

## شبیه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی ترانسه‌دار در مقیاس مدل فیزیکی اراضی شالی‌زاری با مدل HYDRUS-2D

فاطمه محمدپور<sup>۱</sup>، مریم نوابیان<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۴

### چکیده

زهکشی ضعیف در اراضی شالی‌زاری که دارای خاک با بافت سنگین می‌باشند نه تنها امکان برداشت مکانیزه برنج را در زمان وقوع بارش با مشکل مواجه می‌کند، بلکه عامل تجمع املاح در خاک و سدیمی شدن آن در هنگام استفاده از آب‌های نامتعارف در طولانی مدت می‌شود. هم‌چنین این اراضی قادر به رفع شرایط ماندابی در فصل مرطوب نبوده و کشت دوم گیاهان را دچار محدودیت می‌کند. بنابراین استفاده از سامانه زهکشی مناسب در اراضی شالی‌زاری با هدف کنترل شوری و رفع غرقاب خاک ضرورت دارد. نصب زهکش زیرزمینی در ترانسه‌شن و ماسه منجر به ایجاد شرایط متخلخل بهتر اطراف لوله زهکش و در نتیجه بهبود عملکرد زهکشی می‌شود. انتخاب هندسه بهینه ترانسه به لحاظ فنی و اقتصادی نیازمند توانمندی در خصوص شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و ترانسه به سمت زهکش است. در این مطالعه به منظور بررسی عملکرد زهکش زیرزمینی ترانسه‌دار با پوشش‌شن و ماسه در اراضی شالی‌زاری از مدل شبیه‌سازی HYDRUS-2D استفاده شد. به منظور واسنجی مدل HYDRUS-2D، مدل فیزیکی زهکش زیرزمینی ترانسه‌دار قابل کنترل در اراضی شالی‌زاری ساخته و گیاه برنج رقم هاشمی در آن کشت شد. در طول دوره رشد از محلول خاک و هم‌چنین در زمان انجام زهکشی میان و پایان فصل از زه‌آب نمونه‌برداری انجام شد. سپس در آزمایشگاه هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل دقت مناسبی در شبیه‌سازی حرکت آب و غلظت کل املاح زه‌آب و پروفیل خاک دارد. مقادیر شاخص‌های آماری  $R^2$ ، RMSE و nRMSE در بخش اعتبارسنجی برای بار آبی به ترتیب برابر ۰/۹۸۲، ۲/۸ سانتی‌متر و ۴/۵۵ درصد و در بخش غلظت به ترتیب برابر ۰/۴۱۹، ۰/۰۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۰/۵۶ درصد به دست آمد. هم‌چنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ضریب انتشارپذیری طولی با ضریب حساسیت به ترتیب ۲/۶ سانتی‌متر بر روز و ۰/۴۷ سانتی‌متر اثرگذاری بیش‌تری بر حرکت آب و املاح دارند.

**واژه‌های کلیدی:** حجم زه‌کشی، زهکش کنترل شده، سطح ایستابی، شوری، مدل دو بعدی

### مقدمه

دوم سال نیز می‌شود. عملکرد زهکشی زیرزمینی بستگی زیادی به هدایت هیدرولیکی خاک اطراف لوله‌ی زهکش دارد از این‌رو برای بهبود توانایی زهکشی زیرزمینی در تخلیه آب از پروفیل خاک، استفاده از مواد پوششی با خاصیت نفوذپذیری بالا مانند شن و ماسه، مواد آلی و مواد مصنوعی در اطراف لوله زهکش توصیه می‌شود (Tao et al., 2016). از سوی دیگر عملکرد مواد پوششی ترانسه و اطراف لوله زهکش بستگی به مشخصات و ویژگی‌های خاک اطراف آن دارد (Ritzema et al., 2006). پوشش‌شن و ماسه به دلیل حجیم بودن و امکان تطابق بیشتر با دانه‌بندی خاک، در مقایسه با سایر پوشش‌های ترانسه و دور زهکش کارآمدتر می‌باشند اما اغلب به دلیل فاصله زیاد منبع قرصه تا محل پروژه و هزینه بالا، دارای محدودیت در استفاده هستند. در اراضی شالی‌زاری به دلیل سنگینی بافت خاک، فواصل زهکش زیرزمینی کم می‌باشد که این مسئله در کنار هزینه حفر و نصب زهکش زیرزمینی به دلیل نبود ماشین‌الات مخصوص

هدف سامانه‌های زهکشی خاک، کنترل شرایط اشباع خاک و ایجاد وضعیت مناسب برای رشد گیاه می‌باشد. در خاک‌های سنگین، علاوه بر سامانه زهکشی سطحی برای بهبود شرایط خاک نیاز به یک سامانه مکمل دیگر، به‌ویژه از نوع زهکشی زیرزمینی می‌باشد. احداث زهکشی زیرزمینی در اراضی شالی‌زاری دارای بافت خاک سنگین علاوه بر این که زمین کشاورزی کم‌تری را اشغال می‌کند منجر به افزایش پتانسیل شستشوی املاح خاک و بهبود شرایط کشت در نیمه

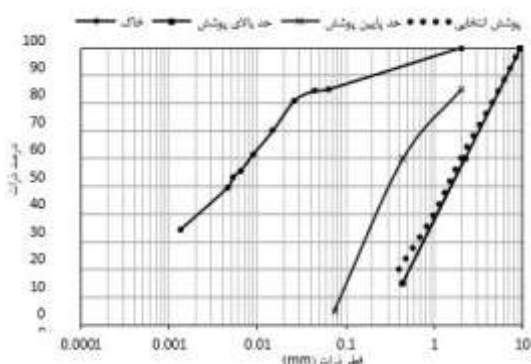
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان

۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته گروه آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان  
(\*- نویسنده مسئول: Email: Navabian@guilan.ac.ir)

اراضی شالی‌زاری و محدودیت زمانی برای نصب زهکش، استفاده از ترانشه با هدف افزایش فواصل زهکش را مورد توجه قرار می‌دهد. آنچه مسلم است ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی در کنار ارزیابی فنی می‌بایست انجام شود تا بتوان تصمیم‌گیری نهایی نمود. ترانشه‌های زهکش زیرزمینی، در خاک‌های با بافت سنگین و با نفوذپذیری پایین، مسیرهای مهمی برای حرکت آب از سطح زمین به سمت لوله زهکش می‌باشند (Salo et al., 2017). در واقع ترانشه‌ها با ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان، باعث افزایش حرکت سریع آب در خاک شده و بخش مهمی از تخلیه زهکش در خاک‌های سنگین را موجب می‌شود (Frey et al., 2016; Warsta et al., 2013). از آن‌جا که شکل و ابعاد ترانشه و هم‌چنین حجم و نوع مواد پوششی داخل ترانشه در بالا و اطراف لوله‌ی زهکش بر عملکرد فنی و کیفی زهکش اثر گذار است، مطالعه و تعیین نقش و سهم ترانشه بر عملکرد زهکش به منظور انتخاب مناسب‌ترین طراحی سامانه زهکشی در اراضی شالی‌زاری از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. انجام آزمایش‌های میدانی به منظور بررسی اثر ترانشه زیرزمینی بر عملکرد سامانه زهکشی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است، بنابراین روش‌های شبه‌ساز عددی، می‌تواند انتخاب مناسبی برای مطالعات دقیق‌تر و جزئی‌تر باشد. مدل‌های DRAINMOD، SWAP و HYDRUS به‌طور گسترده‌ای برای شبه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی و توانایی کنترل سطح ایستابی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Goel and Tiwari, 2013). مدل شبه‌ساز HYDRUS یک مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است (Simunek et al., 1999). مدل HYDRUS می‌تواند وضعیت جریان آب در خاک را در حالت‌های یک، دو و سه بعدی مورد بررسی قرار دهد. مطالعات انجام شده نشان‌دهنده‌ی توانایی قابل قبول مدل HYDRUS در شبه‌سازی حرکت آب می‌باشد.

فواگات و همکاران در پژوهش خود که شبه‌سازی حرکت آب در خاک در لایسمیترهای کاشته شده با درخت پرتقال بود، نشان دادند که توزیع رطوبت پیش‌بینی شده توسط مدل HYDRUS-2D/3D با مقدار خطای MAE و RMSE<sup>1</sup> بسیار پایین برای روزهای مورد شبه‌سازی به ترتیب ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۴ و ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۲۸ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، با داده‌های اندازه‌گیری شده در لایسمیتر به خوبی مطابقت دارد (Phogat et al., 2013). تان و همکاران جریان آب خاک تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری را با استفاده از مدل HYDRUS و به روش حل معکوس مورد بررسی قرار دادند (Tan et al., 2014). آن‌ها اظهار داشتند که مدل به شکل مطلوبی

اراضی شالی‌زاری و محدودیت زمانی برای نصب زهکش، استفاده از ترانشه با هدف افزایش فواصل زهکش را مورد توجه قرار می‌دهد. آنچه مسلم است ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی در کنار ارزیابی فنی می‌بایست انجام شود تا بتوان تصمیم‌گیری نهایی نمود. ترانشه‌های زهکش زیرزمینی، در خاک‌های با بافت سنگین و با نفوذپذیری پایین، مسیرهای مهمی برای حرکت آب از سطح زمین به سمت لوله زهکش می‌باشند (Salo et al., 2017). در واقع ترانشه‌ها با ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان، باعث افزایش حرکت سریع آب در خاک شده و بخش مهمی از تخلیه زهکش در خاک‌های سنگین را موجب می‌شود (Frey et al., 2016; Warsta et al., 2013). از آن‌جا که شکل و ابعاد ترانشه و هم‌چنین حجم و نوع مواد پوششی داخل ترانشه در بالا و اطراف لوله‌ی زهکش بر عملکرد فنی و کیفی زهکش اثر گذار است، مطالعه و تعیین نقش و سهم ترانشه بر عملکرد زهکش به منظور انتخاب مناسب‌ترین طراحی سامانه زهکشی در اراضی شالی‌زاری از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. انجام آزمایش‌های میدانی به منظور بررسی اثر ترانشه زیرزمینی بر عملکرد سامانه زهکشی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است، بنابراین روش‌های شبه‌ساز عددی، می‌تواند انتخاب مناسبی برای مطالعات دقیق‌تر و جزئی‌تر باشد. مدل‌های DRAINMOD، SWAP و HYDRUS به‌طور گسترده‌ای برای شبه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی و توانایی کنترل سطح ایستابی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Goel and Tiwari, 2013). مدل شبه‌ساز HYDRUS یک مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است (Simunek et al., 1999). مدل HYDRUS می‌تواند وضعیت جریان آب در خاک را در حالت‌های یک، دو و سه بعدی مورد بررسی قرار دهد. مطالعات انجام شده نشان‌دهنده‌ی توانایی قابل قبول مدل HYDRUS در شبه‌سازی حرکت آب می‌باشد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک و پوشش شن و ماسه مورد استفاده در آزمایش

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک -	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۰-۱۷	رس سیلتی	۴۰/۱۹	۴۹/۹۷	۹/۸۴	۱/۲۵
۱۷-۲۰	رس سیلتی	۴۰/۱۹	۴۹/۹۷	۹/۸۴	۱/۳
۲۰-۸۵	لوم سیلتی	۱۷/۴۵	۶۳/۱۰	۱۹/۴۵	۱/۳۵

## مواد و روش‌ها

### مدل فیزیکی زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار در اراضی شالی‌زاری

برای دستیابی به اهداف این پژوهش و جمع‌آوری اطلاعات برای واسنجی مدل HYDRUS، مدل فیزیکی زهکش زیرزمینی نصب شده در ترانشه‌ی دارای مواد معدنی (شن و ماسه) تحت شرایط اراضی شالی‌زاری در سال ۱۳۹۶ در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان ساخته شد. برای ساخت مدل فیزیکی، مخزنی از جنس آهن به طول سه و عرض ۰/۶ متر با ارتفاع یک متر تهیه شد. مخزن با خاک اراضی شالی‌زاری که ابتدا هوا خشک و سپس از الک با مش‌بندی پنج میلی‌متر عبور داده شده بود، تا ارتفاع ۸۵ سانتی‌متری پر شد. در فاصله‌ی ۱۸۰ سانتی‌متری از دیواره مخزن ترانشه‌ای با عرض ۲۰ و تا عمق ۷۵ سانتی‌متر حفر شد. زهکش لوله‌ای از جنس پلی‌اتیلن با قطر ۱۰ سانتی‌متر در عمق ۶۵ سانتی‌متری در مرکز ترانشه با شیب طولی حدود یک درصد در مقطع عرضی مخزن کارگذاری شد. سطح زیرین و کناره‌های لوله زهکش به ضخامت پنج و سطح بالای زهکش به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری (نزدیک به لایه سخت<sup>۱</sup>) با شن و ماسه پوشانده شد. همچنین به منظور ایجاد شرایطی مشابه با شرایط اراضی شالی‌زاری لایه‌سخت به‌طور مصنوعی با خاک عبور داده شده از الک با مش‌بندی دو میلی‌متری و در فاصله ۱۷ سانتی‌متری از سطح خاک با تراکم معادل جرم مخصوص ظاهری

۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و به ضخامت سه سانتی‌متری ایجاد شد. در ادامه با خاک عبوری از الک پنج میلی‌متری، مخزن پر و هم‌سطح با سایر نقاط شد. با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش و همچنین معیارهای روش ایلری<sup>۲</sup> (Vlotman et al., 2001)، دانه‌بندی شن و ماسه به‌منظور پر کردن ترانشه و پوشش دور زهکش مشخص شد. بر اساس منحنی دانه‌بندی پوشش، قطر و درصد فراوانی ذرات تعیین و از منابع قرضه محلی تهیه شد. شکل (۱) و جدول (۱) به‌ترتیب منحنی دانه‌بندی خاک-پوشش و برخی از خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهند. کنترل تغییرات سطح ایستابی با کارگذاری تعدادی پیزومتر از جنس لوله PVC با قطر دو سانتی‌متر در جهت عمود بر زهکش و در فواصل معین در تراز زهکش انجام شد. برای جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون پیزومترها، انتهای لوله‌ها با توری فلزی با مش یک میلیمتری پوشانده شد. جهت اندازه‌گیری و بررسی غلظت کل املاح محلول خاک<sup>۳</sup> هفت عدد عصاره‌گیر برای جمع‌آوری محلول خاک به‌صورت افقی در اعماق مختلف (بالای لایه سخت، زیر لایه سخت و در تراز زهکش) و فواصل مشخص از زهکش کارگذاری شد. شکل (۲) شمایی از مخزن و موقعیت زهکش، لایه‌سخت و همچنین موقعیت پیزومترها و عصاره‌گیرها را نشان می‌دهد. به‌منظور آماده‌سازی شرایط کشت برنج و ایجاد شرایط اشباع،

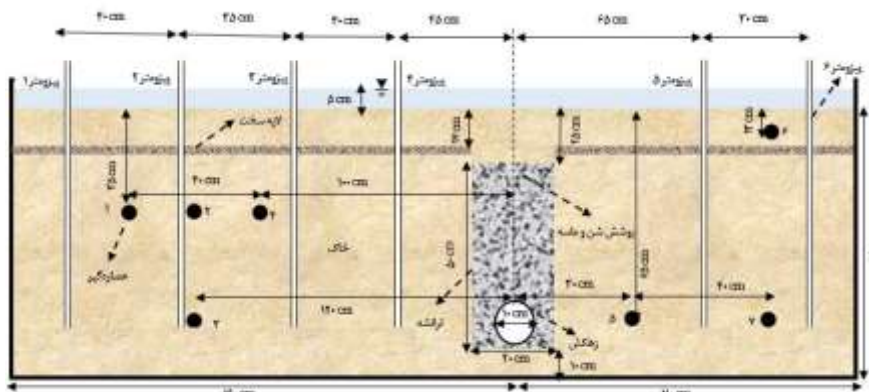
2- ILRI

3- Total Dissolved Solids

1- Hardpan

کیلوگرم در هکتار برای کود سوپر فسفات تریپل) در مراحل مختلف انجام شد. جهت تعیین خصوصیات شیمیایی خاک، عصاره اشباع خاک (Rice et al., 2017) تهیه و پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، غلظت نیترات، آمونیوم، سدیم، کلسیم و منیزیم اندازه‌گیری شد. جدول (۲) برخی از خصوصیات شیمیایی محلول خاک و آب مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد.

خاک به مدت پنج روز در حالت غرقاب نگهداری شد. بر اساس عملیات زراعی عرف منطقه، نشاء گیاه برنج از خزانه به مخزن خاک منتقل و با فواصل ۲۵ در ۲۲ سانتی‌متر در مخزن کشت شد. پس از استقرار گیاه برنج عملیات آبیاری به صورت غرقاب دائم با ارتفاع متوسط آب پنج سانتی‌متر بر روی خاک انجام شد. تثبیت ارتفاع آب سطحی با استفاده از مخزن آب و شناور انجام شد. کوددهی مطابق دستورالعمل منطقه (۹۰ کیلوگرم در هکتار برای کود اوره و ۱۰۰



شکل ۲- نمای مخزن و موقعیت زهکش، لایه سخت، پیژومترها و عصاره‌گیرها

جدول ۲- میانگین خصوصیات شیمیایی عصاره خاک و آب آبیاری مورد استفاده در آزمایش

EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	$\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{NO}_2^-$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{SO}_4^-$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{K}^+$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{NH}_4^+$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	SAR ( $\text{meq}/\text{l}$ ) <sup>0.5</sup>	
۳۹۰ (عصاره اشباع)	۷/۱۸	۰/۲۴۵	۰/۱۲	۹۱/۱۳	۴۸/۰۵	۱/۲۵	۲/۹۹	۱۲/۳۸	خاک
۴۳۰/۰۶	۷/۰۵	۰/۶	۰/۱۸	۷۸/۷۲	۳۷/۶۱	۱/۳۶	۱/۰۴	۱۲/۰۲	آب آبیاری

(1983).

$$\alpha = \frac{\ln h_{(t-1)} - \ln h_{(t)}}{\Delta t} \quad (1)$$

که  $h_t$  و  $h_{t-1}$  به ترتیب مقدار بار آبی در گام زمانی قبل و زمان قرائت (سانتی‌متر) و  $\Delta t$  فاصله زمانی میان قرائت بار آبی (روز) می‌باشند.

#### مدل شبیه‌سازی HYDRUS-2D/3D

نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D یکی از مدل‌هایی است که به منظور ارزیابی روند انتقال املاح، شوری، حرارت و آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای شبیه‌سازی دو و سه بعدی جریان آب، انتقال املاح و حرکت گرما در محیط متخلخل اشباع و غیراشباع به کار می‌رود. در مدل HYDRUS-2D/3D حرکت دو بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی شده است که با فرض خاک هم‌روند و یکنواخت به صورت رابطه (۲) مطرح می‌شود (Simunek et al., 1999):

آزمایش به مدت ۸۰ روز به طول انجامید. در این مدت به منظور بررسی حرکت آب و انتقال املاح در خاک تحت تأثیر زهکش زیرزمینی و ارزیابی مدل HYDRUS-2D، نمونه‌برداری از عصاره‌گیرها و هم‌چنین زه‌آب در زمان انجام عملیات زهکشی میان فصل (۴۳ روز پس از انتقال گیاه به مخزن شیر خروج زه‌آب باز و پس از پنج روز با مشاهده درز و ترک در خاک با بستن شیر خروجی لوله زهکش پایان داده شد) و پایان فصل (۶۵ روز پس از انتقال گیاه به مخزن) انجام شد. هدایت الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه EC سنج اندازه‌گیری شد (Rice et al., 2017). هم‌چنین حجم زه‌آب خروجی از زهکش نیز در زمان زهکشی به روش حجمی اندازه‌گیری شد. علاوه بر این به منظور تعیین بار آبی در نقاط مختلف خاک، قرائت پیژومترها در طول فصل رشد گیاه در فواصل زمانی دو روزه و در زمان زهکشی انجام شد.

برای ارزیابی عکس‌العمل زهکش در تخلیه آب پروفیل خاک، ضریب عکس‌العمل در طول مدت زمان زهکشی میان فصل و پایان فصل از رابطه (۱) محاسبه شد (Smedema and Rycroft, )

شکل (۳) نشان داده شده است. هم‌چنین در مدل HYDRUS-2D/3D جذب آب توسط گیاه براساس مدل فلدس و همکاران تعیین شد (Feddes *et al.*, 1978). مقادیر پارامترهای Feddes برای جذب ریشه گیاه برنج از پژوهش فوگات و همکاران (Phogat *et al.*, 2010) برداشت شد. هم‌چنین در این مطالعه مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد. سپس تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه برنج با استفاده از ضرایب گیاهی اعلام شده در نشریه فائو ۵۶ (Allen *et al.*, 1998) برای مراحل مختلف رشد برنج محاسبه شد. تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده به تبخیر و هم‌چنین تعرق قابل تفکیک می‌باشد (Belmans *et al.*, 1983). روابط (۷) و (۸) نحوه محاسبه تبخیر و تعرق را به صورت جداگانه نشان می‌دهند.

$$E_p = ET_c \times e^{-Kgr \times LAI} \quad (۷)$$

$$T_p = ET_c - E_p \quad (۸)$$

که در این روابط  $ET_c$ ،  $E_p$  و  $T_p$  به ترتیب تبخیر-تعرق پتانسیل، تبخیر پتانسیل و تعرق پتانسیل (سانتی‌متر بر روز)،  $LAI$  شاخص سطح برگ و  $Kgr$  ضریب توسعه تابش خورشیدی کل می‌باشند. محدوده شاخص سطح برگ حاصل از اندازه‌گیری طرح برگ در طول دوره رشد گیاه برنج  $۳/۴ - ۰/۷۴$  محاسبه و بکار گرفته شد. مقدار  $Kgr$  برای گیاه برنج توسط فوگات و همکاران (Phogat *et al.*, 2010) به میزان  $۰/۳$  اعلام شد.

بار آبی با توجه به اعداد قرائت شده توسط پیزومتر (۰ تا ۹۰ سانتی‌متر) به عنوان شرایط اولیه برای مدل تعریف شد. شرط مرزی بالادست با توجه به غرقاب بودن برنج، ارتفاع آب متغیر و مرزهای پایین دست و جانبی به دلیل عدم ورود و خروج آب بدون شدت جریان در نظر گرفته شدند. برای اعمال زهکشی میان فصل و پایان فصل بر روی زهکش شرط مرزی جریان متغیر تدریجی انتخاب شد که در هنگام باز بودن زهکش، اعداد فلاکس جریان خروجی از زهکش و در هنگام بسته بودن زهکش جریان صفر برای مدل تعریف شد. شرط مرزی برای حرکت املاح در سطح خاک و منافذ زهکش از نوع اول (First-Type) که به صورت بیان غلظت املاح است، انتخاب شد.

شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D/3D در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی انجام شد. در این پژوهش به دلیل تعدد پارامترهای مجهول که می‌بایست به روش حل معکوس در مدل تعیین می‌شدند (پارامترهای جداول ۳ و ۴)، واسنجی در دو بخش ۱- تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک براساس شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به سمت زهکش و ۲- تعیین پارامترهای انتقال املاح بر اساس شبیه‌سازی انتقال املاح در خاک به سمت زهکش صورت گرفت. در مرحله اعتبارسنجی نیز دقت مدل در فرآیند شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح به سمت زهکش بررسی شد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad (۲)$$

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی ( $L^3L^{-3}$ )،  $h$  پتانسیل فشاری آب موجود در خاک ( $L$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $x$  مختصات افقی ( $L$ )،  $z$  مختصات عمودی ( $L$ ) و  $K$  هدایت آبی ( $LT^{-1}$ ) می‌باشند. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل‌های ون‌گنوختن-معلم (Van Genuchten, 1980)، ون‌گنوختن اصلاح شده (Vogel and Cislserova, 1988)، معادله بروکس و کوری (Brooks and Corey, 1964)، توزیع لوگ نرمال کوسوگی (Kosugi, 1996) و تخلخل دوگانه (Durner, 1994) تعریف شده است که در این مطالعه پس از سعی و خطا از مدل ون‌گنوختن-معلم استفاده شد (روابط ۳ تا ۵).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (۳)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (۴)$$

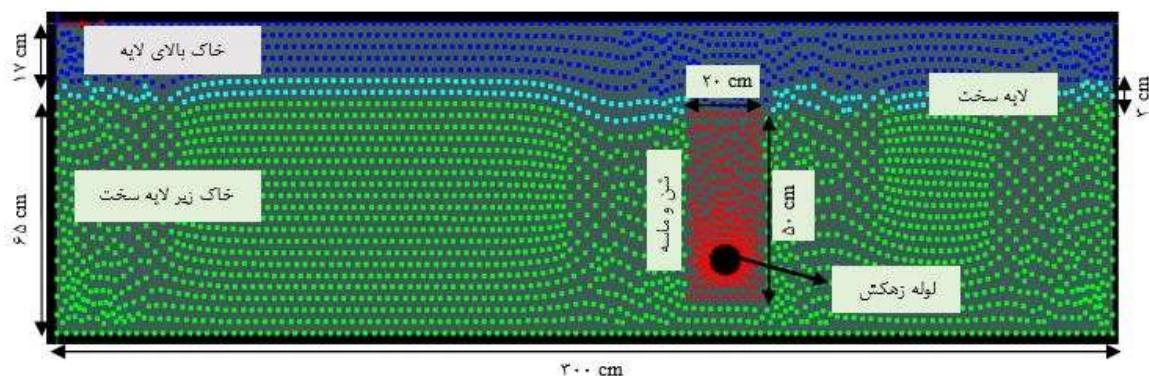
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (۵)$$

که در آن  $S_e$  اشباع نسبی،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب رطوبت اشباع و باقی‌مانده در پروفیل خاک بر حسب اعشار ( $L^3L^{-3}$ )،  $K_s$  هدایت آبی اشباع ( $LT^{-1}$ )،  $\alpha$  معکوس مقدار ورودی هوا ( $L^{-1}$ )،  $n$  شاخص توزیع اندازه نفوذ و  $l$  پارامتر هدایت‌پذیری منفذی می‌باشند. مقدار  $l$  به‌طور متوسط برای بسیاری از خاک‌ها حدود  $۰/۵$  برآورد شده است.

معادله عمومی انتقال املاح که در مدل از آن استفاده شده است در رابطه (۶) ارائه شده است (Šimůnek *et al.*, 2008). که در آن  $M$  جرم املاح در واحد حجم ( $ML^{-3}$ ) و  $J_{si}$  چگالی جریان املاح ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) و  $\phi$  ضریب نشان‌دهنده‌ی میزان تخلیه یا تغذیه متغیر ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) می‌باشند.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \frac{\partial J_{si}}{\partial xi} - \phi \quad (۶)$$

در اولین مرحله کار با مدل شبیه‌سازی، شکل هندسی محیط مورد مطالعه برای مدل تعریف و ترسیم شد که این عملیات در بخش Domain Geometry انجام می‌شود. پس از مشخص کردن ابعاد و ترسیم مدل هندسی، مش‌بندی انجام و پارامترهای ورودی مدل تعریف شد. در این مطالعه تعداد چهار ماده (Material) برای مدل تعریف شد (۱- لایه خاک بالای لایه سخت، ۲- لایه خاک سخت، ۳- لایه خاک زیر لایه سخت و ۴- مواد پر شده در ترانشه دور زهکش). تصویر دو بعدی مدل هندسی رسم شده در HYDRUS-2D



شکل ۳- نمای دو بعدی فیزیکی مخزن و زهکش و موقعیت لایه‌های تعریف‌شده در مدل HYDRUS-2D

پارامترهای دیر یافت از حداقل‌سازی اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل به دست می‌آید. در این بخش مقادیر بار آبی اندازه‌گیری شده از سه پیژومتر (پیژومترهای ۱، ۴ و ۶) انتخاب و به‌عنوان مقادیر مشاهداتی، تغییرات آن نسبت به زمان در مدل اعمال شد.

#### واسنجی مدل HYDRUS-2D در بخش انتقال املاح

به‌منظور واسنجی مدل در بخش انتقال املاح به دلیل شبه‌سازی کل جامدات محلول ( $TDS$ )، پارامترهای ضریب پخشیدگی مولکولی ( $DIFW$ ) و ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی ( $DISPL$  و  $DISPT$ ) به‌عنوان ضرایب واسنجی به روش حل معکوس تعیین شدند. مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهایی که به روش حل معکوس برای چهار لایه تعیین شدند، در جدول (۴) آمده‌است. از آن‌جا که آستانه تحمل شوری گیاه برنج برای عملکرد ۱۰۰ درصد سه دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد (Allen et al., 1998)، مقدار توانایی ریشه در جذب املاح ( $cRoot$ )،  $0.192$  میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. مقادیر کل جامدات محلول اندازه‌گیری شده در زه‌آب و عصاره‌گیر ۵ انتخاب و به‌عنوان مقادیر مشاهداتی در بخش واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

#### اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D

بعد از انجام واسنجی و معرفی فرآیند حاکم در مدل فیزیکی برای مدل HYDRUS، اعتبار دقت شبه‌سازی مدل با انجام مرحله اعتبارسنجی تعیین می‌شود. اعتبارسنجی مدل در بخش حرکت آب و املاح به‌ترتیب با استفاده از مقادیر بار آبی اندازه‌گیری شده توسط سه پیژومتر متفاوت با پیژومترهای به‌کار گرفته شده در بخش واسنجی (پیژومترهای ۲، ۳ و ۵) و مقادیر کل جامدات محلول اندازه‌گیری شده از عصاره‌گیر ۶ و ۷ انجام شد.

به‌منظور تعیین حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و انتخاب پارامترهای مهم در حل معکوس در هر دو بخش حرکت آب و انتقال املاح، تحلیل حساسیت براساس رابطه (۹) انجام شد (Simunek and Van Genuchten, 1996).

$$SC = \frac{y(b+\Delta b) - y(b)}{\frac{y(b)}{\Delta b}} \quad (9)$$

که در آن تابع  $y$  خروجی مدل (در این مطالعه بار آبی و غلظت کل جامدات محلول)،  $b$  پارامتر ورودی و  $\Delta b$  برابر با  $0.1b$  (تغییرات ۱۰ درصدی در پارامترهای ورودی) می‌باشند.

#### واسنجی مدل HYDRUS در بخش حرکت آب

از آنجا که در مدل هایدروس محدودیت تعداد پارامترهای قابل برآورد به روش حل معکوس وجود دارد، مدل در دو مرحله شبه‌سازی حرکت آب و شبه‌سازی انتقال املاح برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک واسنجی شد. مدل برای برخی پارامترهای هیدرولیکی رابطه ون‌گنوختن (با دو سانتی‌متر هوای ورودی) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده تراز بار آبی برای مدت زمان ۶۹ روز (تا پایان زهکشی پایان فصل) واسنجی شد. پارامترهای مدل هیدرولیکی ون‌گنوختن-معلم از ترکیب نرم‌افزار Rosetta موجود در مدل HYDRUS و حل معکوس به‌دست آمد. بنابراین پارامترهای  $K_s$  و  $\theta_s$  در هر چهار لایه و هم‌چنین پارامتر  $\theta_r$  در لایه سه و چهار و پارامتر  $n$  در لایه چهارم به‌دلیل حساسیت بیش‌تر (با توجه به نتایج جدول ۷) به‌روش حل معکوس تعیین شدند. جدول (۳) مقادیر اولیه و محدوده تغییرات پارامترهایی که در حل معکوس استفاده شدند را نشان می‌دهد. در انتخاب مقادیر اولیه و محدوده تغییرات پارامترها از نتایج Rosetta و مقادیر اندازه‌گیری شده درصد ذرات خاک و جرم مخصوص ظاهری (جدول ۱) استفاده شد. در روش حل معکوس

جدول ۳- مقادیر اولیه و محدوده ضرایب واسنجی انتخاب شده در حل معکوس لایه‌های اول تا چهارم

شماره لایه	پارامتر	هدایت آبی اشباع ( $K_s$ ) (cm/day)	رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	پارامتر منحنی شکل معادله ون گنوختن ( $n$ ) (-)
لایه اول	مقدار اولیه	۱۰	۰/۵۱	-	-
	مقدار حداقل	۴	۰/۴۸	-	-
	مقدار حداکثر	۱۵	۰/۶	-	-
لایه دوم	مقدار اولیه	۱۲	۰/۴۹	-	-
	مقدار حداقل	۹	۰/۴۵	-	-
	مقدار حداکثر	۱۵	۰/۵۵	-	-
لایه سوم	مقدار اولیه	۱۸	۰/۴	۰/۰۶۵۸	-
	مقدار حداقل	۷	۰/۳۵	۰/۰۵	-
	مقدار حداکثر	۲۰	۰/۴۵	۰/۰۶۸	-
لایه چهارم	مقدار اولیه	۳۷۷/۱	۰/۲۱	۰/۰۴۰۳	۲/۷۵
	مقدار حداقل	۳۰۰	۰/۱۵	۰/۰۴	۱
	مقدار حداکثر	۸۰۰	۰/۳	۰/۰۵۵	۵

جدول ۴- مقادیر اولیه و محدوده پارامترهای انتقال املاح در حل معکوس برای لایه‌های اول تا چهارم

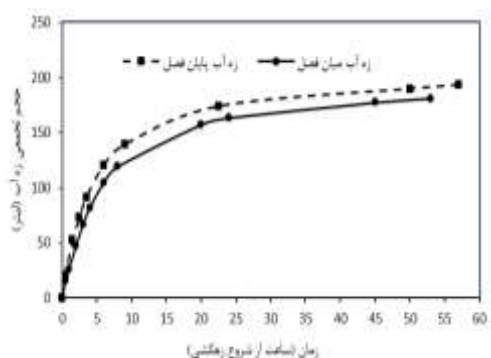
شماره لایه	پارامتر	انتشارپذیری طولی (DISPL) (cm)	انتشارپذیری عرضی (DISPT) (cm)	پخشیدگی مولکولی در آب (DIFW) (cm <sup>2</sup> /day)	جرم مخصوص ظاهری ( $\rho_b$ ) (mg/cm <sup>3</sup> )
لایه اول	مقدار اولیه	۹/۲۲	۸/۵۴	۰/۹۹	-
	مقدار حداقل	۰	۰	۰/۱	-
	مقدار حداکثر	۵۰	۵۰	۵	-
لایه دوم	مقدار اولیه	۲۶/۴۲	۵/۴۳	۱/۰۴	-
	مقدار حداقل	۰	۰	۰/۱	-
	مقدار حداکثر	۵۰	۵۰	۵	-
لایه سوم	مقدار اولیه	۲۵/۲۰	۷۲/۳۶	۱	-
	مقدار حداقل	۰	۰	۰/۱	-
	مقدار حداکثر	۱۰۰	۱۰۰	۵	-
لایه چهارم	مقدار اولیه	۱/۴۶	۴/۰۵	-	۲۳۰۰
	مقدار حداقل	۰	۰	-	۲۰۰۰
	مقدار حداکثر	۵۰	۵۰	-	۳۰۰۰

پراکندگی بین داده‌ها می‌باشد. محدوده این شاخص بین صفر و یک است که مقدار یک بیان‌گر بهترین برازش و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبه‌سازی می‌باشد (Willmott, 1982). MAE میانگین مطلق خطا را نشان می‌دهد و هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است.

## نتایج و بحث

### نتایج مدل فیزیکی

تغییرات حجم تجمعی زه‌آب برای زهکشی میان و پایان فصل در شکل (۴) نشان داده شده‌است. نتایج، افزایش هفت درصدی حجم تخلیه زه‌آب در پایان فصل را نسبت به میان فصل نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد اثر زهکشی میان فصل بر ساختمان خاک و ایجاد درز و ترک در خاک، عامل بهبود وضعیت زهکشی پایان فصل باشد. در چنین شرایطی می‌توان انتظار داشت در پایان فصل در زمان وقوع بارش‌های فصلی که عامل آسیب به گیاه برنج و محدودیت برداشت مکانیزه است، زهکشی موثرتر و سریع‌تر بتواند آب را تخلیه نماید.



شکل ۴- حجم تجمعی زه‌آب در میان و پایان فصل

نوسان بار آبی در فاصله ۴۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی‌متری از زهکش در زمان انجام زهکشی میان و پایان فصل در ساعات مختلف در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌است. در زهکشی میان فصل ۴۸ ساعت پس از شروع زهکشی برای دورترین و نزدیک‌ترین پیژومتر به زهکش به ترتیب کاهش ۹۴ و ۹۶ درصدی در تراز بار آبی از زمان شروع زهکشی مشاهده شد. این میزان کاهش تراز بار آبی (۹۳ و ۹۵ درصد به ترتیب برای پیژومتر دور و نزدیک) در زهکشی پایان فصل در مدت زمان کم‌تری و حدود ۳۰ ساعت پس از شروع زهکشی مشاهده شد. نتایج حاکی از توانایی زهکشی زیرزمینی با ترانشه‌شن و ماسه در تخلیه کامل و مناسب آب خاک می‌باشد. مومن‌نژاد (۱۳۹۶) تغییرات سطح ایستابی در اراضی شالی‌زاری با بافت خاک لوم سیلتی دارای زهکش زیرزمینی به قطر ۱۰ سانتی‌متر در

### آماره‌های ارزیابی مدل HYDRUS-2D

برای ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D، از تطبیق مقادیر مشاهده‌ای بار آبی و مقدار غلظت کل املاح با مقادیر تخمینی مدل، پارامترهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، ریشه میانگین مجذور خطای نرمال‌شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (D-index) و میانگین خطای مطلق (MAE) به دست آمدند. روابط (۱۰) تا (۱۴) نحوه محاسبه هر کدام از آماره‌ها را نشان می‌دهند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (12)$$

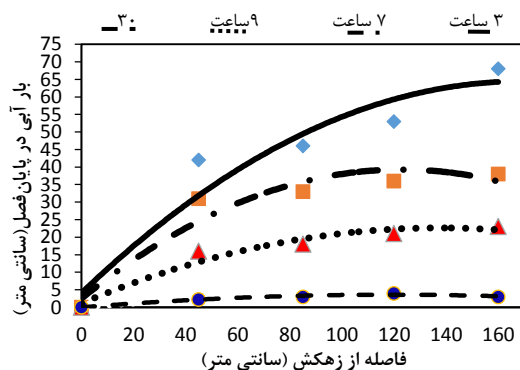
$$D-index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (14)$$

که در این روابط  $P_i$  مقادیر تخمین زده‌شده،  $O_i$  مقادیر مشاهده‌ای،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای و  $n$  تعداد کل مشاهدات می‌باشد. آماره  $R^2$  نسبت پراکندگی را بین مقادیر تخمین زده‌شده و مشاهداتی نشان می‌دهد. به منظور بیان میزان تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و شبه‌سازی از RMSE استفاده می‌شود که هرچه این شاخص کم‌تر باشد بیان‌گر شبه‌سازی بهتر مدل است (Savage, 1993). جامینسون و همکاران روشی را برای برآورد خطا پیشنهاد دادند که در آن میانگین مربعات خطا به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات است که با nRMSE نمایش داده می‌شود. زمانی که این پارامتر در محدوده کم‌تر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده کارایی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان‌گر کارایی بسیار خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بیان‌کننده کارایی متوسط و در بیش‌تر از ۳۰ درصد نیز نشان‌دهنده ضعیف بودن توانایی مدل در شبه‌سازی است (Jaemison et al., 1991). شاخص آماری توافق ویلموت (D-index) براساس اندازه

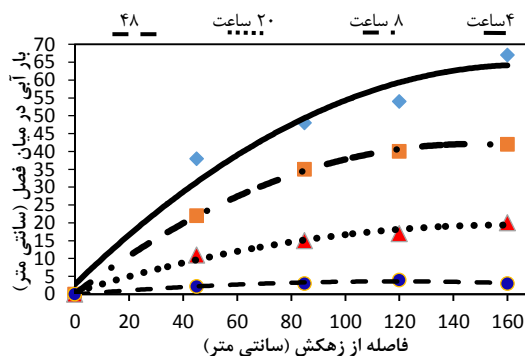


پیزومتر طی ۲۶ ساعت به ترتیب ۵۸ و ۵۷ درصد کاهش یافت. مقایسه نتایج با پژوهش حاضر تأثیر نوع پوشش بر سرعت تخلیه زه آب و کنترل سطح ایستابی را نشان می دهد.



شکل ۶- روند تغییرات بار آبی در زهکشی پایان فصل در فاصله ۴۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی متری از زهکش

عمق ۷۰ سانتی متر با پوشش ژئوتکستایل (450 PP) را طی دوره زهکشی پایان فصل مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که سطح ایستابی در دورترین (۵۶ سانتی متر) و نزدیک ترین (هفت سانتی متر)



شکل ۵- روند تغییرات بار آبی در زهکشی میان فصل در فاصله ۴۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی متری از زهکش

و پنج متر نزدیک به یک به دست آمد. مقایسه نتایج مطالعات با پژوهش حاضر تأثیر رطوبت موجود در خاک را بر روی ضریب عکس العمل نشان می دهد به طوری که در زمان وجود آب بیشتر در خاک به دلیل ذخیره سازی کمتر آب در خاک، آب مازاد سریعتر به سمت زهکش حرکت می کند.

### نتایج مدل شبیه ساز HYDRUS2D/3D

#### تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و املاح در جدول (۵) نشان داده شده است. نسبت ۱۵۱ و ۲۶ برابری ضرایب حساسیت پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ضریب انتشار طولی در مقایسه با میانگین ضرایب حساسیت سایر پارامترهای ورودی مدل (جدول ۵) نشان داد که این دو پارامتر بیشترین تأثیر را بر حرکت آب و املاح داشتند. بنابراین انتخاب این دو پارامتر به عنوان ضریب واسنجی در حل معکوس اهمیت دارد.

#### ضریب عکس العمل

عکس العمل زهکش در تخلیه حجم آب پروفیل خاک را با ضریب عکس العمل نشان می دهند. مقادیر ضریب عکس العمل به طور میانگین برای زهکشی میان و پایان فصل در طول دوره زهکشی به ترتیب ۱/۰۳ و ۱/۹۴ بر روز به دست آمد. بیش تر بودن عکس العمل زهکش در تخلیه آب در زهکشی پایان فصل نسبت به میان فصل می تواند ناشی از اثرگذاری زهکشی میان فصل بر تغییر ساختمان خاک و ایجاد مسیرهای بزرگ تر در جریان آب به سمت زهکش و تخلیه آن باشد. مودنی و همکاران (۱۳۹۵)، پژوهشی را به منظور بررسی عملکرد زهکش زیرزمینی آزاد با پوشش ژئوتکستایل (450 PP) در کشت دوم مدل فیزیکی اراضی شالی زاری (گیاه تریپتیکاله) در بافت خاک لوم سیلتی و عمق و فاصله زهکش ۰/۶ و ۰/۵ متر انجام دادند. آن ها ضریب عکس العمل را برای باران های دو، سه و شش روزه به ترتیب ۰/۰۹۴، ۰/۰۵۴ و ۰/۰۳۹ گزارش نمودند. هم چنین مومن نژاد (۱۳۹۶) عملکرد زهکش زیرزمینی با پوشش ژئوتکستایل (450 PP) را برای اراضی شالی زاری در زمان کشت برنج (حالت غرقاب) مورد بررسی قرار داد. مقدار ضریب عکس العمل برای زهکش با عمق و فاصله ۰/۷

جدول ۵- ضریب حساسیت (SC) شاخص های هیدرولیکی و املاح خاک در مدل HYDRUS-2D

ضریب انتشار پذیری عرضی (DISPT) (cm)	ضریب انتشار پذیری طولی (DISPL) (cm)	پارامتر منحنی شکل معادله ون گنوختن (n) (-)	رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) ( $cm^3/cm^3$ )	رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) ( $cm^3/cm^3$ )	هدایت آبی اشباع ( $K_s$ ) (cm/day)
۰/۰۰۲	۰/۴۷	۰/۰۶	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۰۹	۲/۶۹

### واسنجی حرکت آب در مدل HYDRUS

پارامترهای ورودی و واسنجی، مقادیر بهینه پارامترهای مشخص شده در حل معکوس به دست آمد. جدول (۶) مقادیر بهینه این پارامترها را برای چهار لایه مورد بررسی نشان می‌دهد.

واسنجی مدل برای پارامترهای هیدرولیکی با اعداد قرائت شده بار آبی پیژومترهای شماره یک، چهار و شش در طول فصل کشت انجام شد. بعد از معرفی اطلاعات مورد نیاز مدل و آنالیز حساسیت

جدول ۶- نتایج بهینه‌یابی پارامترهای هیدرولیکی خاک- لایه اول تا چهارم

شماره لایه	هدایت آبی اشباع ( $K_s$ ) (cm/day)	رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	پارامتر منحنی شکل معادله ون گنوختن ( $n$ ) (-)
لایه اول	۱۱/۷۶۱	۰/۴۸	-	-
لایه دوم	۹	۰/۴۵	-	-
لایه سوم	۲۰	۰/۳۵	۰/۰۶۸	-
لایه چهارم	۳۷۰/۲۲	۰/۳	۰/۰۴	۲/۷۲۸

تخمینی نرم افزار Rosseta نیز در لایه چهارم برای پارامترهای  $K_s$ ،  $\theta_s$ ،  $\theta_r$  و  $n$  به ترتیب ۳۱۰ سانتی متر بر روز، ۰/۲۱۹۱، ۰/۰۵۲ و ۴/۵۷ بود.

مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در بخش حرکت آب در جدول (۷) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که واسنجی مدل در این مرحله با دقت بالایی انجام شده است. با توجه به ضریب تبیین بالا، شاخص توافق (D-index) نزدیک به یک، میانگین خطای نرمال شده کم‌تر از ده درصد، روند شبیه‌سازی پدیده مورد بررسی توسط مدل قابل قبول می‌باشد.

معماری (۱۳۹۷) در پژوهش خود برای خاک اراضی شالی‌زاری مقادیر  $K_s$  را برای لایه خاک با بافت رسی سیلتی و لایه سخت به ترتیب ۹/۶۸ و ۸/۲۷ سانتی متر بر روز و  $\theta_s$  را به ترتیب ۰/۴۸۰۵ و ۰/۴۰۷ به دست آورد. هم‌چنین درزی و همکاران برای اراضی شالی‌زاری (رسی سیلتی)  $K_s$  و  $\theta_s$  را به ترتیب ۸/۱ سانتی متر بر روز و ۰/۴ گزارش کرد (Darzi-Naftchali et al., 2018). نتایج این مطالعات با نتایج لایه‌های اول و دوم این مطالعه مطابقت دارد. یائو و همکاران برای خاک اراضی شالی‌زاری (لوم سیلتی) مقادیر  $K_s$ ،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  را به ترتیب ۲۳/۴۲ سانتی متر بر روز، ۰/۳۹۳ و ۰/۰۵۷ گزارش کرد که هم‌راستا با نتایج حاضر می‌باشد (Yao et al., 2014).

جدول ۷- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل واسنجی در بخش حرکت آب

R <sup>2</sup> (-)	RMSE (cm)	nRMSE (%)	MAE (cm)	D-index (-)
۰/۹۸۷	۲/۵	۴/۰۱	۱/۸۱	۰/۹۹۶

پارامتر شوری عصاره‌گیر ۵ و زه‌آب انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای مجهول از طریق حل معکوس تعیین شد. جدول (۸) مقادیر بهینه این پارامترها برای لایه‌های مختلف را نشان می‌دهند. در لایه اول که جریان افقی به سمت ترانشه و عمودی به سمت لایه پایین وجود دارد، ضریب انتشارپذیری عرضی نزدیک به ضریب انتشارپذیری طولی به دست آمد. اما در لایه سوم و ترانشه اطراف زهکش به دلیل غلبه جریان افقی بر عمودی، ضریب انتشارپذیری عرضی بیش‌تر بود. در لایه سخت به نظر می‌رسد تفاوت اندازه خلل و فرج در مرز آن با لایه اول و سوم عامل بیش‌تر شدن ضریب انتشارپذیری طولی باشد. نتایج نشان داد انتشارپذیری عامل مهم‌تری نسبت به پخشیدگی در انتقال املاح در زهکش ترانشه‌دار شن و ماسه در آزمایش مورد

روند شبیه‌سازی تغییرات بار آبی در مرحله واسنجی توسط پیژومترهای انتخابی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشهود است تا قبل از انجام زهکشی میان و پایان فصل، سطح آب تغییرات چندانی نداشته است. اما از زمان شروع زهکشی میان و پایان فصل (روز ۴۳ و ۶۷) افت بار آبی شروع شد. در میان فصل پس از پایان زمان زهکشی و بستن زهکش با ایجاد شرایط غرقاب مجدد، بار آبی روند افزایشی داشت. شکل بیان‌گر درک تخلیه زهکشی و کاهش بار آبی توسط مدل می‌باشد.

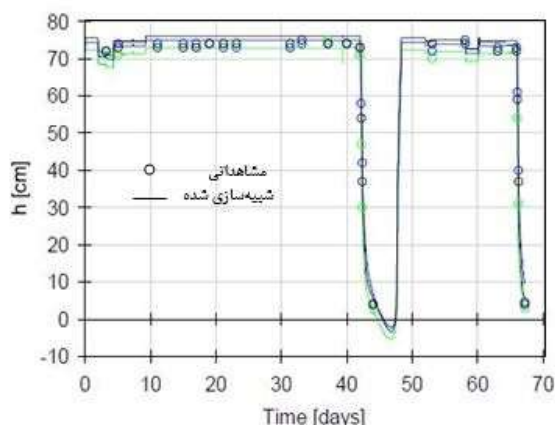
### واسنجی انتقال املاح در مدل HYDRUS

واسنجی مدل در مرحله دوم با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده

بررسی می‌باشد.

مدل HYDRUS-2D در مرحله واسنجی انتقال املاح، به دلیل ضریب تبیین بالا و MAE و RMSE مناسب و nRMSE کم‌تر از ده درصد می‌توان اعتماد نمود.

دقت نتایج واسنجی مدل براساس پارامترهای آماری در جدول (۹) نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که به فرآیند شبیه‌سازی



شکل ۷- روند شبیه‌سازی تغییرات بار آبی در طول دوره آزمایش در مرحله واسنجی (پیزومترهای ۱، ۴ و ۶)

جدول ۸- نتایج بهینه‌یابی پارامترهای انتقال املاح- لایه اول تا چهارم

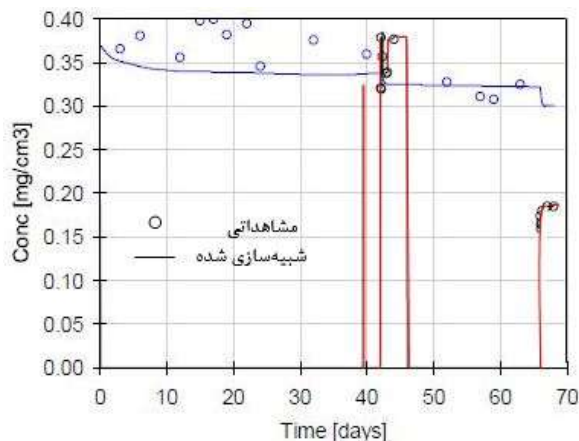
شماره لایه	ضریب انتشارپذیری طولی (DISPL) (cm)	ضریب انتشارپذیری عرضی (DISPT) (cm)	ضریب پخشیدگی مولکولی در آب (DIFW) (cm <sup>2</sup> /day)	جرم مخصوص ظاهری (ρ <sub>b</sub> ) (g/cm <sup>3</sup> )
لایه اول	۹/۲۴۰۹	۸/۵۴۳۸	۰/۸۲۵۴۲	-
لایه دوم	۳۸/۲۱۲	۷/۷۹۴	۱/۰۴	-
لایه سوم	۲۲/۵۶۳	۷۷/۶۹۸	۱	-
لایه چهارم	۱/۴۶۳	۴/۰۵۲۳	-	۲/۳

جدول ۹- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل واسنجی در بخش انتقال املاح

R <sup>2</sup>	RMSE (mg/cm <sup>3</sup> )	nRMSE (%)	MAE (mg/cm <sup>3</sup> )	D-indx (-)
۰/۹۲۵	۰/۰۲۵	۸/۱۹	۰/۰۱۵	۰/۹۷۳

شبیه‌سازی شد (خط قرمز). همان‌طور که در شکل نشان داده شده‌است با انجام زهکشی در روز ۴۳ و ۶۷، غلظت نمک خروجی افزایش یافته و سپس روند کاهشی در پیش گرفت و با بستن زهکش در میان فصل به صفر رسید. لازم به ذکر است که در روز ۳۹ به دلیل شکسته شدن شیر تخلیه زهکش، مقداری از زه‌آب تخلیه شد. در شکل تغییرات مربوط به غلظت نمک خروجی در اثر شکسته شدن شیر نشان داده شده‌است.

شکل (۸) روند شبیه‌سازی غلظت نمک خروجی از زهکش در زمان انجام زهکشی و هم‌چنین نمک محلول خاک (عصاره‌گیر ۵) در طول فصل رشد را نشان می‌دهد. غلظت نمک محلول خاک در عمق ۶۵ سانتی‌متری تا قبل از انجام زهکشی به دلیل اعمال کود در دو مرحله و شستشوی املاح از روند ثابتی برخوردار نبود. با انجام زهکشی میان فصل، غلظت نمک محلول خاک کاهش یافته و تا پایان آزمایش با تغییرات چندانی همراه نبود. غلظت نمک خروجی زه‌آب در مدت زمان انجام زهکشی میان و پایان فصل نیز توسط مدل



شکل ۸- روند شبه‌سازی غلظت املاح در طول دوره آزمایش و زمان انجام زهکشی در مرحله واسنجی (زه‌آب و عصاره گیر ۵)

زهکشی میان فصل بر بهبود خلل و فرج خاک و افزایش سرعت تخلیه زهکش در پایان فصل می‌باشد.

#### اعتبارسنجی انتقال املاح در مدل HYDRUS

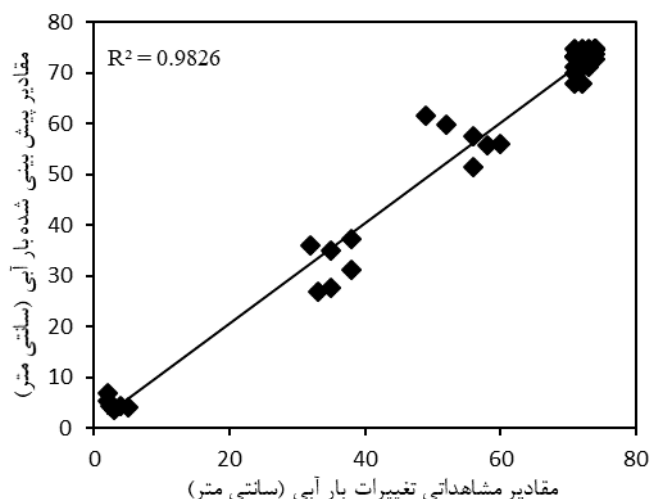
به‌منظور ارزیابی مدل در بخش انتقال املاح از مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت کل جامدات محلول عصاره‌گیرهای شش و هفت در طول مدت آزمایش استفاده شد. شاخص‌های آماری بررسی دقت مدل در جدول (۱۱) آورده شده‌است. شاخص‌های ارزیابی نشان داد که اعتبارسنجی مدل در بخش املاح با ضریب تبیین و شاخص توافق نسبتاً خوب، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای کم و هم‌چنین میانگین مربعات نرمال شده بسیار خوب، قابل قبول می‌باشد. با توجه به نتایج پارامترهای ارزیابی، اعتبارسنجی مدل از درجه مقبولیت مناسبی برخوردار و نتایج آن قابل قبول است. روند شبه‌سازی غلظت نمک محلول خاک برای عصاره‌گیر شش و هفت در طول دوره آزمایش در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل مشخص است بعد از اعمال زهکشی میان فصل، غلظت نمک محلول خاک برای عصاره‌گیر شش و هفت نسبت به زمان قبل از انجام زهکشی میان فصل با کاهش همراه بود. مدل دامنه تغییرات نمک محلول عصاره‌گیر هفت را به دلیل نزدیک‌تر بودن به زهکش و فاصله گرفتن از شرایط مرزی بالادست و عدم تأثیرپذیری از خصوصیات لایه‌سخت بهتر پیش‌بینی کرد. افزایش ناگهانی غلظت نمک محلول عصاره‌گیر شش که در بالای لایه سخت قرار دارد مربوط به زمان اعمال کود می‌باشد.

#### اعتبارسنجی حرکت آب در مدل HYDRUS

اعتبارسنجی مدل در بخش حرکت آب با مقادیر بار آبی قرائت شده توسط پیزومترهای دو، سه و پنج انجام شد. دقت مدل در این مرحله نیز با پارامترهای آماری سنجیده شد. در جدول (۱۰) نتایج آماری ارزیابی مدل نشان داده شده‌است. نتایج شاخص‌های ارزیابی در این بخش نشان داد که عملکرد مدل با توجه به ضریب تبیین بالا، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای نسبتاً کم و هم‌چنین میانگین مربعات خطای نرمال شده عالی، براساس طبقه‌بندی جیمیسون و همکاران (Jaemison et al., 1991) مورد قبول می‌باشد. شکل (۹) مقایسه بین مقادیر شبه‌سازی شده و مشاهده‌ای بار آبی در طول دوره آزمایش را برای پیزومترهای دو، سه و پنج نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است زمانی که زهکش بسته و یا نزدیک به زمان پایان زهکشی می‌باشد به دلیل دقت بیشتر در قرائت بار آبی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبه‌سازی شده تطابق خوبی وجود دارد. اما در طول دوره زهکشی به دلیل شدت تخلیه و تفاوت در میزان افت بار آبی پیزومترهای مختلف، پراکندگی بین داده‌های شبه‌سازی شده و مشاهده‌ای بیشتر است. هم‌چنین به‌منظور مقایسه مدل شبه‌سازی و مدل فیزیکی، ضریب عکس‌العمل زهکش در مدل اعتبارسنجی شده محاسبه شد. مقادیر ضریب عکس‌العمل در زهکشی میان و پایان فصل به ترتیب ۱/۲۸ و ۱/۴۷ بر روز به دست آمد. مقایسه نتایج ضریب عکس‌العمل زهکشی مدل شبه‌سازی با مدل فیزیکی نشان می‌دهد که در مدل شبه‌سازی همانند مدل فیزیکی، ضریب عکس‌العمل زهکشی پایان فصل بیشتر از میان فصل به دست آمد. این مسئله نشان‌گر درک مناسب مدل از تأثیر

جدول ۱۰- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل اعتبارسنجی در بخش حرکت آب

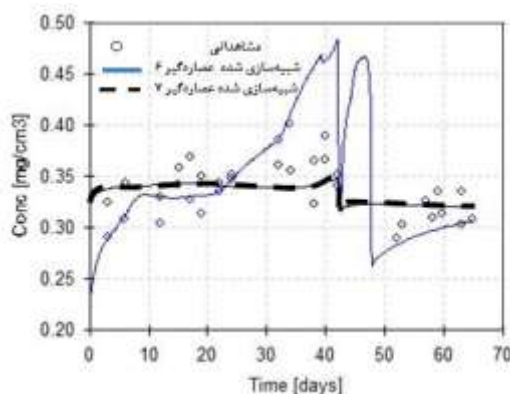
R <sup>2</sup>	RMSE	nRMSE	MAE	D-indx
(-)	(cm)	(%)	(cm)	(-)
۰/۹۸۲۶	۲/۸	۴/۵۵	۱/۷۶	۰/۹۹۵۶



شکل ۹- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی بار آبی پیژومترهای دو، سه و پنج در طول مدت آزمایش

جدول ۱۱- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل اعتبارسنجی در بخش انتقال املاح

R <sup>2</sup> (-)	RMSE (mg/cm <sup>3</sup> )	nRMSE (%)	MAE (mg/cm <sup>3</sup> )	D-indx (-)
۰/۴۱۹	۰/۰۳۵	۱۰/۵۶	۰/۰۲	۰/۷۹



شکل ۱۰- روند شبیه‌سازی غلظت املاح عصاره‌گیرهای شش و هفت در طول دوره آزمایش در مرحله اعتبارسنجی

## نتیجه‌گیری

میان فصل و پایان فصل توسط مدل شبیه‌ساز را نشان داد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی  $R^2$ ، RMSE و nRMSE در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای حرکت آب به ترتیب ۰/۹۸ - ۰/۹۸۲، ۲/۸ - ۲/۵ سانتی‌متر و در بخش انتقال املاح به ترتیب ۰/۴۱ - ۰/۹۲، ۰/۰۳۵ - ۰/۰۲۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۰/۵۶ - ۸/۱۹ درصد به دست آمد. این نتایج بر توانایی قابل قبول مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح برای زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار با پوشش شن و ماسه دلالت دارد. گسترش این مطالعه در سطح مزرعه و استفاده از مدل HYDRUS در شبیه‌سازی رفتار زهکش در ترانشه شن و ماسه می‌تواند علاوه بر

این پژوهش به منظور بررسی عملکرد زهکش زیرزمینی نصب شده در ترانشه شن و ماسه در بخش‌های دبی خروجی، کنترل سطح ایستابی و ضریب عکس‌العمل انجام شد. همچنین رفتار زهکش با استفاده از مدل HYDRUS-2D بررسی شده و توانایی مدل با مقایسه نتایج آن با مدل فیزیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج دبی خروجی، تغییرات بار آبی و ضریب عکس‌العمل مدل فیزیکی نشان می‌دهد که زهکش در پایان فصل سرعت تخلیه بیشتری نسبت به میان فصل داشت و مقایسه ضریب عکس‌العمل محاسبه شده توسط مدل شبیه‌سازی با مدل فیزیکی، توانایی درک تفاوت میان زهکشی

- Resources Research 30(2): 211-223.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen 9-30.
- Frey, S.K., Hwang, H.T., Park, Y.J., Hussain, S.I., Gottschall, N., Edwards, M., and Lapen, D.R. 2016. Dual permeability modeling of tile drain management influences on hydrologic and nutrient transport characteristics in macro porous soil. Journal of Hydrology 535: 392-406.
- Goel, A., and Tiwari, P. 2013. Review of computer based software tools for salinity management in agricultural lands. Journal of Indian Water Resources Society 33(4): 24-32.,
- Jamieson, P.D., Poeter, J.R., and Wilson D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research 27: 337-350.
- Kosugi, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resource Research. 32 (9): 2697-2703.
- Phogat, V., Skewes, M., Cox, J., Alam, J., Grigson, G., and Simunek, J. 2013. Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree. Agricultural Water Management 127: 74-84.
- Phogat, V., Yadav, A.K., Malik, R.S., Kumar, S., and Cox, J. 2010. Simulation of salt and water movement and estimation of water productivity of rice crop irrigated with saline water. Paddy Water Environ. 8(4): 333-346.
- Rice, E.W., Baird, R.B., and Eaton, A.D. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, American Water Works Association. Water Environment Federation. 277 pages.
- Ritzema, H.P., Nijland, H.J., and Croon, F.W. 2006. Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation. Agricultural Water Management 86(1-2): 60-71.
- Salo, H., Warsta, L., Turunen, M., Nurminen, J., Myllys, M., Paasonen-Kivekas, M., Alakukku, L., and Koivusalo, H. 2017. Simulating 3-D water flow in subsurface drain trenches and surrounding soils in a clayey field. Soil and Tillage Research 168: 20-32.
- Savage, M.J. 1993. Statistical aspects of model validation, Presented at a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa.
- Smedema, L.K., and Rycroft, D.W. 1983. Land Drainage: Planning and Design of Agricultural Drainage Systems. Batsford, London, 376 pp.
- Simunek, J., and Van Genuchten, M.Th. 1996. ارزیابی کارایی مدل، زمینه‌ساز ایجاد شرایط طراحی و مدیریت بهینه زهکشی زیرزمینی در اراضی، به‌خصوص اراضی شالی‌زاری و یا اراضی دارای خاک با بافت سنگین باشد.
- منابع**
- معماری، ن. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هایدرووی دو بعدی در شبه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی در کشت باقلا به عنوان کشت دوم اراضی شالی‌زاری. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان.
- مودنی، س.م.ر.، نوابیان، م.، و اسمعیلی ورکی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد زهکش زیرزمینی در کشت دوم اراضی شالی‌زاری (مطالعه موردی تربیتکاله) در مقیاس مدل فیزیکی. مجله تحقیقات خاک و آب. ۴۷ (۲): ۳۹۷-۴۰۵.
- مودنی، س.م.ر. ۱۳۹۴. شبه‌سازی و بهینه‌سازی عمق زهکش زیرزمینی برای کشت دوم اراضی شالی‌زاری در مقیاس مدل فیزیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان.
- مومن‌نژاد، ز. ۱۳۹۶. مقایسه عملکرد مدل‌های DRAINMOD و SWAP برای شبه‌سازی زهکشی کنترل شده زیرزمینی در مقیاس مدل فیزیکی اراضی شالی‌زاری. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300. D05109.
- AminSalehi, A., Navabian, M., Esmaeili Varaki, M., and Pirmoradian, N. 2017. Evaluation of HYDRUS-2D model to simulate the loss of nitrate in subsurface controlled drainage in a physical model scale of paddy fields. Paddy and Water Environment Engineering 15(2): 433-442.
- Belmans, C., Wesseling, J.G., and Feddes, R.A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. Journal of hydrology 63: 271-286.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. Transactions of the ASAE 7(1): 26-38.
- Darzi-Naftchali, A., Karandish, F., and Simunek, J. 2018. Numerical modeling of soil water dynamics in subsurface drained paddies with midseason drainage or alternate wetting and drying management. Agricultural Water Management 197: 67-78.
- Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water

- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892-898.
- Vlotman, W., Willardson, L.S., and Dierickx, W. 2001. *Envelope Design for Subsurface Drain*. Wageningen, ILRI, s.a. ILRI Publ. 56, 358 pages.
- Vogel, T., and Cislerova, M. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*. 3(1): 1-15.
- Warsta, L., Karvonen, T., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., and Taskinen, A. 2013. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. *Journal of Hydrology* 476: 395-409.
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society* 63: 1309-1313.
- Yao, R.J., Yang, J.S., Zhang, T.J., Hong, L.Z., Wang, M.W., Yu, S.P., and Wang, X.P. 2014. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China. *Agricultural Water Management* 133: 115-123.
- Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research* 32(9): 2683-2696.
- Simunek, J., Senja, M., and van Genuchten, M.Th. 1999. The HYDRUS-2D V. 2 software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. US Salinity Laboratory. *Agricultural Research Service*, US Departement of Agriculture, Riverside, Calif.
- Šimunek, J., van Genuchten, M.Th., and Šejna, M. 2008. Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages. *Numerical Modeling of Hydrodynamics for Water Resources – Garcia-Navarro & Playán (eds)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44056-1 95.
- Tan, X., Shao, D., and Liu, H. 2014. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. *Agricultural Water Management*. 132: 69-78.
- Tao, Y., Wang, S., Xu, D., and Qu, X. 2016. Experiment and analysis on flow rate of improved subsurface drainage with ponded water. *Agricultural Water Management* 77: 1-9.

## Simulation of Trenched Subsurface Drainage Performance in a Physical Model Scale Paddy Fields with HYDRUS-2D Model

F. Mohamadpour<sup>1</sup>, M. Navabian<sup>2\*</sup>

Received: Aug.04, 2020

Accepted: Nov.14, 2020

### Abstract

Poor drainage in paddy fields with heavy texture soils not only makes it difficult to harvest rice mechanically after rainfall, but also the use of non-conventional waters (drainage water) or saline irrigation water in long-term cause solute accumulation or sodification in soil. Also, such lands are not able to eliminate waterlogging in wet season and limited the second crop cultivation. Therefore, to avoid salinization and remove the waterlogging problem in paddy fields, drainage system is necessary. Installation of subsurface drainage in gravel trench results better porous conditions around the drainage pipe and thus improves drainage efficiency. Selecting the optimum trench geometry from a technical and economic point view requires simulation ability. In this study, HYDRUS-2D model was used to evaluate the performance of trenched subsurface drainage with gravel envelope in paddy fields. In order to calibrate the HYDRUS-2D model, a physical model of controlled subsurface drainage that laied in gravel trenche was constructed under paddy fields conditions and the rice plant was cultivated in it. In the growth period, was sampled of soil solution in various depths and distances from drain pipe and the drain water in mid and end season drainage. The electro conductivity (EC) of samples were measured in laboratory. Simulation results showed that the model has a good accuracy in simulating water movement, total dissolved solid of drain water and solute of soil solution.  $R^2$ , RMSE and nRMSE in water movement validation were obtained 0.982, 2.8 cm and 4.55 percent, respectively and in the solute transfer validation stage part were obtained 0.419, 0.035 mg/cm<sup>3</sup> and 10.56 percent, respectively. The results of sensitivity analysis also showed that soil saturated hydraulic conductivity parameters and longitudinal diffusivity coefficient with sensitivity coefficient of 2.6 cm/day and 0.47 cm had more effect on water and solute movement respectively.

**Keywords:** 2-D modeling, Controlled drainage, Drainage rate, Salinity, Water table

1- M.Sc. Student of Water Engineering Department, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan

2- Associated Professor of Water Engineering Department, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan and and Department of Water Engineering and Environment, University of Guilan, Rasht, Iran

(\*- Corresponding Author Email: Navabian@guilan.ac.ir)