).
- SWAP اختلاف ذاتی بین ارقام مختلف گیاه ذرت را به‌خوبی تشخیص داده و بهترین نتایج شبیه‌سازی به‌ترتیب برای رقم‌های سینگل‌کراس ۷۰۴، ۲۶۰ و ۴۰۰ به‌دست آمد که می‌توان آن را به شباهت رقم ذرت سینگل‌کراس ۷۰۴ به ذرت مورد‌استفاده برای توسعه مدل SWAP نسبت داد. مدل SWAP عملکرد علوفه سه رقم ذرت مورد مطالعه را در آخر فصل با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی می‌کند. به‌طورکلی می‌توان از این مدل در مطالعات مختلف برای ارقام مختلف ذرت تحت شرایط شوری آب آبیاری و خاک استفاده کرد.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

### منابع

- Amiri, E. (2017). Evaluation of water schemes for maize under arid area in Iran using the SWAP Model. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(16), 1963-1976.
- Ben-Asher, J., Van Dam, J., Feddes, R. A., & Jhorar, R. K. (2006). Irrigation of grapevines with saline water: II. Mathematical simulation of vine growth and yield. *Agricultural Water Management*, 83(1-2), 22-29.
- Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Rotter, R. P., Cabrera, J. M. C. A., & Van Laar, H. H. (1998). *WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5* (No. 52). SC-DLO.
- Chen, M., Kang, Y., Wan, S., & Liu, S. P. (2009). Drip irrigation with saline water for oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Agricultural Water Management*, 96(12), 1766-1772.
- Chen, S., Mao, X., Barry, D. A., & Yang, J. (2019). Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil. *Agricultural Water Management*, 221, 160-174.
- Díaz, F. J., Grattan, S. R., Reyes, J. A., de la Roza-Delgado, B., Benes, S. E., Jiménez, C., ... & Tejedor, M. (2018). Using saline soil and marginal quality water to produce alfalfa in arid climates. *Agricultural Water Management*, 199, 11-21.
- Feizi, M., Hajabbasi, M. A., & Mostafazadeh-Fard, B. (2010). Saline Irrigation Water Management



- Kroes, J.G., van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit, P.E.V & van Walsum. (2017). SWAP version 4; *Theory description and user manual*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780.
- 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.
- Li, P., & Ren, L. (2019). Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. Parameter sensitivity analysis, calibration and model validation. *Journal of Hydrology*, 574, 497-516.
- Li, X., Kang, Y., Wan, S., Chen, X., & Xu, J. (2015). Effect of drip-irrigation with saline water on Chinese rose (*Rosa chinensis*) during reclamation of very heavy coastal saline soil in a field trial. *Scientia Horticulturae*, 186, 163-171.
- Ma, Y., Feng, S., & Song, X. (2015). Evaluation of optimal irrigation scheduling and groundwater recharge at representative sites in the North China Plain with SWAP model and field experiments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 125-136.
- Malash, N.M., Ali, F.A., Fatahalla, M.A., Khatab, E., Hatem, M.K., & Tawfic, S. (2012). Response of tomato to irrigation with saline water applied by different irrigation methods and water management strategies. *International Journal of Plant Production*, 2(2), 101-116.
- Minhas, P. S., Ramos, T. B., Ben-Gal, A., & Pereira, L. S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agricultural Water Management*, 227, 105832.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Mostafazadeh-Fard, B., Mansouri, H., Mousavi, S. F., & Feizi, M. (2009). Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 32-38.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Pan, Y., Yuan, C., & Jing, S. (2020). Simulation and optimization of irrigation schedule for summer maize based on SWAP model in saline region. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(3), 117-122.
- Qadir, M., Quill rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., ... & Noble, A. D. (2014). Economics of salt-induced land degradation and restoration. In *Natural Resources Forum* 38, 282-295.
- Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A., & Ragab, R. (2016). Effects of drip-irrigation regimes with saline water on pepper productivity and soil salinity under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 199, 114-123.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). The use of saline waters for crop production-FAO irrigation and drainage paper 48. *FAO, Rome*, 133.
- Singh, A., & Panda, S. N. (2012). Effect of saline irrigation water on mustard (*Brassica Juncea*) crop yield and soil salinity in a semi-arid area of North India. *Experimental Agriculture*, 48(1), 99-110.
- Soltani, M., Kerachian, R., Nikoo, M. R., & Noory, H. (2018). Planning for agricultural return flow allocation: application of info-gap decision theory and a nonlinear CVaR-based optimization model. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 25115-25129.
- Stahn, P., Busch, S., Salzmann, T., Eichler-L bermann, B., & Miegel, K. (2017). Combining global sensitivity analysis and multiobjective optimisation to estimate soil hydraulic properties and representations of various sole and mixed crops for the agro-hydrological SWAP model. *Environmental Earth Sciences*, 76(10), 367.
- Van Diepen, C. V., Wolf, J., Van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16-24.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Vazifedoust, M., Van Dam, J. C., Feddes, R. A., & Feizi, M. (2008). Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95(2), 89-102.

- Verma, A. K., Gupta, S. K., & Isaac, R. K. (2010). Long-term use of saline drainage waters for irrigation in subsurface drained lands: simulation modelling with SWAP. *Journal of Agricultural Engineering*, 47(3), 15-23.
- 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.
- Wang, X., Yang, J., Liu, G., Yao, R., & Yu, S. (2015). Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution. *Agricultural Water Management*, 149, 44-54.
- Xu, X., Huang, G., Sun, C., Pereira, L. S., Ramos, T. B., Huang, Q., & Hao, Y. (2013). Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: Searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin. *Agricultural Water Management*, 125, 46-60.
- Yuan, C., Feng, S., Huo, Z., & Ji, Q. (2019). Simulation of saline water irrigation for seed maize in arid northwest China based on SWAP model. *Sustainability*, 11(16), 4264.
- Zeyliger, A. M., Ermolaeva, O. S., Muzylev, E. L., Startseva, Z. P., & Sukharev, Y. I. (2019). Computer analysis of water stress regimes of an irrigated agroecosystem using the SWAP model and ground and space monitoring data. *Computer*, 16(3), 33-43.
- Zhao, Y., Mao, X., & Shukla, M. K. (2020). A modified SWAP model for soil water and heat dynamics and seed-maize growth under film mulching. *Agricultural and Forest Meteorology*, 292, 108127.