

کاربرد نرم افزار HYDRUS_2D برای شبیه سازی سامانه زهکشی خشک

مسعود سلطانی، علی رحیمی خوب^{۱*}، عباس ستوده نیا و مجتبی اکرم

دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

masoudsoltani@ut.ac.ir

استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

akhob@ut.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).

absotoodehniako@yahoo.com

کارشناس زهکشی، گروه کار زهکشی و محیط زیست، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

mojtabaakram@gmail.com

چکیده

اراضی تحت آبیاری مناطق خشک و نیمه خشک با خطر شور شدن خاک مواجه هستند. پایداری کشاورزی در این شرایط در گرو خروج نمک اضافی از ناحیه ریشه گیاه است. اگرچه سامانه های زهکشی مصنوعی می توانند با خروج آب و املاح اضافی، شرایط مناسب رشد گیاه را فراهم کنند، ولی اجرا و بهره برداری این سامانه ها با چالش هایی از جمله هزینه بالای احداث، مسائل زیست محیطی، حجم بالا و کیفیت پایین زه آب خروجی، همراه است. برای رویارویی با این مشکلات، می توان از روش های جایگزین و یا ترکیب آن ها با روش های مرسوم کمک گرفت. در این پژوهش، در سال ۱۳۹۴، زهکشی خشک به عنوان یک روش جایگزین با هزینه کمتر و تا اندازه ای سازگار با محیط زیست، در پردیس ابوریحان دانشگاه تهران مورد بررسی قرار گرفت و از مدل HYDRUS_2D برای شبیه سازی و تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال شوری استفاده شد. تیمارها شامل دو نسبت عرض کاشت به نکاشت (۱۱ (کاشت): ۱ (نکاشت) و ۱:۲) و دو شوری آب آبیاری (۱/۵ و ۳ دسی زمینس بر متر) در چهار لایسمتر با ابعاد ۱×۱×۱ متر اجرا شد. در این آزمایش از چمن اسپرت در قسمت کاشت استفاده شد. بافت خاک لومی، سطح ایستایی در ۹۰ سانتی متری از سطح و تعداد روزهای آبیاری ۷۰ روز بود. نتایج نشان داد در تمام تیمارها، جهت حرکت شوری از ناحیه آبیاری به ناحیه تبخیر بود و شوری نهایی خاک در قسمت نکاشت بیشتر از قسمت کاشت بود. افزایش عرض کاشت به نکاشت از ۱:۱ به ۱:۲، اگرچه توانست شوری را از ناحیه آبیاری به ناحیه تبخیر منتقل کند، ولی نتوانست شوری ناحیه ریشه را تثبیت کند. به طوری که شوری نهایی ناحیه ریشه در تیمارهای با عرض کاشت به نکاشت برابر، از شش دسی زمینس بر متر (۱/۷ تا ۲/۷ برابر شوری اولیه) فراتر نرفت، در حالی که در دو تیمار دیگر این مقدار به بیش از ۱۴ دسی زمینس بر متر (۴/۹ تا ۷/۷ برابر شوری اولیه) رسید. نتایج خروجی مدل و شاخص های آماری نشان داد مدل HYDRUS_2D توانست حرکت آب و انتقال شوری را برای زهکشی خشک در شرایط آزمایش لایسمتری با دقت معقولی برآورد کند. مقدار خطای استاندارد و ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد رطوبت خاک به ترتیب بین هفت تا ۱۱ درصد و ۰/۰۲۱ تا ۰/۰۵۷ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب بود و این مقدار برای برآورد شوری به ترتیب بین ۲۴ تا ۲۹ درصد و ۲/۰۱ تا ۲/۷۳ دسی زمینس بر متر بود. با توجه به شاخص های آماری، مدل HYDRUS_2D رطوبت خاک را بهتر از مقادیر شوری شبیه سازی کرد.

واژه های کلیدی: تبخیر، جریان موینگی، حرکت آب در خاک، شوری خاک، نسبت عرض کاشت به نکاشت.

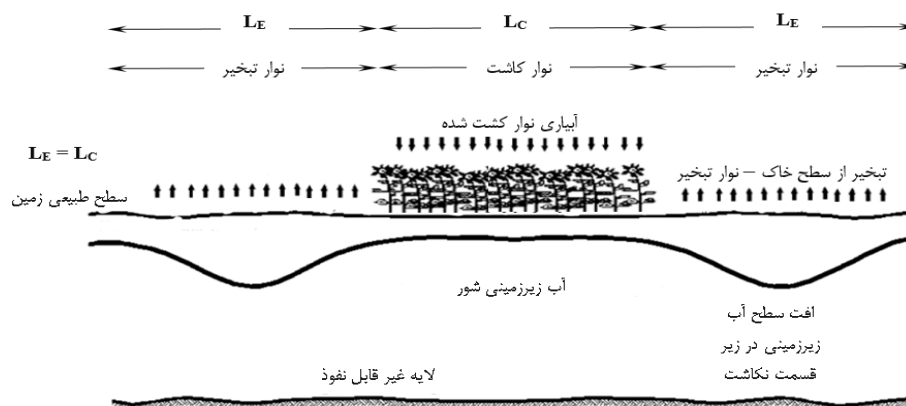
۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت.

* - دریافت: بهمن ۱۳۹۵ و پذیرش: تیر ۱۳۹۶

مقدمه

اقتصادی و سازگارتر با محیط زیست پیش برده است (آذری، ۱۳۸۳). زهکشی کنترل شده، زهکشی زیستی، زهکشی خشک و مدیریت یکپارچه زهکشی در مزرعه از این جمله می باشند (اکرم و همکاران، ۲۰۰۸). زهکشی خشک به عنوان یک روش دوستدار محیط زیست می تواند جایگزین مناسبی برای روش های مرسوم و پرهزینه سامانه های زهکشی سطحی و زیرزمینی باشد. زهکشی خشک با رها کردن قسمتی از زمین به عنوان نوار نکاشت (نوار تبخیر)، این امکان را به وجود می آورد که آب و املاح اضافی قسمت های کشت شده به مرور زمان به سمت نوارهای نکاشت منتقل شود (شکل ۱). در حقیقت در زهکشی خشک با قطعه بندی اراضی بخصوص در نواحی خشک که وسعت اراضی بیشتر از مقدار آب در دسترس است، می توان آب و املاح اضافی قسمت های کاشت را به سمت قسمت های نکاشت هدایت کرد.

شرایط فیزیکی مناسب در محدوده توسعه ریشه ها برای رشد مطلوب گیاه، ضروری است (اسکگر و ون شیلفگارد، ۱۹۹۹). کنترل بیلان آب و نمک در ناحیه ریشه گیاهان، از راه زهکشی کافی و مناسب، مقدور است. احداث سامانه زهکشی امکان خروج املاحی که در منطقه توسعه ریشه تجمع نموده اند را فراهم می کند و از افزایش نمک خاک جلوگیری می کند (عابدی و همکاران، ۱۳۸۱). هرچند سامانه های زهکشی متداول امکان کشت و زرع را در زمین های شور و ماندابی، فراهم می کنند، ولی چالش هایی از جمله سرمایه اولیه بسیار بالا، هزینه های نگهداری و بهره برداری، کیفیت پایین زه آب خروجی و مشکلات زیست محیطی برای تخلیه گاه های این سامانه ها را به دنبال دارد (اکرم، س، ۱۳۸۵). مشکلات عنوان شده، متخصصین و پژوهشگران را به سمت روش های جایگزین



شکل ۱- نمای شماتیکی از زهکشی خشک و اجزای آن (اکرم و همکاران، ۲۰۰۸)

کمترین میزان تبخیر طی آزمایش در حدود ۲/۷ میلی متر در روز بوده که در مقایسه با ضریب زهکشی متداول در طراحی سامانه های زهکشی مقدار قابل قبولی است و با کمترین ریسک نسبت ۵۰ درصد کاشت به ۵۰ درصد نکاشت را توصیه نمودند. در پژوهشی، تأثیر مثبت زهکشی خشک بر کنترل شوری خاک منطقه تحت آبیاری هیتائو در چین بررسی شد. در این پژوهش از یک مدل مفهومی، آزمایش مزرعه ای و سنجش آزدور برای ارزیابی زهکشی خشک استفاده شد. نتایج نشان داد، زهکشی

خوری (۱۹۹۸) قوانین و اصول طراحی و مدیریت یک طرح زهکشی خشک را در قالب مطالعات عددی روی یک نمونه مزرعه فرضی بحث کرده و معتقد است که فاکتورهای محدود کننده در زهکشی خشک شامل بافت خاک، شرایط آب و هوایی، الگوی کشت و فاکتورهای اقتصادی است. دوستی و همکاران (۱۳۹۳) با ساخت مدل فیزیکی با ابعاد $۰/۲ \times ۰/۶$ متر و عمق $۰/۵$ متر، زهکشی خشک را به صورت فیزیکی و در شرایط آزمایشگاهی مدل سازی کردند. نتایج آن ها نشان داد

آن در پایان سال‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب برابر با ۹۹۱، ۹۶۰ و ۹۵۲ میلی‌متر بود. در بررسی بلند مدت، تأثیر تجمع نمک بر ضریب آلودگی و خصوصیات فیزیکی خاک در نظر گرفته نشد. (کنوکا و همکاران، ۲۰۰۶).

مقایسه نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد، رها کردن بخشی از اراضی آبیاری به‌عنوان نوار نکاشت یا نوار تبخیر، تأثیر مؤثری در کاهش شوری خاک ناحیه ریشه دارد. همچنین وجود سطح ایستابی کم‌عمق و نرخ تبخیر بالا از جمله شرایط لازم برای زهکشی خشک است. یکی از عوامل مؤثر بر میزان کاهش شوری ناحیه ریشه، عرض نسبت کاشت به نکاشت است که در این پژوهش بررسی شده است. افزایش نسبت عرض کاشت به نکاشت، امکان بهره‌گیری بیشتر از زمین را فراهم می‌کند. از سویی، سطح تبخیر نوار نکاشت کاهش پیدا می‌کند و در این صورت خطر افزایش شوری ناحیه ریشه بیشتر می‌شود. همچنین، شبیه‌سازی شرایط حاکم بر زهکشی خشک با استفاده از مدل‌های عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایش میدانی می‌تواند اطلاعات بیشتری از زهکشی خشک در اختیار محقق قرار دهد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر شوری آب آبیاری و نسبت عرض کاشت به نکاشت بر کارایی زهکشی خشک و بکارگیری مدل HYDRUS_2D برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک و ضرایب انتقال شوری برای زهکشی خشک در شرایط غیر ماندگار و در ابعاد لایسیمیتری بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

در این پژوهش برای بررسی کارایی زهکشی خشک در کاهش شوری خاک ناحیه ریشه، از لایسیمترهای پژوهشی با سطح مقطع یک مترمربع و عمق یک متر استفاده شد. لایسیمترها از ورق آهن سیاه به ضخامت دو میلی‌متر تهیه شد و برای جلوگیری از زنگ‌زدگی آهن از ضدزنگ استفاده و برای اطمینان بیشتر، کل سطح داخلی با استفاده از رنگ استخری رنگ‌آمیزی

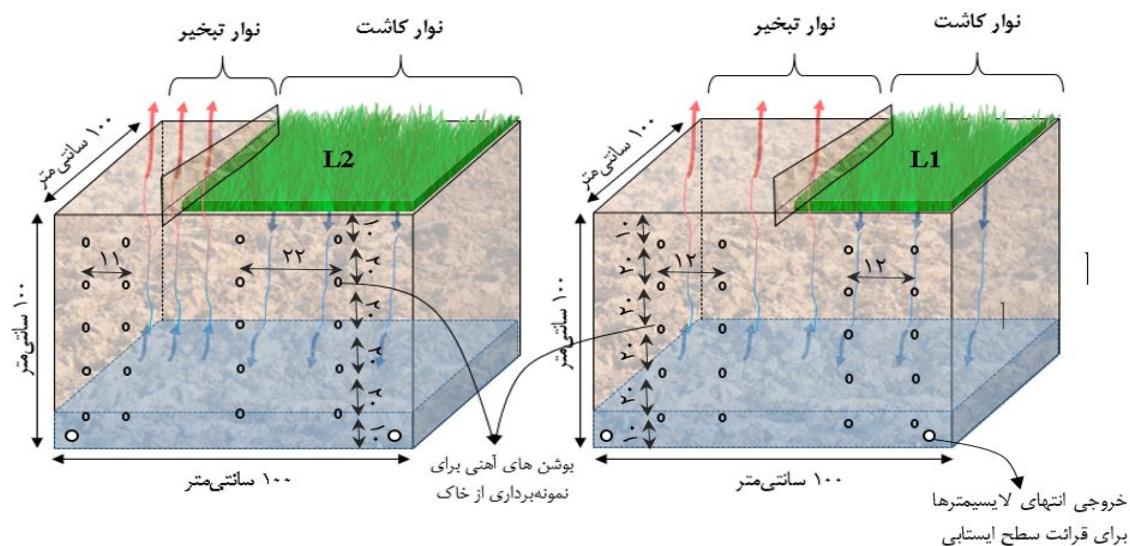
خشک در حذف نمک اضافی از زمین‌های آبیاری مشارکت داشت و در کنترل شوری خاک منطقه آبیاری هیتائو موفق بود. در این پژوهش زهکشی خشک به‌عنوان یک روش جایگزین در مناطق خشک و نیمه‌خشک که فاقد سامانه زهکشی مصنوعی است، پیشنهاد شد. (جینگ وی و همکاران، ۲۰۰۹).

اکرم و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی عوامل مؤثر بر سامانه‌های زهکشی زیستی و خشک را با استفاده از مدل SAHYSMOD بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد هدایت هیدرولیکی خاک نقشی در انباشته شدن نمک در نوار کاشت نداشت. کاهش عمق لایه محدود کننده باعث شد غلظت شوری سریع‌تر افزایش یابد. کاهش پهنای نوارهای کاشت و نکاشت باعث افزایش کارایی سامانه شد و عملکرد آن با افزایش عمق آب آبیاری، کاهش پیدا کرد. محدودیت مهم این سامانه‌ها، پایداری درازمدت آن‌هاست؛ مگر آن‌که شوری آب آبیاری بسیار کم و یا مقدار بارش سالانه قابل توجه باشد. این سامانه‌ها در شرایطی توجیه اقتصادی دارند که مقدار آب کم و مقدار زمین زیاد باشد.

در پژوهشی با توسعه یک مدل شبیه‌سازی و استفاده از داده‌های منتشر شده در حوضه پایین رودخانه ایندوس پاکستان، زهکشی خشک برای الگوی کشت گندم-کتان بررسی شد. منطقه مورد بررسی شامل سطح ایستابی کم عمق و شور، آبیاری متمرکز، نیاز تبخیر بالا و زهکشی خشک به‌صورت طبیعی بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد در شرایط عمق سطح ایستابی در حدود ۱/۵ متر و مساحت برابر قسمت کاشت و قسمت تبخیر، زهکشی خشک توانست بیلان مورد نیاز آب و نمک را فراهم کند. در این پژوهش همچنین بیلان آب و نمک در قسمت نکاشت برای یک دوره سی‌ساله (به‌عنوان عمر اقتصادی سامانه‌های زهکشی متداول) شبیه‌سازی شد تا رفتار بلندمدت زهکشی خشک مشخص شود. نتایج نشان داد تبخیر تجمعی در سال اول ۱۰۵۴ میلی‌متر بود که با گذشت زمان به‌صورت تدریجی کاهش پیدا کرد و مقدار

ترانشه‌ای در زمین ایجاد شد و پس از زیرسازی مناسب، لایسیمترها در آن کار گذاشته شدند و به‌غیر از یک سمت (محل نصب بوش‌ها برای دسترسی و داده برداری)، قسمت خارجی لایسیمترها با خاک پر شد. دیواره محل نصب بوش‌ها با استفاده از فوم دو سانتی متری سفیدرنگ، عایق بندی شد تا میزان خطای ناشی از اثر تابش مستقیم آفتاب به بدنه را کاهش دهد. برای پر کردن لایسیمترها، نزدیک شش تن خاک از الک یک سانتی متری عبور داده شد. برای این منظور از خاک حاصل از حفر ترانشه برای کارگذاری لایسیمترها استفاده شد. عمق ترانشه در حدود ۱/۲ متر بود. به دلیل وجود قلوه سنگ‌های فراوان، پس از الک کردن به‌طور کامل مخلوط شد تا خاک همگن شود.

شد. برای داده برداری در طول آزمایش، چهار ردیف بوشن آهنی به فواصل معین در یک طرف لایسیمتر کارگذاری شد (شکل ۲) و برای جلوگیری از خروج آب و خاک از بوشن‌ها، از درپوش آهنی استفاده شد. تیمارها عبارت‌اند از: L1- نسبت عرض کاشت به نکاشت ۱:۱ و شوری آب آبیاری ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر، L2- نسبت عرض کاشت به نکاشت ۱:۲ و شوری آب آبیاری ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر، L3- نسبت عرض کاشت به نکاشت ۱:۲ و شوری آب آبیاری سه دسی‌زیمنس بر متر و L4- نسبت عرض کاشت به نکاشت ۱:۱ و شوری آب آبیاری سه دسی‌زیمنس بر متر. برای جلوگیری از تابش مستقیم آفتاب به بدنه لایسیمترها و اجتناب از ایجاد خطا،



شکل ۲- شمایی از لایسیمترها با نسبت‌های کاشت به نکاشت متفاوت

عمق‌های ۵۰-۱۰۰ و ۰-۵۰ سانتی متر از سطح خاک و به‌صورت عمودی برداشت شد و برای اندازه‌گیری شوری خاک به روش گل اشباع به آزمایشگاه خاکشناسی منتقل شد (جدول ۱). بافت خاک داخل لایسیمترها با استفاده از مثلث بافت خاک، لومی تعیین شد.

برای ایجاد تراکم و جلوگیری از نشست خاک در زمان انجام آزمایش، دو آبیاری سنگین در هر دو قسمت کاشت و نکاشت انجام شد. سپس، با استفاده از اوگر (قطر هشت سانتی متر و طول ۲۰ سانتی متر) چهار نمونه خاک از هر دو طرف کاشت و نکاشت و از

جدول ۱- خلاصه ویژگی‌های فیزیکی و شوری خاک

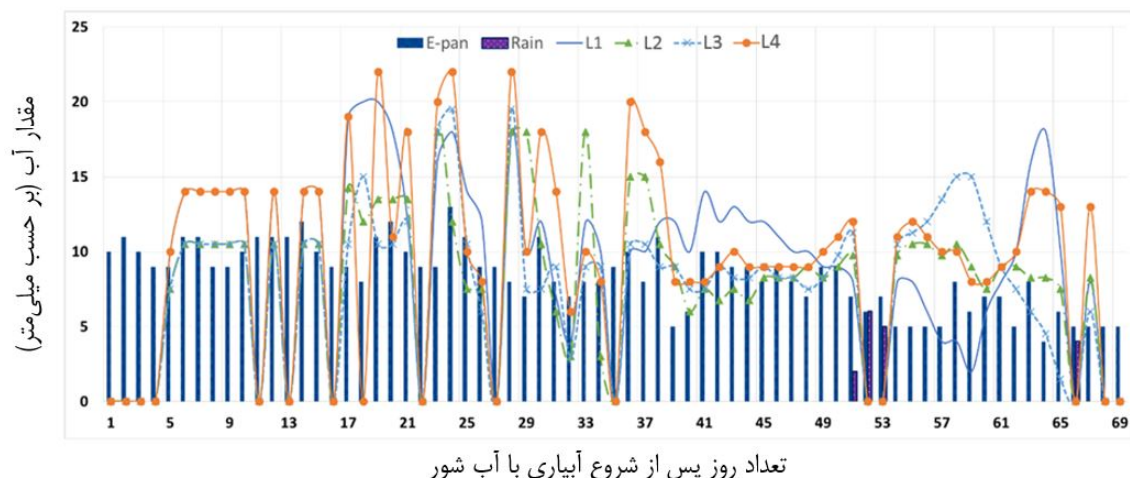
تیمار	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)	هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)
L1	لومی	۵۰/۵	۳۳/۷۵	۱۵/۷۵	۱/۳۳	۷/۱
L2	لومی	۴۸/۵	۳۴/۷۵	۱۶/۷۵	۱/۳۳	۷/۳
L3	لومی	۴۴/۵	۳۶/۷۵	۱۸/۷۵	۱/۳۳	۷/۴
L4	لومی	۴۵/۵	۳۵/۵۰	۱۹/۰۰	۱/۳۳	۵/۱

(۵۰۰) که از قبل به محل آزمایش منتقل شده بود، استفاده شد. از اختلاط آب چاه موجود در محل اجرای طرح و زه آب جمع آوری شده، آب با شوری ۱/۵ و ۳ دسی‌زیمنس بر متر تهیه و به‌عنوان آب آبیاری استفاده شد. مقدار آب آبیاری در هر روز بر اساس افت سطح ایستابی در شبانه‌روز گذشته و جبران آن، تعیین و اعمال شد (شکل ۳). آبیاری به‌صورت سطحی و با استفاده از ظرف مدرج انجام شد. هر شب به مقدار کافی آب‌شور تهیه و آبیاری انجام می‌شد. شوری آب آبیاری با دستگاه شوری سنج قابل‌حمل، اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. آزمایش از تیرماه ۱۳۹۴ شروع و پس از حدود یک ماه (زمان لازم برای استقرار چمن کشت‌شده)، در تاریخ دهم مرداد، آبیاری با آب‌شور آغاز شد و اندازه‌گیری‌ها به مدت ۷۰ روز ادامه داشت. در شکل (۳) مقادیر آب آبیاری برای هر چهار لایسیمتر، تبخیر از تشت، تبخیر و بارندگی به‌صورت روزانه نشان داده شده است.

برای ایجاد سطح ایستابی، یک آبیاری سنگین انجام شد. با قرائت دو پیژومتری که در طرف کاشت و نکاشت نصب شده بود، آبیاری تا زمانی که عمق سطح ایستابی به ۹۰ سانتی‌متری از سطح برسد، ادامه داشت. از چمن رول اسپرت به‌عنوان گیاه مرجع، در قسمت کاشت استفاده شد. ریشه چمن سطحی بوده و متوسط عمق توسعه ریشه آن در حدود ۱۰ الی ۱۵ سانتی‌متر است. در ابتدا برای ایجاد ارتباط بین ریشه گیاه و خاک داخل لایسیمتر به مدت یک ماه آبیاری انجام شد و پس‌از آن با اعمال آب‌شور، آزمایش شروع شد. سطح ایستابی داخل لایسیمتر در طی روز بر اثر تبخیر و تعرق قسمت کاشت و تبخیر از قسمت نکاشت افت می‌کرد.

اندازه‌گیری آب آبیاری و تهیه آب‌شور

برای شور کردن آب آبیاری، از آب زهکش روباز منطقه آبیک قزوین (شوره‌زار مرکزی دشت قزوین، عرض جغرافیایی "۸' ۵۷' ۳۵° و طول جغرافیایی "۲۴' ۳۹")



شکل ۳- مقادیر تبخیر از تشت، عمق آبیاری و بارندگی برای تیمارهای مختلف در طول آزمایش

L2 و L3 بیشتر است و نیاز آبی بیشتری دارند، ولی در کل میزان آب مصرفی کمتری داشتند، زیرا سطح تبخیر آنها از قسمت کاشته‌نشده کمتر از تیمارهای L1 و L4 است.

مقدار بارندگی در طول آزمایش ۱۷/۵ میلی‌متر و مقدار کل آب آبیاری در تیمارهای L1، L2، L3 و L4 به ترتیب برابر با ۶۴۳، ۵۵۹، ۵۵۱ و ۶۷۵ میلی‌متر بود. از آنجایی که در زهکشی خشک آب آبیاری صرف تبخیر و تعرق قسمت کاشت و تبخیر از قسمت کاشته‌نشده می‌شود. به همین دلیل اگرچه سطح کاشت در تیمارهای

اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک

محدوده وسیعی از واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی که به‌صورت آنی یا تدریجی اتفاق می‌افتد را مدل‌سازی کند (شیمونک و همکاران، ۲۰۰۸). در این پژوهش برای حل معادلات جریان آب و انتقال شوری در خاک از مدل HYDRUS_2D استفاده شد. معادله حاکم بر جریان داریسی آب در محیط متخلخل صلب، برای شرایط یکنواخت و هم‌دما و با فرض نقش ناچیز فاز گازی در روند حرکت مایع، بر اساس معادله اصلاح‌شده ریچاردز در دو بعد و برای شرایط غیراشباع به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن:

θ محتوای رطوبت حجمی [$L^3 L^{-3}$], h ارتفاع معادل فشار [L], S عبارت تخلیه [T^{-1}], X_i مختصات مکانی [L], t زمان [T], K_{ij}^A مؤلفه‌های بی‌بعد تانسور غیرهمگنی خاک K^A و هدایت هیدرولیکی غیراشباع [L^{-1}] که تابعی از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و S حجم آب تخلیه‌شده در واحد زمان از یک واحد حجم خاک و مقدار آن برابر با آب جذب‌شده به‌وسیله گیاه است.

پارامترهای هیدرولیکی خاک در شرایط غیراشباع

پارامترهای هیدرولیکی خاک در شرایط غیراشباع در معادله (۱) $\theta(h)$ و $K(h)$ به‌طور عمومی تابع غیرخطی از ارتفاع فشاری در محیط متخلخل هستند. HYDRUS_2D امکان استفاده از پنج مدل تحلیلی مختلف (بروکس و کوری، ۱۹۶۴؛ ون گنوختن، ۱۹۸۰؛ ووجل و سیسلروا، ۱۹۸۸؛ کسوگی، ۱۹۹۶ و دانه، ۱۹۹۴) برای خواص هیدرولیکی خاک را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این پژوهش از مدل ونگنوختن (۱۹۸۰) و معلم (۱۹۷۶) برای توصیف منحنی نگهداشت رطوبتی خاک $\theta(h)$ و تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(h)$ استفاده شد.

HYDRUS_2D معادله جابه‌جایی-انتشار را

به‌صورت عددی همراه با عبارت‌های تخلیه، واکنش‌های

اندازه‌گیری‌ها شامل رطوبت وزنی و شوری خاک به روش گل اشباع بودند که در چهار عمق ۲۰-۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک هر دو ناحیه کاشت و نکاشت انجام شد. با توجه به نوع خاک، نمونه‌برداری از بوشن‌های تعبیه‌شده امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل، نمونه‌برداری به‌صورت عمودی با استفاده از اوگر و از سطح خاک انجام شد. در طول انجام آزمایش چهار نمونه‌برداری در روزهای ۱، ۲۱، ۳۵ و ۶۸ از شروع اعمال آب‌شور، انجام شد.

مدل HYDRUS_2D

HYDRUS و بسته نرم‌افزاری همراه با آن، مدل‌های عددی را ارائه می‌کند که برای شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در محیط متخلخل برای شرایط اشباع و غیراشباع کاربرد دارد. این بسته نرم‌افزاری قابلیت شبیه‌سازی جریان و انتقال یک بعدی (HYDRUS_1D)، دو بعدی (SOILCO2، HP1 و UNSATCHEM)، دو بعدی (SWMS_2D، CHAIN_2D یا HYDRUS_2D) و سه بعدی (SWMS_3D یا HYDRUS (2D/3D)) را دارد. اگرچه شبیه‌سازی حرکت آب در تمام این مدل‌ها تقریباً یکسان است، ولی مدل‌های انتقال املاح مختلفی وجود دارند که در کدهای متفاوت ارائه شده‌اند. بعضی از مدل‌ها می‌توانند فقط انتقال املاح را مستقل از یکدیگر شبیه‌سازی کنند، درحالی‌که سایر مدل‌ها شامل بخش بیوژئوشیمیایی هستند که قادر به شبیه‌سازی واکنش‌های پیچیده بین املاح مختلف نیز هستند. به عنوان مثال، مدل‌های HYDRUS_1D و UNSATCHEM می‌توانند انتقال یون‌های اصلی و اثر متقابل آن‌ها را در نظر بگیرند، درحالی‌که مدل Wetland در HYDRUS (2D/3D) علاوه بر این قادر است روند بیوشیمیایی مرتبط با جریان فاضلاب را برای مرداب‌های طبیعی یا مصنوعی در نظر بگیرد. درنهایت، HP1 که نتیجه تلفیق HYDRUS_1D و PHREEQC است، می‌تواند

با توجه به اثر متقابل میدان جریان و میدان غلظت، بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال شوری در این پژوهش به صورت همزمان انجام شد. برای مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده از شاخص‌های آماری خطای نسبی، ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب جرم باقیمانده و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده استفاده شد که به ترتیب طبق روابط (۲) تا (۵) محاسبه شد.

$$SE = \frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2)^{0.5}}{\bar{P}} \quad (2)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

$$RMSE = (\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n)^{0.5} \quad (4)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (5)$$

که در آن‌ها:

\bar{O} ، \bar{P} ، \bar{P} و n به ترتیب مقادیر برآورد شده، متوسط برآورد شده، اندازه‌گیری شده، متوسط اندازه‌گیری شده و تعداد داده‌ها هستند و شاخص \bar{O} نیز نشان‌دهنده‌ی هر یک از داده‌ها است.

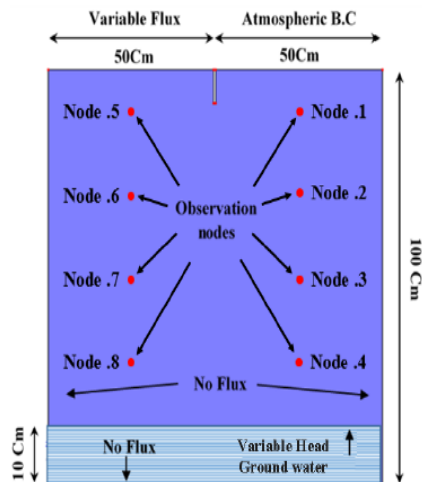
شرایط اولیه و مرزی

هندس و شرایط مرزی تعریف شده برای لایسیمتر L1 در مدل HYDRUS_2D در شکل (۴) نشان داده شده است. شرایط مرزی لایسیمترهای دیگر، مشابه L1 بوده و هندسه آن‌ها متناسب با شرایط فیزیکی هر کدام تعریف شد. رطوبت اولیه تمام تیمارها در مدل‌سازی بر اساس موقعیت سطح ایستابی و رطوبت سطح خاک تعریف شد. به طوری که تغییرات رطوبت بین سطح و عمق خاک به صورت خطی فرض شد. همچنین، مقادیر شوری اولیه خاک بر اساس نمونه برداری انجام شده قبل از شروع آزمایش (در عمق‌های مختلف و در هر دو قسمت کاشت و نکاشت) تعریف شد.

مرتب‌ه صفر و مرتبه اول حل می‌کند. در این پژوهش، هدف استفاده از HYDRUS_2D برای بررسی تغییرات شوری خاک بود. از آنجایی که فاکتورهای کاهنده در معادله جابه‌جایی-انتشار برای هر کاتیون و آنیون ضرایب مخصوص به خود را دارند و امکان بررسی و مدل‌سازی تمام کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در عصاره اشباع خاک به طور همزمان وجود نداشت، تأثیر این عوامل کاهنده از جمله، تخریب، جذب سطحی ذرات خاک، جذب ریشه گیاه، تصعید و فرایندهای دیگر، به صورت تغییرات هدایت الکتریکی عصاره اشباع در نظر گرفته شد. مدل HYDRUS_2D معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان آب و انتقال املاح را با توجه به شرایط اولیه و مرزی تعریف شده توسط کاربر، به روش عددی اجزاء محدود گالریکین حل می‌کند. مدل برای تعیین پارامترهای بهینه در حل عددی معادلات ریچاردز و جابه‌جایی-انتشار از روش بهینه‌سازی لونیبرگ-مارکوارت استفاده می‌کند. رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و شوری عصاره اشباع خاک برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی شامل رطوبت باقی‌مانده، رطوبت اشباع، ضرایب n ، α و هدایت هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله جابه‌جایی-انتشار شامل ضریب انتشار پذیری طولی، ضریب انتشار پذیری عرضی و ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد در حل معکوس به کار گرفته شدند. حل معکوس در مدل HYDRUS_2D بر پایه حداقل کردن یک تابع هدف مناسب است که مقدار اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

در این پژوهش، مدل HYDRUS_2D برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و انتقال شوری در زهکشی خشک اجرا و اعتبارسنجی شد. سپس نتایج به دست آمده از اجرای مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت و شوری خاک مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین، پارامترهای هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله جابه‌جایی-انتشار با استفاده از روش حل معکوس مدل HYDRUS_2D تعیین و مورد ارزیابی قرار گرفت.

L3 و L4 هشت درصد بود در حالی که خطای استاندارد در برآورد شوری به ترتیب ۲۵، ۲۴، ۲۹ و ۲۷ درصد بود. همچنین، طبق جدول (۳) اگرچه ضریب تبیین در برآورد شوری بهتر از مقادیر ضریب تبیین در برآورد رطوبت بود، ولی شاخص‌های آماری نسبی مانند مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و خطای استاندارد برای برآورد شوری در مقایسه با رطوبت، در تمام تیمارها بیشتر بود. با توجه به شاخص‌های آماری خطای استاندارد و ریشه میانگین مربعات خطا، مدل HYDRUS_2D در شرایط آزمایش، رطوبت خاک را بهتر از مقادیر شوری خاک شبیه‌سازی کرد. مقادیر منفی و مثبت ضریب جرم باقیمانده CRM، به ترتیب نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی در شبیه‌سازی است. با توجه به مقادیر CRM، روند کلی و یکسانی برای تیمارهای مختلف وجود نداشت. مقدار CRM برای هر یک از تیمارها محاسبه و در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۴- شرایط مرزی و هندسه تعریف‌شده برای زهکشی خشک (L1) در مدل HYDRUS_2D

نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی مدل برای برآورد رطوبت و شوری خاک شامل پارامترهای بهینه‌سازی شده و شاخص‌های آماری در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است. مقدار خطای استاندارد در برآورد رطوبت خاک برای لایسمتر L1 هفت درصد، L2 ۱۱ درصد و برای

جدول ۲- خلاصه نتایج حل معکوس مدل و پارامترهای بهینه‌شده تیمارهای مختلف

پارامترهای بهینه‌شده معادلات حرکت آب و انتقال شوری در خاک									
تیمار	SSQ*	θ_r^{**} ($\text{Cm}^3 \text{Cm}^{-3}$)	θ_s^{**} ($\text{Cm}^3 \text{Cm}^{-3}$)	α^{**} (1mm^{-1})	n^{**} (-)	K_s^{**} (mm hr^{-1})	D_L^{***} (mm)	D_T^{***} (mm)	D_w^{***} (mm hr^{-1})
L1	۲/۸۷	-۰/۸۳	-۰/۳۳۴	-۰/۰۰۱۴	۱/۴۲	۴/۵۳	۴۲۳	۲/۴۶	۹/۴۰
L2	۴/۲۰	-۰/۹۵	-۰/۳۴۵	-۰/۰۰۲۲	۱/۴۵	۱/۲۲	۱۳۷	۲۱/۶۰	۱۲/۸۴
L3	۴/۹۶	-۰/۱۰۷	-۰/۳۸۴	-۰/۰۰۲۶	۱/۴۹	۲/۰۸	۱۱۲	۳/۷۵	۸/۵۳
L4	۳/۵۰	-۰/۰۵۴	-۰/۳۷۴	-۰/۰۰۱۶	۱/۴۴	۵/۲۶	۱۴۶	۲۰/۵۲	۶/۸۳

SSQ*: مجموع مربعات باقی‌مانده

θ_r^{**} ; θ_s^{**} ; α^{**} ; n^{**} و K_s^{**} : پارامترهای هیدرولیکی خاک

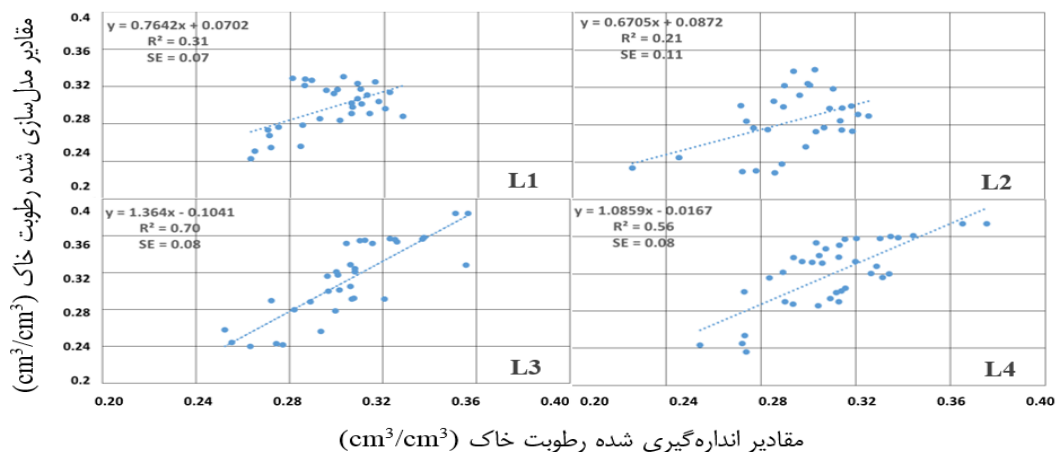
D_L^{***} ; D_T^{***} و D_w^{***} : پارامترهای انتقال املاح در خاک

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در برآورد رطوبت و شوری خاک

تیمار	شبیه‌سازی رطوبت خاک				شبیه‌سازی شوری خاک			
	NRMSE (-)	RMSE ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	CRM (-)	R ² (-)	NRMSE (-)	RMSE (dS m^{-1})	CRM (-)	R ² (-)
L1	-۰/۳۱	-۰/۰۲۱	۰	-۰/۸۴	-۰/۲۰۷	۲/۰۱	-۰/۱	-۰/۸۴
L2	-۰/۲۱	-۰/۰۳۱	-۰/۰۳	-۰/۵۵	-۰/۲۴۸	۲/۴۳	-۰/۱۲	-۰/۵۵
L3	-۰/۷۰	-۰/۰۲۵	-۰/۰۲	-۰/۴۲	-۰/۲۷۵	۲/۷۳	-۰/۰۳	-۰/۴۲
L4	-۰/۵۶	-۰/۰۲۶	-۰/۰۳	-۰/۷۲	-۰/۲۴۸	۲/۱۶	-۰/۰۲	-۰/۷۲

موضوع می‌تواند دلیل پایین بودن ضرایب تبیین، در شبیه‌سازی رطوبت خاک باشد. علت بالا بودن مقدار رطوبت‌ها و محدوده کم رطوبت‌های مشاهده‌شده، آبیاری روزانه و وجود سطح ایستابی در شرایط آزمایش بود. مقدار ضریب تبیین گزارش‌شده در برخی پژوهش‌های مشابه برای رطوبت خاک بین ۴۹ تا ۹۴ درصد بود (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۲؛ فوگات و همکاران، ۲۰۱۳؛ مولایی کندلوس و همکاران، ۲۰۱۰ و منجری و همکاران، ۲۰۱۳). شکل (۶) نتایج خروجی مدل و مقادیر رطوبت خاک مشاهده‌شده را در طول زمان آزمایش نشان می‌دهد.

شکل (۵) رابطه بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک را نشان می‌دهد. آزمون رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک برای تمام تیمارها در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. مقادیر ضریب تبیین بین ۲۱ درصد (L2) و ۷۰ درصد (L3) بود. نتیجه آزمون نشان داد رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک در تمام تیمارها به‌صورت خطی بود. همان‌طوری که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، محدوده رطوبت‌های مشاهده‌شده بین ۲۰ تا ۴۰ درصد حجمی بوده و مدل برای ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی اطلاعات کمی را در اختیار داشت، این



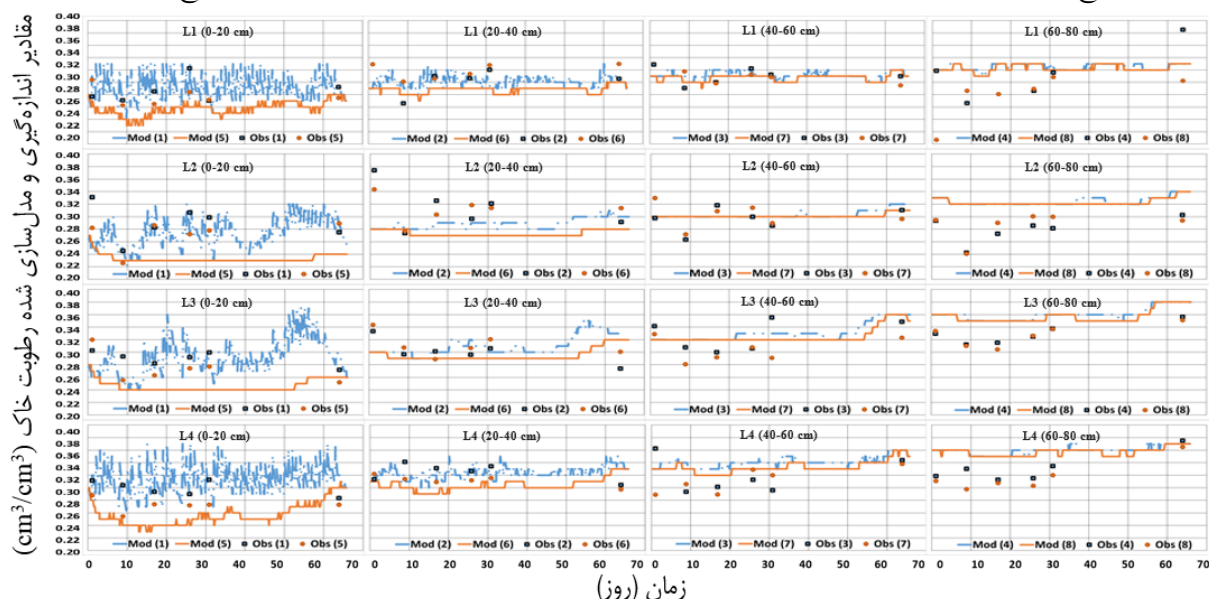
شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده رطوبت خاک در تیمارهای مختلف

مقادیر ضریب تبیین بین ۴۲ درصد (L3) و ۸۴ درصد (L1) بود. نتیجه آزمون نشان داد رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده شوری خاک در تمام تیمارها به‌صورت خطی بود. در برخی پژوهش‌های مشابه، مقدار ضریب تبیین برای شوری خاک بین ۳۰ تا ۸۲ درصد گزارش‌شده است (عباسی و همکاران، ۲۰۰۴؛ ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۳). شکل (۸) نتایج خروجی مدل و مقادیر شوری اندازه‌گیری‌شده را در طول زمان نشان می‌دهد. نتایج خروجی مدل نشان داد، اختلاف شوری بین قسمت کاشت و نکاشت در عمق‌های یکسان، از بالا به پایین کاهش می‌یابد، به طوری که بیشترین اختلاف در لایه سطحی و بین نقاط یک و پنج است که دلیل آن متفاوت بودن جهت حرکت نمک در دو ناحیه کاشت و نکاشت

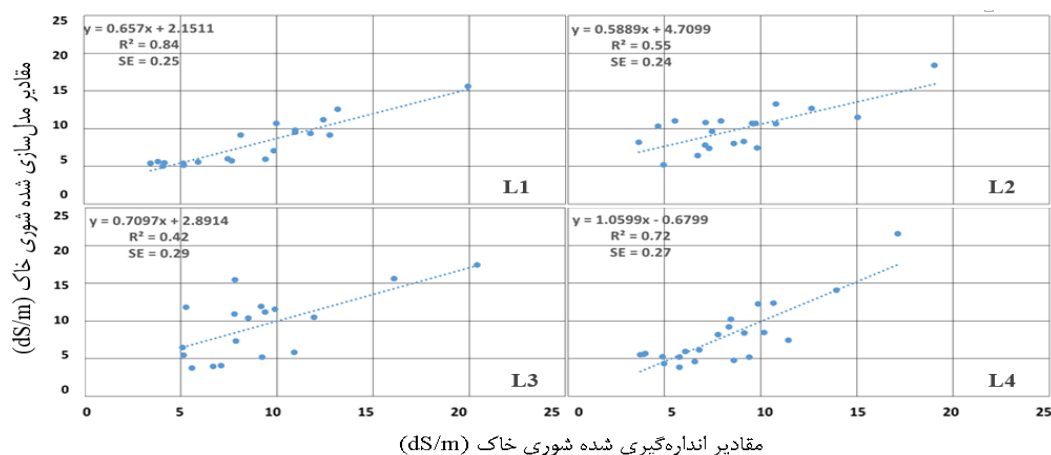
نتایج نشان داد، اختلاف رطوبت بین دو ناحیه آبیاری و تبخیر در لایه‌های سطحی بیشتر بود. بیشترین اختلاف رطوبت در تمام لایسیترها بین نقاط ۱ (لایه سطحی ناحیه آبیاری، Node.1) و ۵ (لایه سطحی ناحیه تبخیر، Node.5) بود. با افزایش عمق خاک و نزدیک شدن به سطح ایستابی، رطوبت خاک بیشتر تحت تأثیر صعود مویینه است. به همین دلیل نوسان و اختلاف رطوبت بین ناحیه آبیاری و تبخیر در لایه نزدیک به سطح ایستابی کمتر از لایه‌های بالایی بود.

شکل (۷) رابطه بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی‌شده را برای شوری خاک نشان می‌دهد. آزمون رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده شوری خاک برای تمام تیمارها در سطح پنج درصد معنی‌دار شد.

بود. جهت حرکت نمک در ناحیه کاشت تحت تأثیر آبیاری، از سطح به عمق بود، درحالی که در ناحیه نکاشت، جهت حرکت نمک معکوس و از عمق به سطح بود.



شکل ۶- مقادیر رطوبت اندازه گیری (Obs) و شبیه سازی شده (Mod) قسمت کاشت و نکاشت در عمق های مختلف



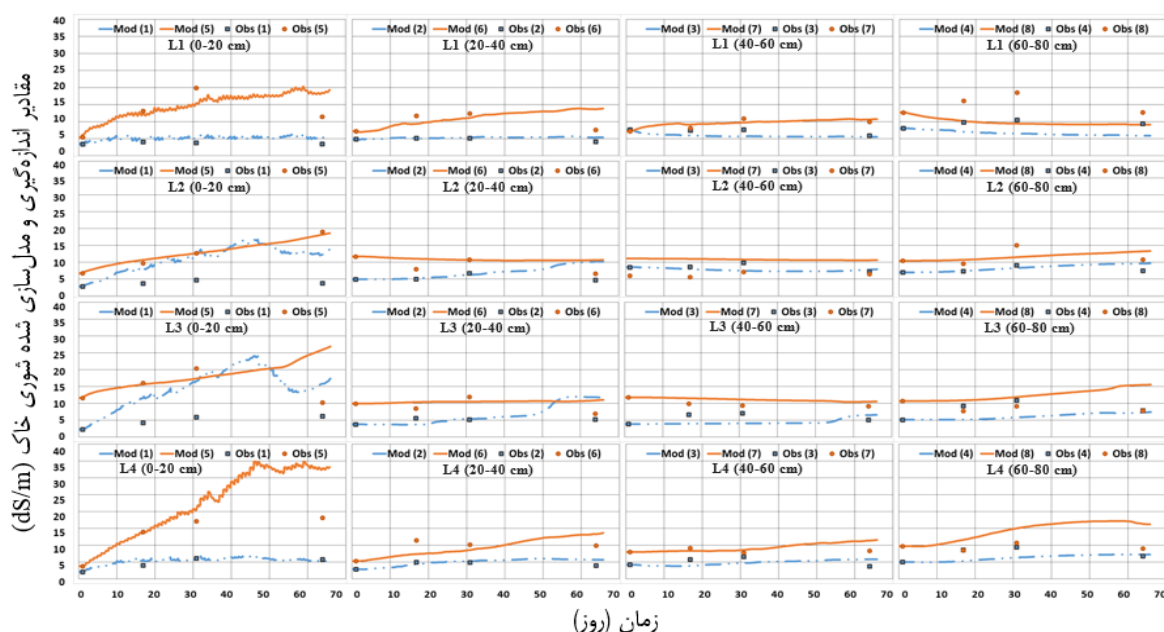
شکل ۷- مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده شوری خاک در تیمارهای مختلف

همان طور که در شکل (۸) مشخص است، تغییرات شوری ناحیه ریشه در دو لایسمتر دیگر با نسبت عرض کاشت و نکاشت بیشتر، متفاوت بود. نرخ افزایش شوری در لایسمترهای ۲ و ۳ (نسبت عرض کاشت به نکاشت ۱:۲) بیشتر از دو لایسمتر دیگر بود، به طوری که در لایسمتر ۲ شوری لایه سطحی در قسمت نکاشت از ۲/۸ به ۱۳/۹ (حدود ۴/۹ برابر) دسی زیمنس بر متر افزایش یافت و در لایسمتر ۳ که بیشترین مقدار افزایش شوری مشاهده شد، این مقدار از ۲/۳ به ۱۷/۳ (حدود ۷/۷

شوری ناحیه ریشه در دو لایسمتر ۱ و ۴ با گذشت زمان به تعادل رسیده است و از شش دسی زیمنس بر متر فراتر نرفته است. به طوری که در لایسمتر ۱ شوری لایه سطحی در قسمت نکاشت از ۳/۵ به ۵/۹ (حدود ۱/۷ برابر) دسی زیمنس بر متر رسید، ولی در لایسمتر ۴ که شوری آب آبیاری بیشتر بود، این مقدار از ۲/۱ به ۵/۷ (حدود ۲/۷ برابر) دسی زیمنس بر متر افزایش یافت.

زیمنس بر متر افزایش یافت و این مقدار در لایسمتر ۴ به ترتیب ۳/۷۹، ۳۳/۷۱ و ۸/۸۹ بود. با افزایش عرض کاشت به نکاشت در لایسمترهای ۲ و ۳، نمک کمتری در سطح خاک قسمت نکاشت منتقل شد و نرخ افزایش شوری لایه سطحی قسمت نکاشت نسبت به دو لایسمتر دیگر کمتر بود. به طوری که در لایسمتر ۲ شوری لایه سطحی قسمت نکاشت از ۶/۷۱ به ۱۸/۶۲ (حدود ۲/۷۷ برابر) دسی زیمنس بر متر رسید و در لایسمتر ۳ این مقدار از ۱۱/۶۲ به ۲۶/۹ (حدود ۲/۳۱ برابر) افزایش یافت. به همین دلیل شوری ناحیه ریشه در دو لایسمتر ۲ و ۳ با گذشت زمان افزایش بیشتری نسبت به دو لایسمتر دیگر داشته است. در واقع سطح تبخیر در دو لایسمتر ۲ و ۳ به اندازه کافی بزرگ نبوده، به طوری که تبخیر از سطح خاک نتوانسته است شیب هیدرولیکی لازم برای انتقال شوری از ناحیه آبیاری به ناحیه تبخیر را تأمین کند.

برابر) دسی زیمنس بر متر رسید. در واقع با افزایش نسبت عرض کاشت به نکاشت، شوری ناحیه ریشه نیز افزایش پیدا کرد و در شرایط آزمایش و عمق سطح ایستابی ۹۰ سانتی متر، افزایش عرض کاشت نتوانست شوری ناحیه ریشه را تثبیت کند. در حالی که در لایسمترهای ۱ و ۴ با عرض کاشت به نکاشت ۱:۱، با افزایش شوری آب آبیاری از ۱/۵ به ۳ دسی زیمنس بر متر، شوری نهایی ناحیه ریشه از شش دسی زیمنس بر متر بیشتر نشد. با گذشت زمان و انتقال شوری از ناحیه آبیاری به ناحیه تبخیر، شوری لایه سطحی قسمت نکاشت با تجمع نمک در این ناحیه، در همه لایسمترها افزایش یافت. این افزایش شوری برای لایسمترهای ۱ و ۴ با نسبت عرض کاشت به نکاشت ۱:۱ بیشتر از دو لایسمتر دیگر بود. به طوری که در لایسمتر ۱ شوری لایه سطحی قسمت نکاشت از ۵/۴۴ به ۱۹/۳۸ (حدود ۳/۵۶ برابر) دسی



شکل ۸- مقادیر شوری اندازه گیری و شبیه سازی شده قسمت کاشت و نکاشت در عمق های مختلف

شرایط آزمایش و عمق سطح ایستابی ۹۰ سانتی متر، افزایش عرض کاشت، نتوانست شوری در ناحیه ریشه را به تعادل برساند. در حالی که نسبت عرض کاشت به نکاشت برابر، نتوانست با ثابت نگه داشتن شوری در ناحیه توسعه ریشه (که مقدار آن به شوری آب آبیاری بستگی

نتیجه گیری

اجرای صحیح زهکشی خشک می تواند امکان کنترل شوری در ناحیه ریشه را فراهم کند. اگرچه در تمام تیمارها روند تغییرات شوری در قسمت نکاشت در طول زمان معکوس و از پایین به بالا افزایشی شد، ولی در

دارد) و انتقال شوری به منطقه نکاشت، شرایط مناسبی را برای رشد گیاه ایجاد کند. در تمام تیمارها، تغییرات شوری در نیم‌رخ خاک و جهت حرکت شوری و رطوبت در خاک با مبانی زهکشی خشک همخوانی داشت. با وجود محدود بودن تعداد مقادیر مشاهده‌شده و با توجه به شاخص آماری NRMSE، مدل HYDRUS_2D رطوبت و شوری خاک را با دقت معقولی برآورد نمود. اجرای زهکشی خشک در زمین واقعی و ابعاد بزرگ، می‌تواند اطلاعات بیشتری از شرایط رطوبتی و شوری خاک برای شبیه‌سازی را فراهم نماید. نصب حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت و شوری در لایه‌های مختلف خاک امکان داده‌برداری در بازه‌های زمانی کوتاه را امکان‌پذیر می‌کند. پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده، بازه زمانی داده‌برداری کوتاه‌تر شود. همچنین مدت زمان آزمایش طوری طولانی‌تر شود که عملکرد زهکشی خشک در فصول سرد سال نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) و ایجاد شرایط استفاده از لوازم آزمایشگاهی گروه که کمک شایانی در انجام آزمایش‌ها داشت، تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین، از دوستانی که بدون کمک آن‌ها امکان اجرای عملیات صحرائی وجود نداشت، به‌ویژه آقایان رسول سهرابی، دکتر رضا راجی، مهندس سعید سلطانی، مهندس سعید ستوده نیا، مهندس سجاد کریم زادگان، مهندس میلاد نادری، مهندس حبیب کریمی، دکتر مصطفی عالی‌فر، دکتر آرشد رنجبر، مهندس سید غلامرضا بابایی و تمام دوستانی که به‌نوعی برای ارتقای این پژوهش مساعدت کردند، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

فهرست منابع

۱. آذری، ا. ۱۳۸۳. زهکشی از طریق جریان موئینه‌ای و تبخیر (روش کشاورزی نواری). سومین کارگاه فنی زهکشی و محیط‌زیست. ایران، تهران. ص ۵۸-۴۹.
۲. اکرم، س. ۱۳۸۵. تحلیل حساسیت سامانه‌های زهکشی‌زیستی به شوری با کمک مدل ریاضی SAHYSMOD. چهارمین کارگاه فنی زهکشی و محیط‌زیست، ایران، تهران. ص ۹۲-۷۳.
۳. دوستی، ا. ستوده‌نیا، ع. لیاقت، ع.م. و پ، دانش‌کار آراسته. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی زهکش خشک به‌منظور تعیین نسبت عرض نکاشت به کاشت در کشت نواری. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. دوره ۴۵، شماره ۱. ص ۵۴-۴۷.
۴. عابدی، م.ج. نیریزی، س. ابراهیمی بیرنگ، ن. ماهرانی، م. خالدی، ه. مهرداد، ن و ع.م. چراغی. ۱۳۸۱. استفاده از آب شور در کشاورزی پایدار. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران. ص ۲۳۷.
5. Abbasi, F., Feyen, J., and Van Genuchten, M.T. 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. *Journal of Hydrology*, 290(1):63-79.
6. Akram, S., Kashkoui, H, A, and Pazira, E. 2008. Sensitive variables controlling salinity and water table in a bio-drainage system. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(3-4):271-285.
7. Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Corey, Hydraulic properties of porous media, *Hydrol. Paper No. 3*, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
8. Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resour. Res.*, 32(9):211-223.

9. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Abbasi, F., and Navabian, M. 2012. Comparison of one-and two-dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(10): 929-938.
10. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., Abbasi, F., and Navabian, M. 2013. Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Irrigation Science*, 31(3):301-316.
11. Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97(7):1070-1076.
12. Khouri, N. 1998. Potential of dry drainage for controlling soil salinity. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25(2): 195-205, 10.1139/197-076.
13. Konukcu, F., Gowing, J. W., and Rose, D. A. 2006. Dry drainage: A sustainable solution to waterlogging and salinity problems in irrigation areas? *Agricultural water management*, 83(1):1-12.
14. Kosugi K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 32(9):2697-2703.
15. Monjezi, M. S., Ebrahimian, H., Liaghat, A., and Moradi, M.A. 2013. Soil-wetting front in surface and subsurface drip irrigation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 166(5): 272-284.
16. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3):513-522.
17. Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, J.W., Alam, J., Grigson, G., and Šimůnek, J. 2013. Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree. *Agricultural Water Management*, 127:74-84.
18. Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., and Šejna, M. 2007. Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages. In *Numerical Modelling of Hydrodynamics for Water Resources*, An International Workshop, Centro Politecnico Superior, University of Zaragoza Spain, pp. 95-114.
19. Skaggs, R.W. and Van Schilfhaarde, J.. 1999. *Agricultural drainage*. American Society of Agronomy.
20. 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.
21. Vogel, T., and Císlerová M. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*, 3(1):1-15.
22. Wu, J., Zhao, L., Huang, J., Yang, J., Vincent, B., Bouarfa, S., and Vidal, A. 2009. On the effectiveness of dry drainage in soil salinity control. *Science in China Series E. Technological Sciences*, 52(11):3328-3334.