



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۱

صفحه‌های ۸۵-۷۱

DOI: 10.22059/jwim.2022.332754.933

مقاله پژوهشی:

شبیه‌سازی اثر بلندمدت آبیاری نواری سطحی و زیرسطحی بر توزیع نمک با مدل HYDRUS-2D

سید تقی حسینی^۱، هادی رضوانی ایتدالی^{۲*}، عباس کاویانی^۲، بیژن نظری^۳، مسعود سلطانی^۳
۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۰۷

چکیده

بررسی‌های بلندمدت کاربرد سامانه‌های آبیاری علاوه بر زمان‌بر بودن، هزینه‌های زیادی را بر پژوهش‌گر تحمیل می‌کند. از این‌رو، استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند کمک مؤثری در چنین پژوهش‌هایی داشته باشد. در این پژوهش هدف اصلی شبیه‌سازی اثر بلندمدت استفاده از آبیاری نواری تیپ پلاک‌دار سطحی و زیرسطحی بر تجمع نمک در پروفیل خاک در مزرعه ذرت، با استفاده از مدل HYDRUS-2D بود. ابتدا با استفاده از داده‌های رطوبت حجمی و هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده، نسبت به واسنجی و اعتبارسنجی مدل اقدام و سپس شبیه‌سازی بلندمدت سامانه آبیاری تیپ انجام شد. برای ارزیابی از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی ده‌ساله برای آبیاری سطحی نشان داد هدایت الکتریکی لایه‌های خاک به‌طور میانگین از مقدار یک به نه دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافته است. همچنین، EC لایه‌های خاک برای سیستم زیرسطحی در مدت پنج سال به‌طور میانگین از ۰/۷۳ به ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت. به دلیل فقدان آبشویی مؤثر در هر دو سیستم تجمع شوری در سطح خاک بیش‌تر بوده و با افزایش عمق، مقدار شوری خاک کاهش یافت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای هر دو روش آبیاری، آبشویی مؤثر خارج از فصل لازم بوده و پیشنهاد می‌شود برای حفظ بیلان نمک در خاک و پایداری کشاورزی در منطقه، نمک‌های تجمع‌یافته در خاک از محیط ریشه خارج شود.

کلیدواژه‌ها: انتقال املاح، حرکت آب، ذرت، مدل‌سازی.

Simulation of long-term effect of surface and subsurface strip irrigation on salt distribution with HYDRUS-2D

Seyed Taghi Hosseini¹, Hadi Ramezani Etedali^{2*}, Abbas Kaviani², Bijan Nazari², Masoud Soltani³

1. M.Sc. Graduated, Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Associate Professor, Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3. Assistant Professor, Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Received: October 21, 2021

Accepted: March 27, 2022

Abstract

Long-term studies of the effects of the use of irrigation systems, in addition to being time consuming, impose high costs on the researcher. On the other hand, environmental and non-uniform changes in long-term data collection can affect the accuracy of the experiment. The use of numerical models and long-term experimental simulations based on calibrated parameters for a short-term experiment can be an effective aid in such research. In this study, the main purpose was to simulate the long-term effect of surface and subsurface strip irrigation on salt accumulation in soil profiles using the HYDRUS-2D model. Firstly, the model was calibrated using volumetric moisture data and measured electrical conductivity. Then, to ensure that the model provides logical results, the model was validated using data that were not used in the calibration step. The RMSE (Root Mean Square Error) and NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) statistical indices were used to assess the validity of the model. The results of ten years of simulation for surface irrigation showed that the electrical conductivity of soil layers increased on average from 1 dS / m to 9 dS / m. Also, the EC of soil layers for the subsurface system has increased from 0.73 dS / m to 5.5 dS / m on average over five years. Due to the lack of effective leaching for both systems, accumulated salt is much more at soil surface and decreasing by depth. Based on the results, soil leaching at out-season time is necessary and salt removing from root zone is highly recommended to preserve salinity balance and sustainability in farming.

Keywords: Corn, Modeling, Solutes transport, Water movement.

مقدمه

آبیاری موجب تجمع املاح در اراضی فاریاب می‌شود و در نهایت باعث شوری خاک و تخریب ساختمان آن شده و در صورت عدم توجه به بیلان نمک در خاک، تهدید جدی برای کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. لحاظ نمودن نیاز آبتی در طراحی سیستم‌های نوین آبیاری، تلاشی است در به تأخیر انداختن این فرایند، اما در اکثر سیستم‌های اجرا شده به دلیل فقدان سیستم زهکشی و عدم توجه کافی به اهمیت این موضوع از سوی طراحان و مجریان این‌گونه سیستم‌ها، به دلیل هزینه‌های بالای اجرای آن‌ها، برنامه آبتی در حد محاسبه نیاز آبتی در طرح باقی مانده و چندان عملیاتی و اجرایی نمی‌شود. اهمیت موضوع آبتی خاک در سیستم‌های آبیاری دقیق بیش‌تر بوده و فرایند تخریب خاک در این‌گونه سیستم‌ها به دلیل حداقل شدن آن‌چه که تلفات عمقی خوانده می‌شود، سرعت بیش‌تری می‌یابد و این درحالی است که به دلیل کمبود منابع آب شیرین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک و هم‌چنین کاهش روزافزون در کیفیت منابع آب شیرین در دسترس، تمام توصیه‌ها به استفاده بیش‌تر از سیستم‌های آبیاری دقیق ختم می‌شود. لذا لزوم پایش دقیق در این سیستم‌ها به منظور کنترل کیفیت خاک و صدور هشدارهای به موقع برای اجرای برنامه آبتی مؤثر و جلوگیری از تخریب ساختمان خاک به‌عنوان منبعی تجدیدناپذیر برای تولید محصولات غذایی، دارای اهمیت ویژه‌ای است. با توجه به این‌که بررسی‌های بلندمدت اثرات سامانه‌های آبیاری بر روی خاک علاوه بر زمان‌بر بودن، هزینه‌های زیادی را بر پژوهش‌گر تحمیل می‌کند، از این‌رو استفاده از مدل‌های عددی و شبیه‌سازی بلندمدت، براساس پارامترهای واسنجی شده از آزمایش مزرع‌ای، می‌تواند کمک مؤثری در چنین پژوهش‌هایی داشته باشد. (Jovzi et al., 2021) به‌منظور شبیه‌سازی

پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D توزیع رطوبت خاک تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری را با سه روش، حل معکوس با داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی، حل معکوس با داده‌های رطوبت خاک پس از آبیاری و رزتا مدل‌سازی کرده و مشاهده نمودند که روش اول از دقت بیش‌تری در برآورد داده‌ها برخوردار است (Jovzi et al., 2021). Sheini-Dashtgol et al. (2021) برای بررسی توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی چگونگی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، با توجه به عمق قرارگیری لوله‌ها (۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر) با فاصله ۶۰ سانتی‌متر قطره‌چکان‌ها روی لوله‌های آبد، توانایی مدل را در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در عمق ۲۰ سانتی‌متر خوب و در اعماق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری متوسط ارزیابی کردند (Sheini-Dashtgol et al., 2021). Naghavi et al. (2012) مدل HYDRUS-2D را به‌منظور شبیه‌سازی رطوبت خاک در سیستم‌های آبیاری تحت فشار قطره‌ای زیرسطحی مورد ارزیابی قرار داده و ضمن تأیید توانایی مدل در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک اعلام داشته‌اند که با گذشت زمان و یکنواخت‌تر شدن رطوبت خاک در اثر توزیع مجدد رطوبت، مدل برآوردهای بهتری را ارائه می‌کند (Naghavi et al., 2012). Provenzano (2007) از مدل HYDRUS-2D برای ارزیابی حجم خاک مرطوب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده نموده و گزارش داده است حجم خاک مرطوب در اطراف قطره‌چکان در طول آبیاری به‌عنوان تابعی از زمان و مقدار اولیه رطوبت برای یک قطره‌چکان به‌طور مناسبی توسط HYDRUS-2D شبیه‌سازی شده است (Provenzano, 2007). هم‌چنین Soltani et al. (2018) نیز برای شبیه‌سازی سامانه زهکشی خشک از مدل HYDRUS-2D استفاده کرده و طی انجام آزمایشات مزرع‌ای، این مدل را برای شبیه‌سازی پارامترهای

است و همچنین در تیمارهای با شوری کم‌تر، بیش‌تر می‌باشد و در تیمارهای با شوری بیش‌تر دقت مدل در برآورد توزیع شوری کم‌تر است (Tabei et al., 2015).

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از سیستم‌های آبیاری نواری تیپ در زراعت‌های ردیفی، درک چگونگی توزیع رطوبت و املاح در این روش‌های آبیاری حائز اهمیت است و با توجه به این‌که اغلب پژوهش‌های انجام‌شده با استفاده از مدل HYDRUS-2D به‌صورت کوتاه‌مدت و یا در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی بوده است، نیاز به انجام پژوهش‌های مزرعه‌ای با شرایط واقعی احساس می‌شود. بنابراین در این پژوهش هدف اصلی شبیه‌سازی اثر بلندمدت استفاده از روش آبیاری نواری تیپ پلاک‌دار سطحی و زیرسطحی بر تجمع نمک در پروفیل خاک در مزرعه ذرت، با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D بوده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش حاصل پژوهش‌های صورت‌گرفته روی گیاه ذرت دانه‌ای در مزرعه تحقیقاتی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) واقع در شهر قزوین است. آزمایش در مرداد ۱۳۹۷ (2018) شروع و پس از گذشت ۱۰۵ روز دوره رشد ذرت، در نیمه آبان پایان یافت.

ذرت در کرت‌هایی با مساحت نه مترمربع با ابعاد سه متر کشت شد. فاصله بین ردیف‌های کشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بذرها ۳۰ سانتی‌متر بود. نوار آبیاری تیپ، از نوع پلاک‌دار با آبدهی هر پلاک برابر ۱/۳۶۲ لیتر در ساعت و فاصله بین پلاک‌ها ۲۵ سانتی‌متر بود، که در روش زیرسطحی همین نوار تیپ در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک نصب شد.

هیدرولیکی و شوری خاک مورد ارزیابی قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد مدل رطوبت خاک را با دقت بیش‌تری شبیه‌سازی می‌کند (Soltani et al., 2018). در پژوهشی Khanmohamadi et al. (2013) مدل HYDRUS-2D را به‌منظور شبیه‌سازی جبهه رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای مورد استفاده قرارداد و با استفاده از قضیه π باکینگهام براساس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک روابط ساده و نیمه تجربی را ارائه نمودند که مقدار عمق و حداکثر قطر خیس شدگی پیاز رطوبتی را با دقت زیادی برآورد می‌کند (Khanmohamadi et al., 2013).

Khalili et al. (2016) نرم‌افزار HYDRUS-2D را به‌منظور تعیین پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط لایسی‌متری در خاک لومی مورد بررسی قرار داده و اعلام داشتند که نتایج نشان از برازش خوب بین داده‌های برآوردشده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده دارد (Khalili et al., 2016).

Mirzaie & Nazemi (2011) به بررسی حرکت شوری در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D پرداخته و تأثیر رطوبت اولیه خاک را در توزیع املاح مورد مطالعه قرار داده و ضمن اعلام توانایی مدل در شبیه‌سازی این جریان، اعلام داشتند که خشک‌بودن خاک قبل از انجام آبیاری و ایجاد درز و ترک در آن به‌دلیل بروز جریان‌های ترجیحی در آغاز باعث انتقال سریع‌تر املاح در پروفیل خاک شده ولی پس از یک هفته به‌دلیل صعود موینگی املاح در سطح کرت خشک تجمع یافته است (Mirzaie & Nazemi, 2011). Tabei et al. (2015) به شبیه‌سازی توزیع شوری در سیستم آبیاری قطره‌ای با آب شور و با استفاده از مدل SWAP پرداخته و توانایی این مدل را در شبیه‌سازی با داده‌های میدانی مورد ارزیابی قراردادند و اعلام داشته‌اند که دقت این مدل در شبیه‌سازی توزیع شوری در نزدیکی قطره‌چکان‌ها که شوری خاک کم‌تر



Figure 1. Location of the area

در اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی متری با آگر نمونه برداری شده و به روش یک به پنج مخلوط آب و گل، هدایت الکتریکی عصاره خاک توسط دستگاه EC متر اندازه گیری شده است. دومین مرحله اندازه گیری هدایت الکتریکی خاک ۴۰ روز بعد از کاشت و در فواصل صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی متر از قطره چکان و در همان اعماق انجام گرفته و نمونه ها توسط آگر برداشت شده و با تهیه گل اشباع، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک توسط EC متر اندازه گیری شده است. سومین مرحله اندازه گیری EC در زمان ۶۰ روز بعد از کاشت و در همان فواصل و اعماق به روش یک به پنج اندازه گیری شده است (جدول ۲).

برای اندازه گیری رطوبت خاک به منظور تعیین زمان و مدت آبیاری از دستگاه profile probe PR2 استفاده شده است. برای این کار در وسط کرت و تا عمق یک متری لوله های دستگاه توسط آگر قرار داده شد. با توجه به قیمت بالای دستگاه و به منظور صرفه اقتصادی از لوله های فشار قوی پلی وینا با قطر داخلی ۲۶ میلی متر که قبلاً کالیبره شده، استفاده شد. برای صرفه جویی و کاهش حجم عملیات با فرض همگن بودن خاک، برداشت ها در یک سمت پشته انجام شد. مشخصات خاک مزرعه به شرح جدول (۱) می باشد. هم چنین میزان رطوبت اولیه خاک تا عمق ۶۰ سانتی متر نیز که در هنگام واسنجی دستگاه profile probe اندازه گیری شد برابر ۱۶/۴ درصد وزنی است.

به منظور پایش شوری خاک در سه مرحله، اقدام به نمونه برداری و اندازه گیری هدایت الکتریکی خاک شده است. در مرحله اول و قبل از کشت ذرت از هر کرت

Table 1. Soil characteristics

ρ_b cm ³ cm ³	θ_{pwp} Weight percentage	θ_{fc} Weight percentage	Sand %	Silt %	Clay %	Depth
1.33	14	23	57	33	10	0-30
1.33	13.5	22	67.5	24.5	8	30-60

Table 2. Measured values of electrical conductivity of soil saturated extract (dS/m)

Measurement time EC	Before planting			40 days after planting			60 days after planting			
	Distance from the dripper (cm)	0	15	30	0	15	30	0	15	30
Surface	0-20	0.62	0.62	0.62	1.81	1.6	0.97	1.43	1.94	2.37
	20-40	0.5	0.5	0.5	1.3	0.75	1.6	1.19	1.11	0.88
	40-60	0.56	0.56	0.56	0.74	1.24	0.72	0.76	1.03	0.81
Subsurface	0-20	0.22	0.22	0.22	2.36	0.96	1.48	1.76	0.91	1.14
	20-40	0.19	0.19	0.19	0.92	1	1.03	0.99	1.76	0.8
	40-60	0.805	0.805	0.805	0.93	0.89	0.71	0.81	0.63	0.76

مختلفی از جمله مدل ونگنوختن- معلم استفاده می‌کند. در مدل HYDRUS-2D، مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک (ضرایب معادلات ونگنوختن- معلم)، با استفاده از شبکه عصبی جفت‌شده در مدل به نام روزتا و اطلاعات خاک مانند بافت و درصد اجزای آن و برخی از نقاط رطوبتی در منحنی مشخصه خاک تخمین زده می‌شود (جدول ۳). هم‌چنین از مدل فلدس برای جذب آب در ریشه استفاده شد و به‌منظور تعیین پارامترهای جذب ریشه هم از کاتالوگ موجود در مدل، محصول Corn [Wesseling, 1991] انتخاب و از مقادیر پیش فرض مدل استفاده شده است. تنش شوری هم به مدل اعمال نشد.

برای تعریف هندسه جریان شرط مرزی سطح خاک از نوع شرط مرزی اتمسفریک و مرز انتهایی با شرط مرزی زهکشی آزاد تعیین شد. بقیه گره‌های دو طرف باکس حجم کنترل به‌صورت شرط مرزی بدون جریان تعیین شد. محل قرارگیری پلاک نوار تیپ در سیستم سطحی سمت چپ و بر روی پشته و در سیستم زیرسطحی سمت چپ و ۱۰ سانتی‌متر زیر سطح خاک پشته به‌صورت شرط مرزی جریان متغییر تعریف گردید (شکل ۴).

در طول دوره کشت ۱۶ آبیاری انجام شد که EC آب آبیاری در چهار آبیاری اول برابر ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر و در مابقی آبیاری‌ها با اعمال تیمار شوری، EC آب آبیاری با استفاده از کلریدسدیم تا مقدار دو دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت. عمق آب آبیاری در طول فصل رشد برای روش‌های آبیاری تیپ سطحی و زیر سطحی به‌ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. حجم کل آب داده‌شده به زمین در دوره ۱۰۵ روزه رشد ذرت، توسط یک نوار آبیاری تیپ که طول آن سه متر بوده، برای آبیاری نواری تیپ سطحی با ۳۱ ساعت آبیاری معادل ۵۰۷ لیتر و برای آبیاری نواری تیپ زیرسطحی با ۳۳/۹ ساعت آبیاری معادل ۵۵۴ لیتر می‌باشد. از این مقادیر برای کنترل بیلان آب داده شده توسط مدل در طی فرایند شبیه‌سازی استفاده شد.

مدل HYDRUS-2D

بسته نرم‌افزاری HYDRUS-2D برای تحلیل حرکت آب در محیط متخلخل در حالت اشباع و غیراشباع از حل عددی معادله ریچاردز استفاده می‌کند. HYDRUS-2D برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک از مدل‌های

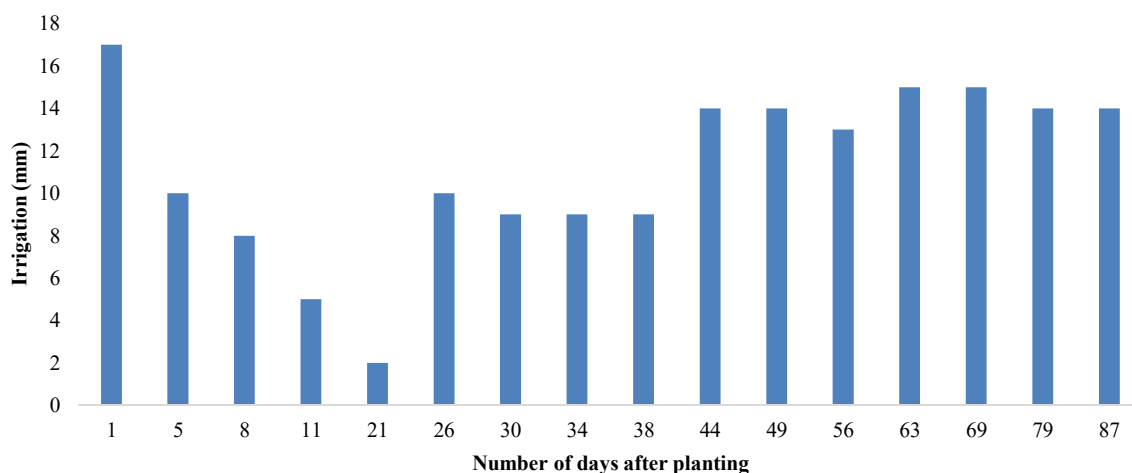


Figure 2. Irrigation events in surface type irrigation method during the growing period

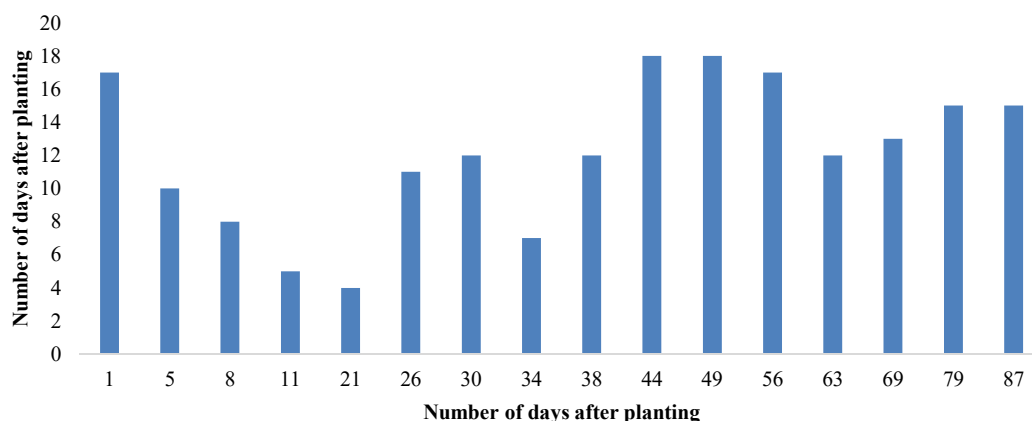


Figure 3. Irrigations events during in subsurface type irrigation method during growing period

Table 3. Values of soil hydraulic parameters estimated by Rosetta

I	K_s	n	α	θ_s	θ_r	Depth
[-]	[cm day ⁻¹]	[-]	[cm ⁻¹]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm]
0.5	53.45	1.29	0.0229	0.44	0.06	0-60

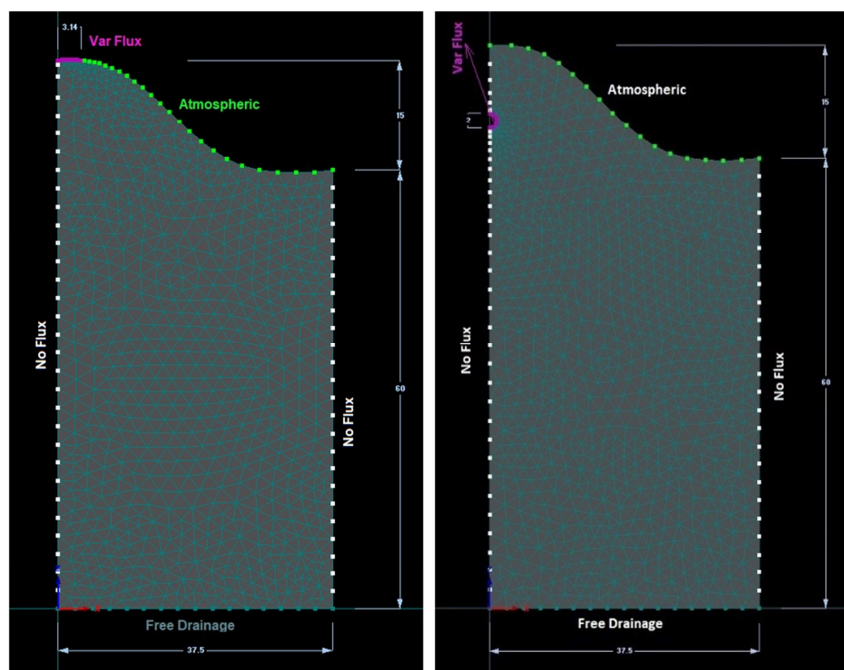


Figure 4. Type of boundary conditions applied to the control volume (Surface left and subsurface right)

شوری اولیه خاک، مقادیر اندازه‌گیری شده شوری، قبل از کاشت که در جدول (۲) ارائه شده است به اعماق مختلف پروفیل خاک اعمال شد. محاسبه فلاکس جریان با فرض شعاع یک سانتی‌متر

برای اعمال شرایط اولیه، رطوبت اولیه خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متر با دستگاه profile probe اندازه‌گیری شده و برابر ۱۶/۴ درصد وزنی بود که به عنوان رطوبت روز صفر به تمام پروفیل خاک اعمال شد. همچنین برای لحاظ

در معادلات فوق O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. هرچه میزان شاخص RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مبین این مطلب است که مدل در پیش‌بینی داده‌های مورد نظر موفق‌تر بوده است و این شاخص نشان‌دهنده دقت مدل در پیش‌بینی داده‌ها است. چنانچه مقدار شاخص NRMSE کم‌تر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل است و چنانچه این شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل و در صورتی که مقدار آن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد نشان از عملکرد متوسط مدل دارد. مقادیر بیش‌تر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده شبیه‌سازی ضعیف مدل می‌باشد (Bannayan & Hoogenboom, 2009).

با استفاده از داده‌های رطوبت حجمی و هدایت الکتریکی برداشت شده از مزرعه در طول دوره کشت ذرت، اقدام به بهینه‌سازی ضرایب معادلات ونگنوختن-معلم و پارامترهای انتقال املاح در خاک برای مدل شد. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل حدود ۸۰ درصد داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در بخش حل معکوس مدل، در مکان و زمان مربوطه وارد شد و پس از بهینه‌سازی ضرایب معادلات ونگنوختن-معلم، مدل دوباره با ضرایب بهینه‌شده اجرا شد. سپس به‌منظور اعتبارسنجی پیش‌بینی مدل، از ۲۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که به مدل داده نشده بود استفاده شد. همین کار برای داده‌های شوری برداشت شده نیز انجام شد. با حصول اطمینان از انطباق نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های برداشت‌شده، به‌منظور بررسی اثرات بلندمدت استفاده از آبیاری نواری تیپ سطحی و زیرسطحی بر نحوه توزیع نمک در پروفیل خاک، مدل برای یک دوره طولانی مدت اجرا شد.

برای درپیر انجام شد. مقدار فلاکس جریان معادل ۲۰۸ سانتی‌متر بر روز از تمام طول ۶/۲۸ سانتی‌متر محیط دایره خیس شده در سطح زمین محاسبه و در مدل تعریف شد. با توجه به فرض همگنی خاک، جریان در حل عددی به‌صورت متقارن خواهد بود، بنابراین برای کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت شبیه‌سازی، هندسه حل به‌صورت نیم پشته در نظر گرفته شد.

آنالیز حساسیت

برای تعیین حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک از شاخص حساسیت طبق معادله زیر استفاده شد:

$$SI = \frac{[(O_2 - O_1) / \bar{O}]}{[(I_2 - I_1) / I_1]}$$

در معادله فوق، O_1 مقدار اولیه داده خروجی، O_2 مقدار ثانویه داده خروجی، \bar{O} میانگین داده‌های خروجی، I_1 مقدار اولیه داده ورودی، I_2 مقدار ثانویه داده ورودی و \bar{I} میانگین داده‌های ورودی است. چنانچه مقدار شاخص SI بین ۰-۰/۵ باشد مدل به آن پارامتر حساسیت کمی داشته و اگر مقدار آن بین ۰/۵-۱ باشد مدل به آن پارامتر نیمه‌حساس است. در مقادیر صفر و یک، مدل به آن پارامتر به‌ترتیب غیرحساس و بسیار حساس می‌باشد (Quinton, 1994; Ghorbani, 1997).

معیارهای ارزیابی صحت تخمین داده‌ها (واسنجی و اعتبارسنجی مدل)

به‌منظور ارزیابی صحت داده‌های تخمین زده‌شده رطوبت و شوری خاک توسط نرم‌افزار، از دو شاخص RMSE و NRMSE که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند، استفاده شده است.

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

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$

معادل ۱۰ درصد پخشیدگی طولی یعنی برابر ۰/۶ سانتی‌متر لحاظ شد.

در مرحله واسنجی مدل برای بهینه‌سازی ضرایب معادلات ونگنوختن- معلم، مقادیر شاخص‌های آماری NRMSE و RMSE برای آبیاری تیپ سطحی به ترتیب برابر ۹/۳ درصد و ۰/۰۲۵ (cm³/cm³) به دست آمد. مقادیر شاخص‌ها برای آبیاری تیپ زیرسطحی به ترتیب برابر ۹/۶ درصد و ۰/۰۳ (cm³/cm³) حاصل شد. برای بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک در مرحله واسنجی مقادیر شاخص‌های فوق برای آبیاری تیپ سطحی به ترتیب برابر ۲۲ درصد و ۰/۲۷ دسی‌زیمنس بر متر و برای آبیاری تیپ زیرسطحی برابر ۲۷ درصد و ۰/۳ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد.

در مرحله اعتبارسنجی مدل برای بررسی اعتبار بهینه‌سازی ضرایب معادلات ونگنوختن- معلم، مقادیر شاخص‌های آماری NRMSE و RMSE برای آبیاری تیپ سطحی به ترتیب برابر ۹/۵ درصد و ۰/۰۲۶ (cm³/cm³) به دست آمد. مقادیر شاخص‌ها برای آبیاری تیپ زیرسطحی به ترتیب برابر ۹/۱ درصد و ۰/۰۲ (cm³/cm³) حاصل شد. برای بررسی اعتبار بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک در مرحله اعتبارسنجی مقادیر شاخص‌های فوق برای آبیاری تیپ سطحی به ترتیب برابر ۳۲ درصد و ۰/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر و برای آبیاری تیپ زیرسطحی برابر ۳۸ درصد و ۰/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. مقادیر پارامترهای بهینه‌شده مربوط به ضرایب معادلات ونگنوختن- معلم و ضرایب پخشیدگی طولی و عرضی در جدول (۴) ارائه شده است.

برای محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع آمار روزانه هواشناسی برای یک سال تهیه شد و تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پنمن مانیتث فائو محاسبه شد. با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از دوره رشد ذرت از نرم‌افزار آکواکراپ برای جداسازی تبخیر از تعرق استفاده شد. در نهایت با ورود داده‌های تبخیر، تعرق و بارندگی برای مدت ۳۶۵ روز و استفاده از مقادیر بهینه‌شده ضرایب معادلات ونگنوختن- معلم و پارامترهای انتقال املاح در خاک و سایر شرایط و داده‌ها، ابتدا مدل برای یک سال به صورت کامل اجرا شد. سپس برای روش آبیاری نواری تیپ سطحی مدل به مدت ۱۰ سال و برای روش آبیاری نواری تیپ زیرسطحی مدل به مدت پنج سال با تنظیمات سال اول اجرا شد.

نتایج و بحث

از بررسی نتایج آنالیز حساسیت در شرایط این پژوهش، مشاهده شد که مدل به پارامتر رطوبت اشباع خاک نیمه‌حساس بوده و نسبت به سایر ضرایب معادلات ونگنوختن- معلم دارای حساسیت کمی است، لذا با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص حساسیت علاوه بر θ_s ضرایب تجربی α ، n و K_s نیز برای انجام فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار داده شد. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح در خاک دو پارامتر پخشیدگی طولی (Disp.L) و پخشیدگی عرضی (Disp.T) مورد استفاده قرار گرفت. مقدار اولیه ضریب پخشیدگی طولی تقریباً معادل ۱۰ درصد طول نمونه یعنی شش سانتی‌متر و مقدار اولیه ضریب پخشیدگی عرضی تقریباً

Table 4. Optimized values of Mualem-van Genuchten equations and solute transfer parameters

Irrigation method	Disp.L (cm)	Disp.T (cm)	θ_e [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	α [1/cm]	n [-]	K_s cm/day	I [-]
Surface	119	2.532	0.0592	0.4419	0.008050	1.2	58.11	0.5
Subsurface	112.7	86.15	0.0592	0.4405	0.009027	1.196	53.86	0.5

حدود $7/2$ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب ($EC=11.25$) در سطح خاک آغاز شده و تا $4/6$ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب ($EC=7.2$ dS/m) در عمق 75 سانتی‌متر کاهش یافته است.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود پس از 10 سال مقدار شوری در خاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و در اثر آبیاری و بارندگی‌های سالانه به‌طور یکنواخت در پروفیل خاک توزیع شده است، و از سطح خاک به عمق پروفیل خاک مقدار شوری کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل در بهینه‌سازی ضرایب معادلات ونگنوختن-معلم از دقت بیشتری برخوردار است. مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده رطوبت حجمی و شوری خاک در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است.

نحوه توزیع غلظت در پروفیل خاک در پایان سال دهم و پنجم در شکل‌های هفت تا 10 نشان داده شده است. همان‌طورکه در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود در تیمار تیپ سطحی در پایان سال دهم شوری از

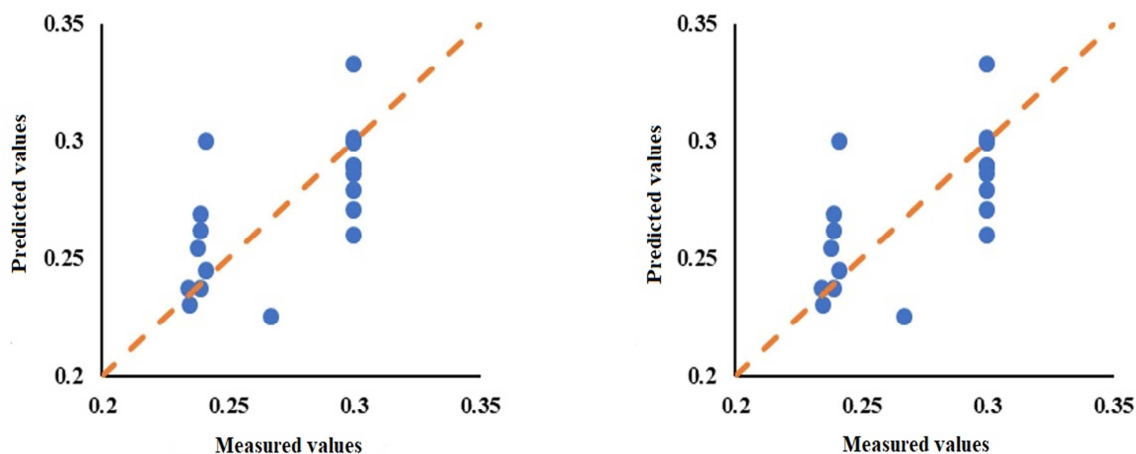


Figure 5. Measured and predicted values of moisture content (Surface right and subsurface left)

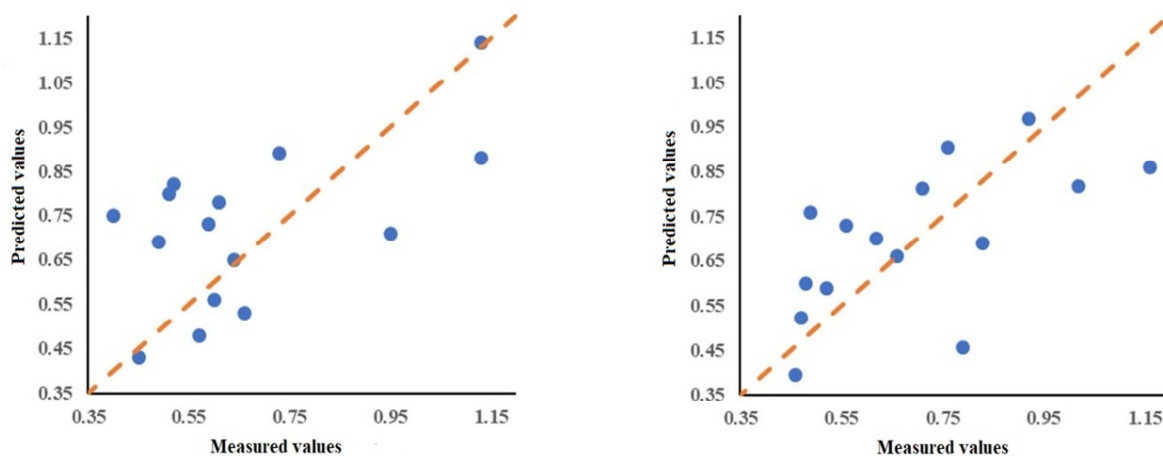


Figure 6. Measured and predicted values of salinity (mgr/cm^3) (Surface right and subsurface left)

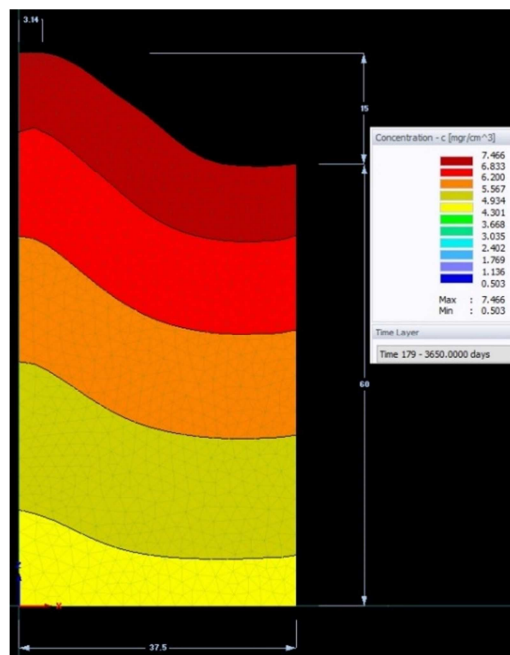


Figure 7. Salinity simulation in surface method at the end of the tenth year (mgr/cm^3).

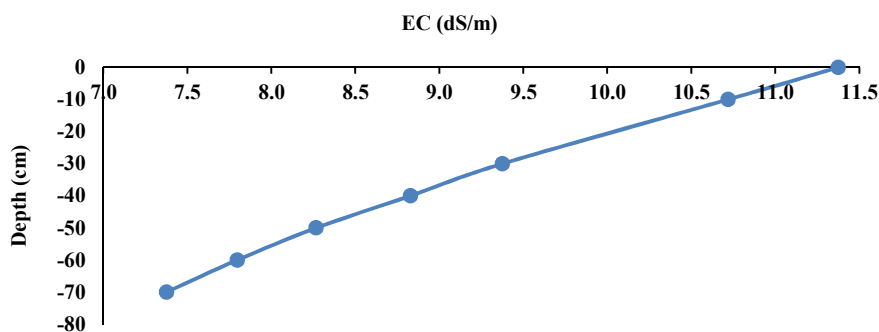


Figure 8. Salinity in soil profiles in surface tape irrigation at the end of the fifth year.

شکل (۸) نشان می‌دهد رابطه میان عمق خاک و مقدار شوری تجمع یافته در طی ۱۰ سال در آن تقریباً خطی بوده و با افزایش عمق مقدار شوری تجمع یافته در خاک کم می‌شود. با توجه به این که مقدار متوسط بارندگی در سال پایه شبیه‌سازی کم‌تر از میانگین بلندمدت منطقه بوده است و همچنین به دلیل عدم انجام آبشویی مؤثر، جذب بیش‌تر آب توسط ریشه گیاه در لایه‌های سطحی خاک و نیز تبخیر آب از سطح خاک، شوری بیش‌تر در لایه‌های بالایی تجمع یافته است.

Schilfgaard *et al.* (1974) نیز، ضمن انجام مطالعات گسترده بر روی جزء آبشویی و میزان املاح تخلیه‌شده از زه‌کش‌های مزارع کشاورزی، اعلام داشتند با آبشویی املاح به عمق پروفیل خاک منتقل می‌شود، اما در شرایطی که آبشویی املاح از خاک انجام نمی‌شود توزیع شوری در پروفیل خاک به شکل دیگری خواهد بود که در آن صورت شوری بیش‌تر در سطح خاک تجمع یافته و هرچه به عمق پروفیل خاک حرکت کنیم از مقدار شوری پروفیل خاک کاسته می‌شود (Schilfgaard *et al.*, 1974).

مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۲ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۱

حدود ۴/۴ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب ($EC=6.9$ dS/m) در سطح خاک آغاز شده و تا ۲/۶ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب ($EC=4.1$ dS/m) در عمق ۷۵ سانتی‌متر کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از پنج سال مقدار شوری در خاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است و در اثر آبیاری و بارندگی‌های سالانه به‌طور یکنواخت در عمق خاک توزیع شده است و از سطح خاک به عمق پروفیل خاک مقدار شوری کاهش می‌یابد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد رابطه میان عمق خاک و مقدار شوری تجمع‌یافته در طی پنج سال در آن تقریباً خطی بوده و با افزایش عمق مقدار شوری تجمع‌یافته در خاک کم شده است. به‌منظور بررسی روند افزایش شوری در خاک طی ۱۰ سال پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای تیمار آبیاری نواری تیپ سطحی، در شکل (۱۱) مقادیر شوری خاک در اعماق مختلف طی ۱۰ سال نشان داده شده است.

Ramezani *et al.* (2019) ضمن شبیه‌سازی ۲۰ ساله شوری پروفیل خاک با استفاده از مدل آکواکراپ برای چهار محصول زراعی گندم، جو، ذرت و گوجه‌فرنگی اعلام داشتند که آبیاری تیپ با استفاده از آب با $EC=1$ dS/m در کشت ذرت و گوجه‌فرنگی موجب افزایش قابل توجه شوری متوسط خاک ناحیه توسعه ریشه از مقدار ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب به چهار و ۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌شود، اما افزایش شوری ناحیه توسعه ریشه در محصولات گندم و جو برخلاف ذرت و گوجه‌فرنگی، در سطح پنج درصد معنی‌دار نیست، یکی از دلایل این موضوع وجود بارندگی در فصل کشت گندم و جو ذکر شده است که موجب شست‌وشوی املاح از منطقه توسعه ریشه و انتقال آنها به اعماق پایین‌تر می‌شود (Ramezani *et al.*, 2019).

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود در تیمار تیپ زیرسطحی پس از پایان سال پنجم شوری از

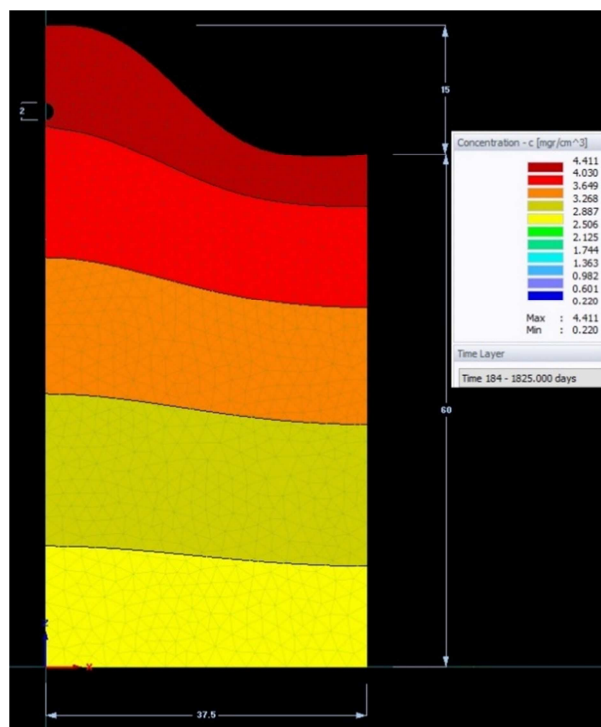


Figure 9. Salinity simulation in subsurface tape irrigation at the end of the fifth year (mgr/cm^3).

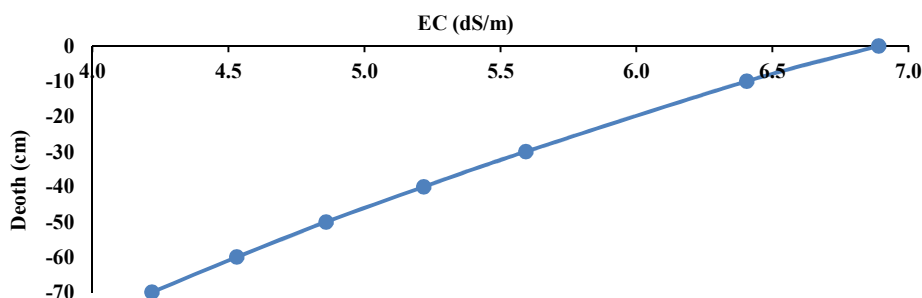


Figure 10. Salinity in soil profiles in subsurface tape irrigation at the end of the fifth year.

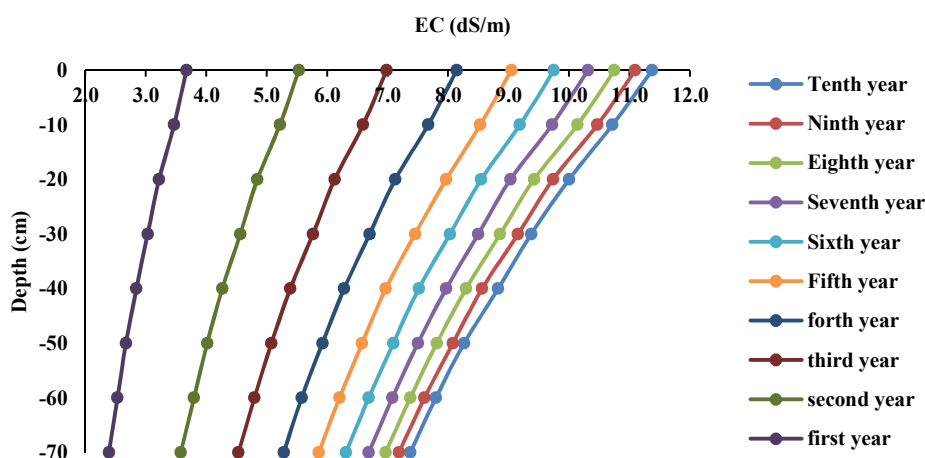


Figure 11. Soil salinity distribution in surface tape irrigation during 10 years.

مؤثر ریشه گیاه، جزء آبشویی لحاظ شده و به مقدار آب آبیاری اضافه می‌شود، اما همان‌طور که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است، این تدابیر چندان مؤثر واقع نشده و روند شور شدن پروفیل خاک در کم‌تر از پنج سال نیز به مقدار نگران‌کننده‌ای افزایش یافته است.

با توجه به این‌که شوری عصاره اشباع آستانه تحمل برای ذرت برابر $1/7$ دسی‌زیمنس بر متر بوده و به‌ازای هر واحد افزایش شوری بیش از این مقدار، معادل ۱۲ درصد کاهش محصول خواهیم داشت (امین علیزاده، رابطه آب و خاک و گیاه، ۱۳۹۰)، به‌منظور تبدیل این حد به شوری محلول خاک می‌توان از نسبت رطوبت اشباع و رطوبت خاک در زمان‌ها و مکان‌های اندازه‌گیری EC خاک استفاده کرد. با توجه به

مقادیر شوری اولیه خاک که در تمام عمق ۷۰ سانتی‌متر کم‌تر از یک میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب ($EC=1.6$ dS/m) بوده است به مقدار قابل توجهی در طی پنج سال اول کشت افزایش یافته و سرانجام در سال دهم به مقدار میانگین شش میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب ($EC=9.4$ dS/m) افزایش یافته است. هم‌چنین روند توزیع شوری در عمق پروفیل خاک نیز چنان‌چه قابل مشاهده است، به‌صورت یکنواخت بوده که از سطح خاک به عمق پروفیل مقدار شوری تقریباً به‌صورت خطی کاهش یافته است، ولی در سال‌های پایانی تجمع املاح در لایه‌های نزدیک به سطح بیش‌تر بوده است.

با وجود این‌که در طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار به‌منظور آبشویی و شستن املاح از محدوده عمق

این‌که این نسبت به‌طور متوسط در این پژوهش برای هر دو تیمار آبیاری سطحی و زیرسطحی در زمان‌های اندازه‌گیری EC خاک در کل پروفیل خاک برابر با ۱/۶ بوده، بنابراین مقدار شوری محلول خاک برای محاسبه آستانه تحمل ذرت به شوری برابر ۲/۷ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. بنابراین، همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، در پایان سال سوم حدود ۴۰ درصد کاهش محصول خواهیم داشت. لذا انجام مدیریت آبخویی به‌طور مؤثر حداکثر پس از سه سال کشت با سیستم آبیاری نواری تیپ سطحی غیرقابل اجتناب بوده و در صورت عدم انجام این مهم در طی ده سال روند کاهش محصول می‌تواند به‌راحتی عملکرد مزرعه را در تولید ذرت غیراقتصادی کند.

برای بررسی روند افزایش شوری در خاک در طی پنج سال پیش‌بینی شده توسط مدل برای تیمار آبیاری تیپ زیرسطحی، در شکل (۱۲) مقادیر شوری خاک در اعماق مختلف طی پنج سال نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقادیر شوری اولیه خاک که در تمام عمق ۷۰ سانتی‌متر کم‌تر از یک میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب (EC=1.6 dS/m) بوده است، به مقدار قابل توجهی در طی این دوره افزایش یافته به‌طوری که در پایان سال پنجم به مقدار میانگین چهار میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب

این‌که این نسبت به‌طور متوسط در این پژوهش برای هر دو تیمار آبیاری سطحی و زیرسطحی در زمان‌های اندازه‌گیری EC خاک در کل پروفیل خاک برابر با ۱/۶ بوده، بنابراین مقدار شوری محلول خاک برای محاسبه آستانه تحمل ذرت به شوری برابر ۲/۷ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. بنابراین، همان‌طور که در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود، در پایان سال سوم حدود ۴۰ درصد کاهش محصول خواهیم داشت. لذا انجام مدیریت آبخویی به‌طور مؤثر حداکثر پس از سه سال کشت با سیستم آبیاری نواری تیپ سطحی غیرقابل اجتناب بوده و در صورت عدم انجام این مهم در طی ده سال روند کاهش محصول می‌تواند به‌راحتی عملکرد مزرعه را در تولید ذرت غیراقتصادی کند.

برای بررسی روند افزایش شوری در خاک در طی پنج سال پیش‌بینی شده توسط مدل برای تیمار آبیاری تیپ زیرسطحی، در شکل (۱۲) مقادیر شوری خاک در اعماق مختلف طی پنج سال نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقادیر شوری اولیه خاک که در تمام عمق ۷۰ سانتی‌متر کم‌تر از یک میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب (EC=1.6 dS/m) بوده است، به مقدار قابل توجهی در طی این دوره افزایش یافته به‌طوری که در پایان سال پنجم به مقدار میانگین چهار میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب

البته خسارت‌های وارد شده تنها به کاهش عملکرد محصول محدود نخواهد شد و با افزایش شوری در خاک و به مرور زمان شور شدن لایه‌های فعال خاک، موجب تخریب ساختمان خاک شده و به زودی خاک توانایی کشت و زرع را از دست خواهد داد و این می‌تواند از مهمترین آسیب‌های وارده در صورت عدم آبخویی مؤثر باشد.

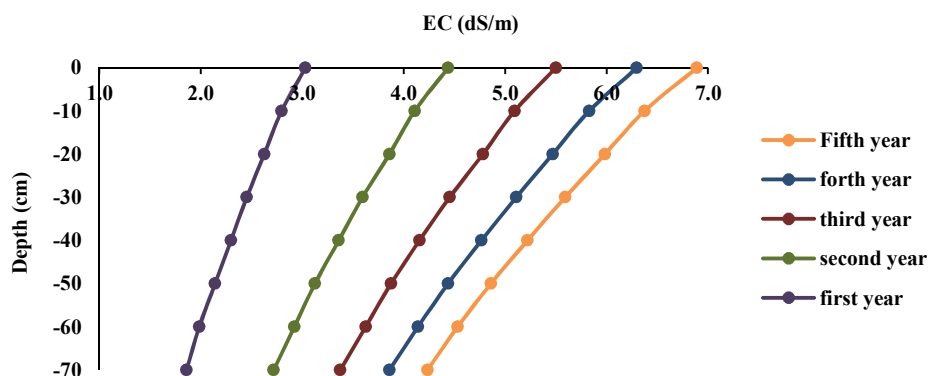


Figure 12. Soil salinity distribution in subsurface tape irrigation during five years.

نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد تا اثر بلندمدت استفاده از آبیاری تیپ بر توزیع نمک در خاک مزرعه ذرت که با دو روش آبیاری تیپ پلاکدار سطحی و زیرسطحی آبیاری شده، با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شود. مدل طراحی شده با استفاده از داده‌های واقعی رطوبت حجمی و هدایت الکتریکی برداشت شده، واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج کلی بیانگر این موضوع است که استفاده از روش آبیاری تیپ به دلیل عدم توجه به آبشویی خاک، به زودی منجر به شورشیدن خاک شده، و متأسفانه لحاظ جزء آبشویی در این گونه طرح‌ها به دلایلی که نیازمند بررسی جداگانه‌ای است به هیچ وجه کافی و مؤثر نیست.

در سیستم‌های آبیاری تیپ که به صورت طولانی مدت بدون آبشویی مؤثر مورد استفاده قرار می‌گیرند توزیع شوری در پروفیل خاک به صورت یکنواخت انجام شده، به طوری که با افزایش عمق خاک از مقدار شوری کاسته شده، و هم‌چنین تجمع شوری در سطح خاک بیش تر خواهد بود. در سیستم آبیاری تیپ سطحی که در آن هدایت الکتریکی آب آبیاری دو دسی‌زیمنس بر متر بوده، در طی ۱۰ سال EC لایه‌های خاک از متوسط یک دسی‌زیمنس بر متر به مقدار متوسط ۹/۴ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافته است، بنابراین حداکثر پس از سه سال الزام به آبشویی مؤثر و شستن املاح از پروفیل خاک غیرقابل اجتناب بوده و بی‌توجهی به این امر می‌تواند سبب کاهش شدید عملکرد تولیدشده تا حدی که پس از گذشت ۱۰ سال موجب غیراقتصادی شدن تولید می‌شود.

در سیستم آبیاری تیپ پلاکدار زیرسطحی که در آن هدایت الکتریکی آب آبیاری دو دسی‌زیمنس بر متر بوده است، در طی پنج سال EC لایه‌های خاک از متوسط ۰/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر به مقدار متوسط ۵/۵ دسی‌زیمنس بر متر

افزایش یافته است، و خطر شورشیدن پروفیل خاک در آبیاری نواری تیپ زیرسطحی با دو سال تأخیر نسبت به سیستم‌های سطحی بروز می‌کند، به طوری که الزام به آبشویی مؤثر و شستن املاح از پروفیل خاک حداکثر پس از پنج سال غیرقابل اجتناب بوده و بی‌توجهی به این امر می‌تواند سبب کاهش شدید عملکرد تولیدشده تا حدی که موجب غیراقتصادی شدن تولید خواهد شد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field crops research*, 111(3), 290-302.
2. Ghorbani, B. (1997). A mathematical model to predict surface runoff under sprinkler irrigation conditions. Silsoe College, Cranfield University, Bedford, UK.
3. Jovzi, M., Moghaddam, N., Abyaneh, H., & Bagheri, H. (2021). Simulation of soil moisture profile in drip irrigation with HYDRUS-2D model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 12(45), 241-256. (In Persian).
4. Khanmohamadi, N., & Besharat, S. (2013). Simulating wetting front in drip irrigation using HYDRUS-2D. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2(4), 15-27. (In Persian).
5. Khalili, M., Akbari, M., Hezarjaribi, A., Zakerinia, M., Abbasi, F., & Koulaian, A. (2016). Evaluation of the soil moisture profile in subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(10), 136-44. (In Persian).
6. Mirzaie, A., & Nazemi, A. (2011). The simulation of salts movement in soil using HYDRUS-2D Model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 1(3), 59-70. (In Persian).
7. Naghavi, H., Hosseininia, M., Karimi Googhari, SH., & Irandost, M. (2012). Capability of HYDRUS-2D simulation model for simulating wetting pattern in soil under subsurface drip irrigation systems. *Journal of Water and Soil Science*, 16(61), 59-69. (In Persian).

8. Provenzano, G. (2007). Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 4(133), 342-349.
9. Quinton, J. (1994). The validation of physically based erosion models. Silsoe College, Cranfield University.
10. Ramezani, E. H., Pashazadeh, M., Nazari, B., Sotoudehnia, A., & Kaviani, A. (2019). Study of salinity changes in soil profile of four agricultural crops in qazvin plain under drip-tape irrigation with AquaCrop model. *Journal of Water and Soil*, 3(32), 475-87. (In Persian).
11. Schilfgaarde, V. J., Bernstein, L., Rhoades, D. J., & Rawlins, L. S. (1974). Irrigation management for salt control. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, IR3, 321-338.
12. Sheini-Dashtgol, A., Kermannezhad, J., Hamoodi, M., & Ghanbari-Adivi, E. (2021). Investigation of moisture distribution in subsurface drip irrigation and comparison of the data with HYDRUS-2D results. *Journal of Water and Soil Science*, 2(31), 103-115. (In Persian).
13. Soltani, M., Rahimikhoob, A., Sotoodehnia, A., & Akram, M. (2018). Evaluation of HYDRUS_2D software in simulating dry drainage. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(4), 595-607. (In Persian).
14. Tabei, M., Boroomandnasab, S., Soltani M. A., & Nasrollahi, H.A. (2015). Simulation of salinity distribution in soil under drip irrigation tape with saline water using SWAP model. *Journal of Water and Soil*, 29(3), 590-603. (In Persian).