

## مدیریت رطوبت با مدل HYDRUS 2D/3D برای تعیین عمق و فاصله زهکش‌ها در کشت دوم شالیزار

پیمان مختاری مطلق<sup>۱</sup>، علی شاهنظری<sup>۲\*</sup>، محمد رضا نوری امامزاده‌ئی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

### چکیده

تخلیه آب اضافی ناحیه ریشه از اهداف اجرای سیستم‌های زهکشی است. در این پژوهش مدل HYDRUS 2D/3D برای مدیریت انتقال رطوبت در تعیین عمق و فاصله زهکش‌ها برای کشت دوم اراضی شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سه سال زراعی (۱۳۹۶-۱۳۹۳) مورد ارزیابی قرار گرفت. مزرعه الف دارای دو زهکش با عمق ۹۰ سانتی‌متر و فاصله ۳۰ متری و مزرعه ب دارای زهکش‌هایی در عمق‌های ۶۵، ۹۰، ۹۰ سانتی‌متری با فاصله ۱۵ متری بود. مدل نسبت به پارامتر تجربی خاک آنالیز حساسیت شد. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS نسبت به رطوبت حجمی اشباع دارای حساسیت زیاد می‌باشد. سناریوهایی شامل: اعمال زهکش میانی در ۱- عمق ۴۰، ۲- عمق ۹۰، ۳- دو زهکش میانی در عمق ۴۰ و ۴- دو زهکش میانی در عمق ۶۵ سانتی‌متری برای مزرعه الف تعریف شد. بیشترین کاهش رطوبت در سناریوی چهار ۱۸/۷۵ درصد و کمترین ۰/۲۲ درصد در سناریوی یک رخ داد. سناریوی سه، دو روز و سناریوی چهار، چهار روز نسبت به مزرعه ب رطوبت لایه اول را زودتر تخلیه و به ظرفیت زراعی رساند. سناریوی چهار بهترین و سناریوی یک ضعیف‌ترین نتایج را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** سطح ایستابی، سناریو، ظرفیت زراعی، لایه کفه شخم

### مقدمه

(et al., 2008). مدل‌های شبیه‌سازی ابزاری توانمند در ارزیابی شرایط زهکشی موجود و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریت آب در مزرعه هستند. دقت مدل‌های شبیه‌سازی تا حد زیادی به دقت داده‌های ورودی به مدل بستگی دارد (Simunek et al., 2008). مدل HYDRUS دارای توانمندی در مدل‌سازی حرکت آب در خاک است. توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در پژوهش‌های انجام شده توسط محققان مختلفی بیان شده است (Kandelous and Simunek, 2010; Ebrahimian et al, 2012). از مدل HYDRUS به عنوان ابزاری در طراحی سیستم‌های زهکشی استفاده شد (Ebrahimian and Noori, 2015). در مطالعه‌ای تحت عنوان کاربرد مدل HYDRUS-2D برای پیش‌بینی تأثیر زهکش زیرزمینی در پویایی آب خاک در محصول کلزای دیم عملکرد مدل را با ضرب کارایی، خطای میانگین ریشه مربعات، خطای میانگین ریشه مربعات نرمال و خطای میانگین مورد بررسی قرار دادند و به کارایی مدل در شبیه‌سازی بیلان آب خاک اشاره کردند (Karandish et al., 2017). مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی آبشویی نیترات در مدل‌های فیزیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌های فیزیکی دارای زهکش در کشت برنج در نظر گرفته شد. از مدل HYDRUS-2D برای بررسی دبی خروجی در زهکشی میان فصل برنج استفاده شد که

برنج یکی از مهم‌ترین محصولات است که در سراسر دنیا در نواحی گرمسیر و سردسیر رشد می‌کند. یک وعده اصلی غذای بیش از نیمی از مردم جهان به برنج وابسته است (Jamal et al., 2009). کشت دوم برای حفظ پایداری اراضی شالیزاری، جلوگیری از تغییر کاربری و تأثیر بر اقتصاد معیشت کشاورزان بسیار حائز اهمیت است. وجود سیستم زهکشی عملکرد محصول (Darzi and Shahnazari, 2014) و بهره‌وری از خاک را در اراضی شالیزاری (Jung et al., 2010) افزایش می‌دهد. همچنین باعث بهبود تهویه خاک شده و افزایش فعالیت‌های بیولوژیکی در خاک را موجب می‌شود (Ouyang and Boersma, 1992). از این‌رو اراضی شالیزاری به علت وجود بافت سنگین خاک، به زهکشی زیرزمینی علاوه بر زهکشی سطحی نیاز دارد (Tobuchi, 2004). مطالعه جریان آب در اراضی شالیزاری بسیار پیچیده و ارزیابی آن نسبتاً دشوار و پرهزینه است (Simunek

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

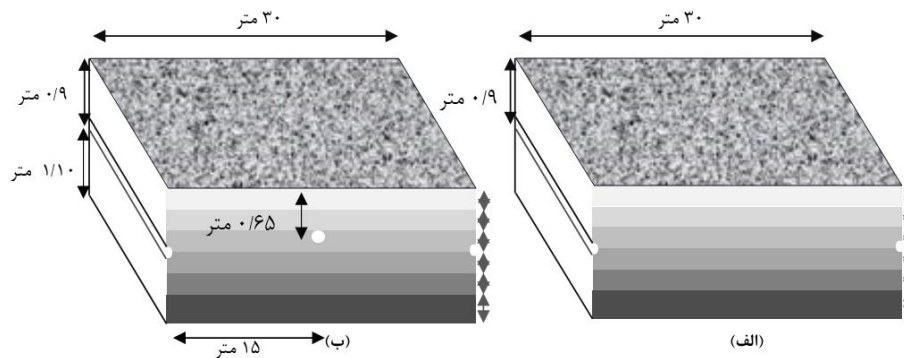
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

\* - نویسنده مسئول: (Email: aliponh@yahoo.com)

شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری واقع در استان شمالی ایران انجام شد. عرض و طول جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ درجه شرقی بوده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵- متر و متوسط بارندگی سالانه منطقه، ۶۱۶ میلی متر است. دو مزرعه تحقیقاتی در نظر گرفته شد. مزرعه (الف)، شامل یک سیستم زهکشی زیرزمینی با عمق ۰/۹ متر با فاصله ۳۰ متر و مزرعه (ب) یک سیستم زهکشی زیرزمینی دو عمقی (Bilevel) متشکل از سه خط زهکش به فاصله ۱۵ متر به ترتیب با اعماق ۰/۹، ۰/۶۵، ۰/۹ متر برای مطالعه انتخاب شد (Darzi et al., 2012). در شکل (۱) شماتیک مزارع مورد بررسی ارائه و هر لایه از خاک با رنگ متفاوتی نمایش داده شد.

برای تعیین بافت خاک از لایه های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰، ۹۰-۱۲۰، ۱۲۰-۱۵۰، ۱۵۰-۲۰۰ و ۲۰۰-۳۰۰ سانتی متری نمونه برداری شد. نمونه های خاک گرفته شده در آزمایشگاه پس از خشک شدن از الک دو میلی متری عبور داده و سپس با استفاده از روش هیدرومتری نوع بافت خاک مشخص شد.



شکل ۱- شماتیک مزارع مورد مطالعه (الف) سیستم زهکشی تک عمقی، (ب) سیستم زهکشی دو عمقی

کشاورزی فشرده شده و لایه کفه شخم نامیده می شود و در مطالعات مختلف دارای عمق های متفاوتی در اراضی شالیزاری می باشد (Amirun et al., 2004; Nguyen, 2007). لایه های بین کفه شخم و لایه نفوذ ناپذیر به لحاظ وجود زهکش و اعمال تغییرات، در هر مزرعه هدایت هیدرولیکی بهتری دارند.

برای اندازه گیری رطوبت اولیه و همچنین برای صحت سنجی مدل و مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده رطوبت بین زهکش ها، لوله های دسترسی رطوبت سنج با فواصل متفاوت نصب شد، به طوری که با دور شدن از زهکش فواصل بین لوله ها افزایش یافت. بین دو زهکش تک عمقی (مزرعه الف) ۱۱ عدد لوله یک متری دسترسی رطوبت سنج TRIME-FM<sup>1</sup> TDR<sup>1</sup> با فواصل صفر

نتایج آن ها قابلیت مدل در شبیه سازی دبی خروجی را نشان داد (Salehi et al., 2017).

بررسی مطالعات انجام شده نشان داد که مدل HYDRUS 2D/3D برای تأثیر عمق و فاصله نصب زهکش بر میزان رطوبت و زمان رسیدن رطوبت به ظرفیت زراعی در محدوده گستره ریشه بعد از بارش های سنگین تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه شبیه سازی انتقال رطوبت بین زهکش ها در سیستم زهکشی زیرزمینی برای کشت دوم (کلزا) اراضی شالیزاری با مدل HYDRUS 2D/3D در یک سال ارزیابی و طی دو سال مورد صحت سنجی قرار گرفت. مدل آنالیز حساسیت شد. راهکارهای مدیریتی انتقال رطوبت با تعریف سناریوهایی بررسی و بهترین عمق و فاصله نصب زهکش برای بارش های روزانه بیش از ۲۰ میلی متر پیشنهاد شد.

## مواد و روش ها

### موقعیت مزرعه

این مطالعه در پایلوت زهکشی به مساحت ۶/۳ هکتار از اراضی

اندازه گیری ها بعد از بارندگی و در شرایط اشباع خاک صورت گرفت. نتایج در مطالعات (مختاری مطلق و همکاران، ۱۳۹۷؛ Jafari et al., 2015) ارائه شد. بافت خاک و هدایت هیدرولیکی نشان داد که در لایه با عمق ۲ تا ۳ متری یک لایه نفوذ ناپذیر قرار دارد. تشخیص لایه نفوذ ناپذیر با توجه به بار پیرومتری مشاهده شده و مقایسه هدایت هیدرولیکی لایه های مختلف انجام شد. اگر یک لایه پایینی با لایه بالایی محصور شود و سطح ایستابی در پیرومتر واقع در لایه پایینی، بالاتر از کف لایه بالایی مشاهده شود به لایه بالایی، نفوذ ناپذیر می گویند (Ahmadi, 1999). عمق لایه نفوذ ناپذیر در شبیه سازی مدل دو متر لحاظ شد. همچنین لایه بندی خاک مزرعه نشان داد که در لایه ۳۰ تا ۶۰ سانتی متری یک لایه با هدایت هیدرولیکی کمتر نسبت به لایه سطحی وجود دارد. این لایه ناشی از عملیات شدید خاک ورزی و تردد بسیار ماشین و ادوات

1- Time-Domain Reflectometry

از روش لونبرگ-مارکوارت<sup>۲</sup> استفاده شد. معادله حرکت آب بر پایه‌ی حل معادله‌ی دوبعدی ریچاردز صورت گرفته است. یکی از مدل‌های تحلیلی مورد استفاده در HYDRUS مدل تابع ون گنوختن<sup>۳</sup> است (Simunek et al., 1999) که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

### شرایط اولیه و مرزی تعریف شده به مدل

نیاز آبی کلزا در مزرعه از طریق بارش‌های رخ داده در طول فصل تأمین شد. در اعمال شرایط مرزی در مدل، برای مرز بالایی شرایط اتمسفر<sup>۴</sup> در نظر گرفته شد تا بارش‌های مدنظر بر اساس تاریخ در مدل اعمال شد. همچنین به علت فرض عمق دو متری به عنوان لایه نفوذ ناپذیر مرز پایین بدون جریان اعمال شد. از طرفی با توجه به وجود لوله زهکش در طرفین، مرز چپ و راست بدون جریان<sup>۵</sup> لحاظ شد. برای دور لوله‌های زهکش نیز خروجی زهکش با شرط مرزی جریان متغییر<sup>۶</sup> در نظر گرفته شد. رطوبت اولیه خاک پس از اندازه‌گیری با دستگاه رطوبت‌سنج به صورت خطی به مدل وارد شد.

خاک مزرعه به هفت لایه تقسیم شد. لایه‌ها به ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰، ۹۰-۱۲۰، ۱۲۰-۱۵۰، ۱۵۰-۲۰۰، ۲۰۰-۱۵۰ و یک لایه دور لوله زهکش تقسیم شد. از پوشش معدنی برای دور لوله‌های زهکش (شن و ماسه) جهت تسهیل در ورود آب به داخل زهکش‌ها استفاده شد. ضخامت لایه پوششی دور لوله زهکش برابر ۱۰ سانتی‌متر در اطراف لوله زهکش به جز روی آن است. ضخامت پوشش معدنی در روی لوله‌های زهکش حدوداً ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر بود. به لحاظ تدقیق ورودی‌ها به مدل هفت لایه در مش‌بندی در نظر گرفته شد، که شامل شش لایه خاک و یک لایه دور لوله زهکش بود.

### آنالیز حساسیت

آشنایی با رفتار و حساسیت یک مدل پیش از کاربرد یک مدل نسبت به پارامترهای ورودی امری ضروری است. آنالیز حساسیت برای تغییرات خروجی مدل نسبت به پارامترهای ورودی بررسی می‌کند. اگر تغییرات پارامترهای ورودی، تاثیر کمتری بر خروجی‌های مدل بگذارد، می‌تواند نشان دهنده اثر اندک آن پارامتر بر روی نتایج باشد. در این پژوهش از روش ليو و همکاران آنالیز حساسیت انجام شد. آنالیز حساسیت با استفاده از داده‌های ورودی به مدل HYDRUS در سال ۹۳-۹۴ انجام و مدل بر اساس آن اجرا شد. خروجی مدل به عنوان خروجی پایه قرار گرفت. سپس هریک از داده

(روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی متر)، ۰/۵، ۱/۵، ۴، ۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۲۶، ۲۸/۵، ۲۹/۵، ۳۰ سانتی‌متری (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی متر) و در بین دو زهکش دو عمقی (مزرعه ب) ۱۷ عدد با فواصل صفر (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی متر)، ۰/۵، ۱/۵، ۴، ۷/۵، ۱۱، ۱۳/۵، ۱۴/۵، ۱۵ (روی زهکش با عمق ۶۵ سانتی‌متری)، ۱۵/۵، ۱۶/۵، ۱۹، ۲۲/۵، ۲۶، ۲۸/۵، ۲۹/۵، ۳۰ (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی‌متر) نصب شد. لوله اندازه‌گیری رطوبت در چهار عمق ۲۰-۶۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۷۰، ۶۰-۷۰ سانتی‌متر بعد از بارش و به صورت روزانه تا زمان تثبیت رطوبت در هر لایه ادامه یافت. دستگاه رطوبت‌سنج با تانک شن مخصوص دستگاه واسنجی شد. برای واسنجی دقیق‌تر دستگاه رطوبت‌سنج در سطح مزرعه بیش از ۷۰ نمونه خاک در فواصل و اعماق مختلف برداشت شد. رطوبت‌های حجمی اندازه‌گیری شده دستگاه با رطوبت‌های برداشتی مقایسه و رابطه واسنجی رطوبت (مختاری مطلق و همکاران، ۱۳۹۷) حاصل شد. در هر بار برداشت رطوبت با دستگاه، رطوبت واسنجی و مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی نوسانات سطح ایستابی از چاهک‌های مشاهده‌ای استفاده شد که در وسط طول زهکش (۵۰ متر فاصله از کلکتور)، پنج چاهک در عمق ۰/۹ متر به فاصله‌های ۱، ۳، ۶، ۱۰ و ۱۵ متر برای سیستم زهکشی تک عمقی و پنج چاهک به فواصل ۱، ۳، ۵/۵، ۷/۵، ۱۰/۵ و ۱۴/۵ از زهکش در سیستم دو عمقی نصب شد. پس از شروع بارندگی، سطح ایستابی به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. میزان بارندگی و اطلاعات هواشناسی از ایستگاه هواشناسی دشت ناز واقع در ۱۲ کیلومتری محل مورد مطالعه جمع‌آوری و تبخیر و تعرق کلزا از روش پنمن-مانیت و با نرم‌افزار کراپ وات محاسبه شد. پس از برداشت برنج، بذر کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) به میزان شش کیلوگرم در هکتار در مزرعه‌های الف و ب دارای سیستم زهکشی زیرزمینی کشت شد (مختاری مطلق، ۱۳۹۷).

### مدل HYDRUS (2D/3D)

مدل HYDRUS به طور قابل توجهی برای مدل‌سازی جریان آب، در مناطق اشباع و غیراشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل دوبعدی و سه‌بعدی توسط سیمونک و همکاران (Simunek et al., 2006) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا، در دانشگاه کالیفرنیا طراحی شد. مدل HYDRUS این توانایی را دارد که حرکت آب را در دو منطقه اشباع و غیراشباع شبیه‌سازی نماید. در این پژوهش برای مدل‌سازی دوبعدی فرآیند نفوذ، مدل HYDRUS (2D/3D) نسخه ۱/۱۱ به کار برده شد. در این مدل برای حل عددی معادلات حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین<sup>۱</sup> و برای بهینه‌سازی پارامترها

2- Marquardt-Levenberg

3- Van Genuchten

4- Atmospheric boundary

5- No flux boundary

6- Time variable boundary condition

1- Galerkin

مدل و  $\bar{P}$  میانگین مقدار ورودی یک پارامتر به مدل است. ضرایب حساسیت هریک از پارامترهای ورودی به مدل محاسبه شد و با دامنه تعریف شده در جدول ۱ مقایسه شد (Leu et al, 2007).

### واسنجی مدل

با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در سطح مزرعه مشخص شد که بارش روزانه بیش از ۲۰ میلی‌متر باعث بالا آمدن سطح ایستابی تا لایه اول (۳۰-۰ سانتی‌متر) شد. برای واسنجی مدل از سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در چاهک‌های مشاهده‌ای و سطح اشباع در خروجی گراف‌های مدل استفاده شد. با وقوع بارش نزدیک به ۴۸ میلی‌متر در ۱۴ اسفندماه سال ۹۳ (روز ۱۳۰ بعد از کشت) حالت ماندابی در اراضی شالیزاری دارای سیستم زهکشی حاصل شد. حالت ماندابی به لحاظ نیاز به بررسی نحوه تخلیه و انتقال رطوبت بین زهکش‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. داده‌برداری از روز ۱۳۰ تا ۱۴۴ بعد از کشت تا تثبیت خروجی زهکش‌ها ادامه یافت. پارامترهای هیدرولیکی خاک با مدل ون گنوختن-معلم در نرم‌افزار HYDRUS 2D/3D واسنجی شد.

های ورودی مدل در محدوده ۰/۲۵ و ۰/۵ تغییر داده شد و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد (عباسی، ۱۳۹۲). نتایج به دست آمده با نتایج اولیه (پایه) مطابق رابطه (۱) مقایسه شد. ضریب حساسیت محاسبه گردید.

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \quad (1)$$

### جدول ۱- دامنه تغییرات ضریب حساسیت

بدون حساسیت	SC=۰
حساسیت کم	۰ < SC < ۰/۳
حساسیت متوسط	۰/۳ < SC < ۱/۵
حساسیت زیاد	SC > ۱/۵

که در آن،  $S_c$  ضریب حساسیت،  $\Delta W$  تفاوت پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی،  $\bar{W}$  میانگین پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی،  $\Delta P$  اختلاف مقدار ورودی یک پارامتر به

جدول ۲- میزان بارش‌های روزانه رخ داده طی دوره‌های ده روزه جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل بر حسب میلی‌متر

سال زراعی	مدل	دوره	بارش روزانه تا ده روز بعد از بارش بیش از ۲۰ میلی‌متر در هر دوره												
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰			
۹۴-۱۳۹۳	واسنجی	از (۱۳۹۳/۱۲/۱۴)	۱۳۹-۱۳۰	۴۸/۴	۸/۵	۰	۹/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
		دوره ۱ از (۱۳۹۴/۰۸/۰۹)	۳۸-۲۹	۲۴/۷	۲/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
		دوره ۲ از (۱۳۹۴/۰۸/۲۳)	۵۲-۴۳	۲۸/۷	۰	۰	۱۲/۱	۴/۸	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	صحت سنجی	دوره ۳ از (۱۳۹۵/۱۰/۱۹)	۱۰۸-۹۹	۲۳/۸	۳/۱	۰	۰	۰	۳/۲	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰
		دوره ۴ از (۱۳۹۴/۱۱/۰۷)	۱۲۶-۱۱۷	۲۳/۶	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰
		دوره ۵ از (۱۳۹۴/۱۱/۱۹)	۱۳۸-۱۲۹	۳۰/۷	۶/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۴
۹۵-۱۳۹۴	صحت سنجی	دوره ۶ از (۱۳۹۴/۱۲/۱۰)	۱۴۹-۱۵۰	۷۲/۷	۰/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
		دوره ۷ از (۱۳۹۵/۰۷/۲۴)	۲۳-۱۴	۳۰/۴	۰	۶/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۶/۵
	صحت سنجی	دوره ۸ از (۱۳۹۵/۰۸/۱۲)	۴۱-۳۲	۲۳/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
		دوره ۹ از (۱۳۹۵/۱۱/۰۸)	۱۲۷-۱۱۸	۲۲/۲	۴/۳	۵/۶	۰	۰	۰	۰	۶/۸	۸/۶	۰	۰	۰

### صحت‌سنجی مدل

دوره بارش روزانه بیش از بیست میلی‌متر به وقوع پیوست. بررسی داده‌های رطوبتی اندازه‌گیری نشان داد که در بارش بیشتر از ۲۰

در سال ۹۵-۱۳۹۴ شش دوره و در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ سه

چهار سناریو در نظر گرفته شد و برای نه دوره طی دو سال زراعی (مطابق جدول ۳) مورد بررسی قرار گرفت. در شرایط موجود در مزرعه ب یک زهکش میانی در عمق ۶۵ سانتی متری وجود دارد. در دو سناریو یک و دو با جابجایی عمق نصب زهکش میانی از ۶۵ به ۴۰ سانتی متری (در سناریو یک) و از ۶۵ به ۹۰ سانتی متری (در سناریو دو) جایگاه مناسب زهکش میانی مشخص شد. در دو سناریو دیگر راهکاری برای کاهش بیشتر رطوبت بعد از بارش های سنگین مورد بررسی قرار گرفت. از این رو، تعداد زهکش های میانی به دو عدد افزایش (کاهش فاصله از ۱۵ به ۷/۵ متری) و عمق نصب بر اساس محل لایه کفه شخم در داخل لایه (۴۰ سانتی متری) و خارج از لایه (عمق ۶۵ سانتی متری) برای مزرعه الف در نظر گرفته شد. در مدل HYDRUS 2D/3D تأثیر این سناریوها بر روی رطوبت خاک در لایه ۳۰-۰ سانتی متری مزرعه طی دو سال زراعی، بررسی شد. نمای کلی از سناریوها در شکل (۲) نمایش داده شد. سناریوها با مدل شبیه سازی و با شرایط موجود در مزرعه الف مقایسه و تغییرات درصد رطوبت مورد تحلیل قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### آنالیز حساسیت

حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل HYDRUS 2D/3D با ۲۵ و ۵۰ درصد تغییر برای هر لایه از خاک در دو مزرعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله با داده های اندازه گیری شده رطوبت مقایسه شد. ضریب حساسیت هریک از پارامترها در شکل ۳ نشان داده شد.

بررسی ضریب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد که مدل HYDRUS مدل نسبت به رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_s$ ) حداکثر حساسیت را دارا می باشد که با نتایج سایر محققین (گلابی و همکاران، ۱۳۹۶) همخوانی دارد. کمترین حساسیت مدل نسبت به عکس پتانسیل ورود هوا به داخل خاک ( $\alpha$ )، پارامتر پیچ و خم در تابع جریان ( $L$ ) و رطوبت حجمی باقیمانده ( $\theta_r$ ) بوده و نسبت به هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) حساسیت متوسط دارد. مدل نسبت به پارامتر تجربی شکل منحنی رطوبتی خاک ( $n$ ) حساس نمی باشد، که با نتایج گلابی و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد.

### واسنجی مدل

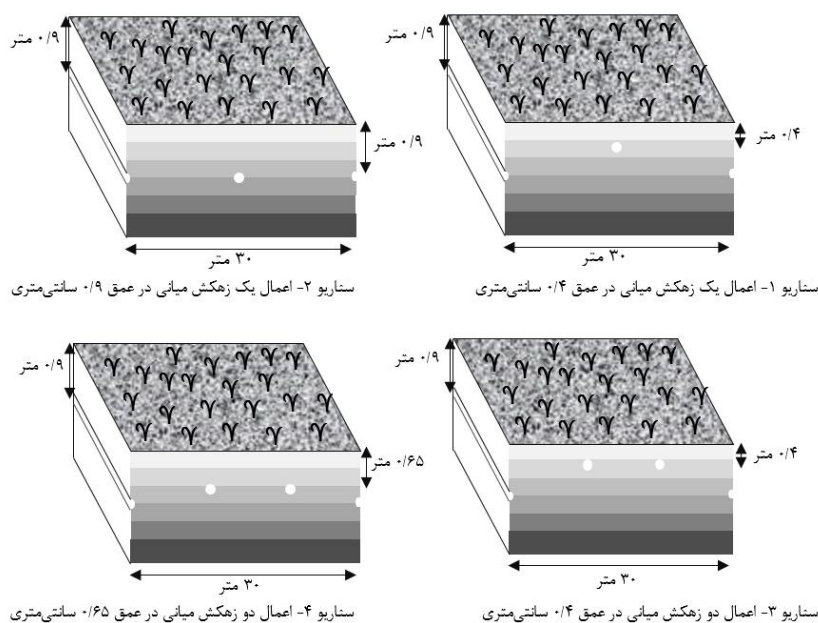
مدل HYDRUS 2D/3D این قابلیت را دارد که با استفاده از مدل رزتا و از طریق ورود درصدهای سیلت، رس و شن تخمین اولیه ای از پارامترهای هیدرولیکی در اختیار قرار دهد. بر همین اساس مقادیر تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی حاصل و مدل اجرا شد.

میلی متر برای رسیدن رطوبت به ظرفیت زراعی در مزرعه به مدت بیش از ده روز نیاز است. به همین دلیل دوره ها ده روزه در نظر گرفته شد. در جدول (۲) میزان بارش های به وقوع پیوسته در دوره های واسنجی و صحت سنجی بیان شد.

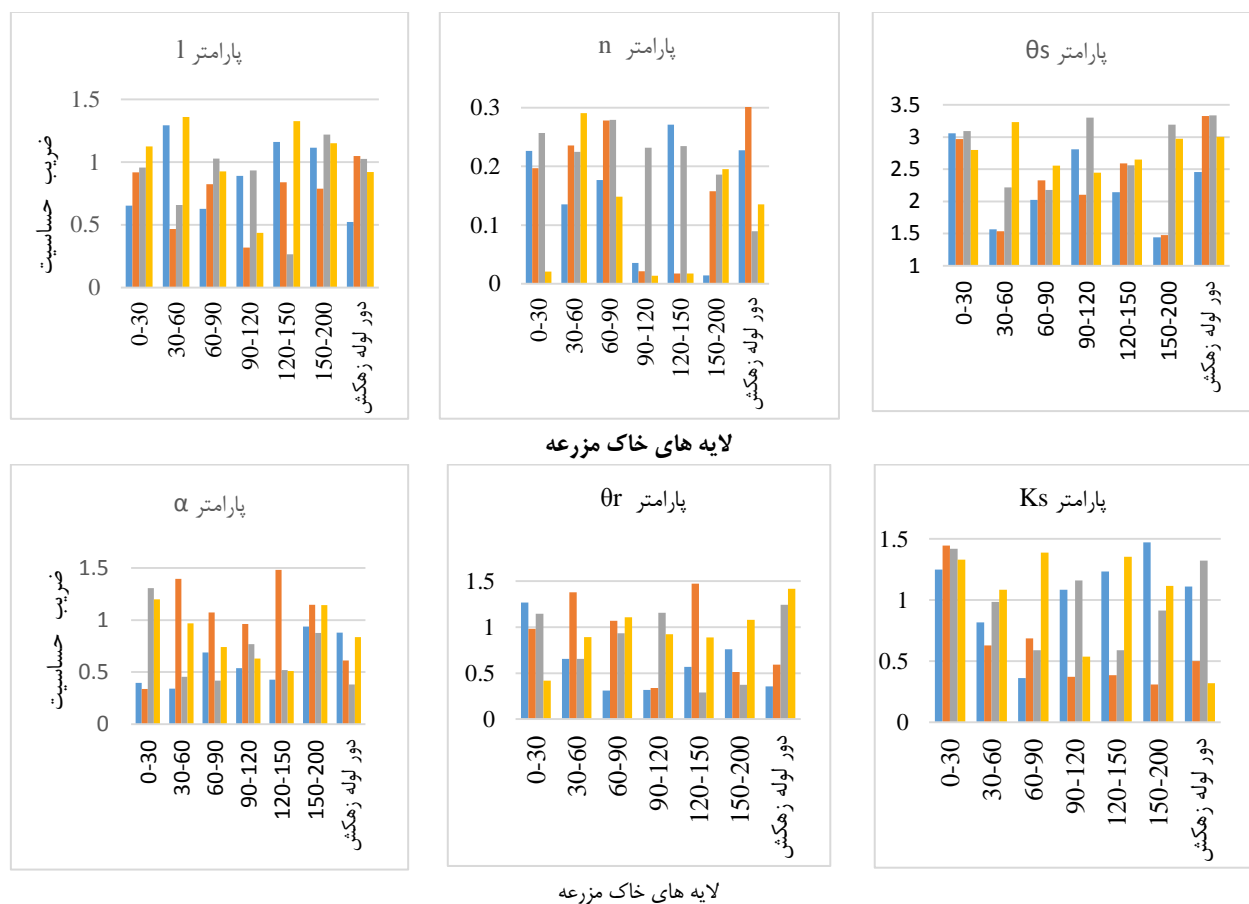
ارزیابی مدل با مقایسه داده های مشاهده ای و پیش بینی شده با آماره های (EF) راندمان مدل (Nash, and Sutcliffe, 1970)، (PE) درصد خطا، ( $R^2$ ) ضریب تعیین (Wang et al., 2011)، (RMSE) جذر مربعات خطا (Willmott, 1982) و (AD) میانگین انحراف یا میانگین خطای مطلق (Legates and McCabe 1999) انجام شد. آماره های (EF)، راندمان مدل را بیان می کند که دارای محدوده تغییرات بین منفی بی نهایت تا یک بوده و بهترین مقدار آن برابر یک است. مقادیر صفر تا یک نشان می دهد که مدل پیش بینی بهتری در مقایسه با میانگین مشاهده ها داشته و مقادیر منفی نشان دهنده پیش بینی ضعیف تر مدل نسبت به میانگین مشاهدات است. راندمان یک معرف مدل کامل است (Nash and Sutcliffe, 1970). آماره (PE)، درصد خطا را نشان می دهد و برابر با نسبت کل اختلاف ها به مجموع مقادیر مشاهده ای است که مقادیر آن بین منفی صد تا بینهایت می باشد. بهترین مقدار آن برابر صفر است و هر چه مقدار به صفر نزدیک تر باشد، بیان کننده این است که مدل گرایش کمتری به تخمین بالاتر یا پایین تر دارد. ضریب تعیین ( $R^2$ )، رابطه کمی بین مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی شده است که محدوده تغییرات آن مقادیر بین صفر تا یک بوده و بهترین مقدار آن برابر یک است. صفر نشانه عدم تعیین و یک نشان دهنده تطابق کامل است (Wang et al., 2011). آماره جذر مربعات خطا (RMSE)، معیاری برای برآورد انحراف معیار خطای شبیه سازی مدل است که محدوده تغییرات آن از صفر تا بینهایت است. بهترین مقدار آن برابر صفر است که مقدار کمتر نشان دهنده عملکرد بهتر است (Willmott, 1982). آماره میانگین انحراف یا میانگین خطای مطلق (AD)، متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی شده است. محدوده تغییرات این آماره از صفر تا بینهایت است. بیشترین مقدار آن برابر صفر است و مقادیر کمتر نشان دهنده عملکرد بهتر است (Legates and McCabe 1999).

### سناریوهای مورد مطالعه

شرایط غرقابی یکی از مشکلات کشت کلزا در مناطق پر باران می باشد. وجود لایه کفه شخم در عمق ۶۰-۳۰ سانتی متری موجب شده که بیشترین حجم ریشه گیاه کلزا در این لایه قرار گیرد. از این رو انتقال سریع تر رطوبت از این لایه در عملکرد محصول مؤثر می باشد. به منظور تحلیل رفتار انتقال رطوبت بین زهکش ها و مشخص نمودن بهترین عمق نصب و فاصله در تخلیه رطوبت لایه اول خاک مزرعه



شکل ۲- شماتیک سناریوهای اعمال شده در مدل



شکل ۳- ضریب حساسیت هریک از پارامترهای هیدرولیکی برای لایه های مختلف خاک مزرعه (میله های منحنی در هر لایه به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: ۲۵ درصد تغییر مزرعه الف، ۲۵ درصد تغییر مزرعه ب، ۵۰ درصد تغییر مزرعه الف و ۵۰ درصد تغییر مزرعه ب)

جدول ۳- پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده ورودی مدل در مزرعه ب

پارامترهای هیدرولیکی خاک							عمق لایه (cm)	شماره لایه
*Ks (cm/day)	l	N	$\alpha$ (1/cm)	$(\text{cm}^3/\text{cm}^3)\theta_s$	$(\text{cm}^3/\text{cm}^3)\theta_r$			
۱۰۴	۰/۵	۱/۴۲	۰/۰۵۵	۰/۴۷۸	۰/۰۹	۰-۳۰	۱	
۱۱	۰/۵	۱/۵۸	۰/۰۴۳	۰/۴۶۹	۰/۱۱	۳۰-۶۰	۲	
۳۰/۸	۰/۵	۱/۶۸	۰/۰۶۸	۰/۴۷	۰/۱۰	۶۰-۹۰	۳	
۱۵/۷	۰/۵	۱/۳۶	۰/۰۶۵	۰/۴۷	۰/۱۰	۹۰-۱۲۰	۴	
۳۸/۲	۰/۵	۱/۵۲	۰/۰۶	۰/۴۷	۰/۱۰	۱۲۰-۱۵۰	۵	
۸/۵	۰/۵	۱/۵۷	۰/۰۵۳	۰/۴۷	۰/۱۰	۱۵۰-۲۰۰	۶	
۱۱۴	۰/۵	۲/۷۱	۰/۱۶۸	۰/۴۱	۰/۰۶	دور لوله زهکش	۷	

شبییه سازی انتقال رطوبت در دوره واسنجی توسط مدل انجام شد. در روز سوم بعد از بارش (مطابق جدول ۲)، حدود ۷ میلی متر بر روی مزرعه مورد مطالعه بارش رخ داد که باعث افزایش سطح رطوبت اشباع در پروفیل خاک شده و موجب بالا آمدن سطح ایستابی را بین روز دوم و چهارم بعد از بارش سنگین شد. در سایر روزهای دوره مورد بررسی بارشی رخ نداد. داده‌های برداشت شده با دستگاه رطوبت‌سنج، واسنجی شده و داده‌های رطوبتی شبیه‌سازی شده مقایسه شده با استفاده از آماره‌های ارزیابی بیشینه و کمینه مقادیر ارزیابی به شرح جدول (۴) بیان شد.

بین سطح اشباع شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS 2D/3D با سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه همبستگی لازم وجود نداشت و نیازمند واسنجی دقیق‌تر پارامترهای هیدرولیکی خاک بود. برای افزایش همبستگی و واسنجی مدل پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شد و در مدل لحاظ شد. سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک بر اساس حل معکوس مدل واسنجی شد. پارامترهای هیدرولیکی خاک برای مزرعه الف در پژوهش (مختاری مطلق و همکاران، ۱۳۹۷) و مزرعه ب در جدول (۳) نشان داده شد.

جدول ۴- بیشینه و کمینه تحلیل آماری بین داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های شبیه‌سازی شده رطوبت خاک با مدل HYDRUS 2D/3D از روز ۱۳۶ تا ۱۳۹ بعد از کشت برای دو سیستم زهکشی

مزرعه		RMSE	R <sup>2</sup>		AD		PE		EF
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
۰/۰۳۸	۰/۰۱۱	۰/۹۹۳	۰/۷۵	۰/۰۹۱	۰/۰۱۶	۰/۳۴۷	۰/۳۱۳	۱	۰/۹۹۱
۰/۰۵۲	۰/۰۱۲	۰/۹۸۳	۰/۶۳۳	۰/۰۸۴	۰/۰۰۸	۰/۰۸۱	۰/۰۸۱	۰/۴۷	۰/۲۳۳

از این افت و خیز را نشان داد.

#### صحت سنجی

مدل واسنجی شده برای نه دوره طی دو سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵ (جدول ۲) اجرا شد. رطوبت شبیه‌سازی با رطوبت اندازه‌گیری شده توسط شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفت. بیشینه و کمینه شاخص‌های ارزیابی رطوبت برای کل دوره‌های ده‌روزه بعد از بارش در جدول (۵) برای هر مزرعه ارائه شد.

نتایج بررسی شاخص‌های تحلیل آماری در جدول (۴) نشان داد که مدل HYDRUS رطوبت اراضی شالیزاری بین دو و سه زهکش را به خوبی شبیه‌سازی کرد. بدترین پیش‌بینی‌های مدل در روز هفتم در عمق ۴۰-۶۰ سانتی متری بود. همچنین شاخص‌های آماری واسنجی مطلوب مدل را نشان داد (Nash and Sutcliffe, 1970)، (Wang et al., 2011)، (Willmott, 1982) و (Legates and McCabe 1999). در دوره واسنجی، بارش‌های میان دوره‌ای رخ داد که در روزهای قبل از بارش، افت و در روزهای بعد از بارش، خیز سطح ایستابی را موجب شد. شاخص‌های ارزیابی، برآورد مناسب مدل

جدول ۵- مقادیر بیشینه و کمینه شاخص‌های ارزیابی برای کل دوره‌های ده‌روزه در دو مزرعه الف و ب

مزرعه		RMSE	R <sup>2</sup>		AD		PE		EF
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
۰/۰۳۶	۰/۰۰۸	۰/۹۹۶	۰/۸۳۳	۰/۰۴۱	۰/۰۱۱	۰/۴۰۴	۰/۰۷۷	۰/۹۹۷	۰/۷۸۹
۰/۰۴۵	۰/۰۱۱	۰/۹۸۴	۰/۷۸۰	۰/۰۵۰	۰/۰۱۸	۰/۵۳۶	۰/۱۴۲	۰/۹۸۸	۰/۷۸۶

زهکش در شرایط سیلابی استفاده کرد. دوره هفتم و هشتم در سال ۹۶-۱۳۹۵ نیز روند کاهشی بعد از بارش روز اول ادامه داشت و در دوره نهم نیز افزایش رطوبت تا روز سوم، کاهش رطوبت تا روز پنجم، افزایش رطوبت تا لایه کفه شخم در روز ششم و هفتم و کاهش رطوبت تا پایان دوره رخ داد که نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل در این دوره نیز به مقادیر بهینه شاخص‌ها نزدیک است. در مجموع می‌توان عملکرد مدل HYDRUS 2D/3D در شبیه‌سازی رطوبت بین زهکش‌ها در اراضی شالیزاری را مطلوب در نظر گرفت.

سطح ایستابی در ۵ چاهک به فواصل ۰/۵، ۱، ۳، ۱۰ و ۱۵ متری از زهکش در سیستم تک عمقی و ۵ چاهک به فواصل ۱، ۳، ۵/۵، ۷/۵، ۱۰/۵ و ۱۴/۵ از زهکش در سیستم دو عمقی، برای هر دوره اندازه‌گیری شد. سطح اشباع حاصل از شبیه‌سازی رطوبت در مدل برابر سطح ایستابی شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شد. سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مزرعه مقایسه و نتایج شاخص‌های ارزیابی به شرح جدول (۶) برای دوره‌های سال ۹۵-۱۳۹۴ حاصل شد.

دامنه تغییرات هریک از شاخص‌ها در جدول (۵) نشان داد که مدل شبیه‌سازی مناسبی داشته و نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت در دوره‌های مورد نظر دارد. در دوره اول، سوم، چهارم و پنجم بعد از بارش روز اول بارش موثر بر سطح ایستابی مشاهده نشد و روند کاهشی رطوبت تا ده روز بعد ادامه یافت و شاخص‌ها، مدل‌سازی برای هر دو سیستم را مطلوب نشان داد. در دوره دوم نوسانات رطوبتی در روز چهارم بعد از بارش (روز ۴۷ بعد از کشت) وجود داشت. بارش رخ داده (مطابق جدول ۲) در دو روز ۴۷ و ۴۸ بعد از کشت موجب افزایش رطوبت در لایه‌های سطحی تا لایه کفه شخم شد و تا سه روز اول رطوبت روند کاهشی داشته و در دو روز بعد افزایش رطوبت رخ داد. شاخص‌های ارزیابی در دوره دوم نیز نشان دهنده قابلیت مدل در شبیه‌سازی افت و خیز رطوبت در دوره را برای هر دو سیستم است. در دوره ششم بارش ۷/۷ میلی‌متر به وقوع پیوست و میانگین شاخص‌های ارزیابی برای هر دو سیستم در این دوره نشان داد که مدل برای مدیریت رطوبت خاک با اعمال بارش‌های سنگین قابل کاربرد بوده و می‌توان از مدل برای بررسی رطوبت اراضی

جدول ۶- ارزیابی سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای دوره‌های سال ۹۵-۱۳۹۴ در دو مزرعه الف و ب

شاخص ارزیابی	دوره ۱		دوره ۲		دوره ۳		دوره ۴		دوره ۵		دوره ۶	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
مزرعه الف	۰/۹۶۸	۳/۰۹۹	۰/۹۷۵	۵/۰۹۱	۰/۹۳۳	۴/۸۴۴	۰/۹۵۴	۴/۴۵۳	۰/۹۵۰	۴/۴۵۳	۰/۹۷۲	۲/۴۲۶
مزرعه ب	۰/۸۹۰	۶/۴۱۶	۰/۸۶۱	۷/۲۰۲	۰/۸۶۵	۶/۸۰۱	۰/۸۸۴	۷/۴۳۵	۰/۸۶۲	۷/۴۳۵	۰/۹۵۱	۳/۲۶۷

کمتر رطوبت و سطح ایستابی در سه روز اول دوره اشاره نمود. همچنین بدترین نتایج برای شبیه‌سازی در دوره سوم حاصل شد. نتایج شاخص‌های ارزیابی سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مزرعه الف و ب در جدول (۷) برای دوره‌های سال ۹۶-۱۳۹۵ بیان شد. در این دوره نیز به علت نوسانات حاصل از افت و خیز سطح ایستابی مدل شبیه‌سازی ضعیف‌تری برای سطح ایستابی داشت.

بررسی جدول (۶) نشان داد که شاخص RMSE و ضریب تعیین در سیستم تک عمقی نتایج بهتری را بیان کرد. از دلایل این امر می‌توان به درز و ترک‌ها، اعمال شرایط مرزی متفاوت‌تر در سیستم زهکشی دو عمقی و وجود زهکش در پایین لایه کفه شخم اشاره کرد. بهترین شبیه‌سازی در دوره با بارش سنگین (دوره ۶) رخ داد. همچنین بررسی شاخص‌های RMSE و ضریب تعیین نشان داد که در دوره ۶ بهترین مقادیر برای شاخص‌های ارزیابی حاصل شد. علت اصلی آن بارش سنگین و ایجاد حالت ماندابی و در نتیجه تغییرات

جدول ۷- ارزیابی سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل برای دوره‌های سال ۹۶-۱۳۹۵ در دو مزرعه الف و ب

شاخص ارزیابی	دوره ۱		دوره ۲		دوره ۳	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
مزرعه الف	۰/۹۵۴	۴/۲۷۵	۰/۹۴۲	۴/۵۸۵	۰/۹۴۶	۳/۵
مزرعه ب	۰/۸۹۸	۶/۶۷۳	۰/۹۱۲	۶/۲۹۰	۰/۹۸۲	۴/۸۸۱

برای شاخص‌های ارزیابی حاصل شده که علت اصلی آن بارش‌های رخ داده در طول دوره باعث نوسانات کمتر سطح ایستابی شده است. مدل HYDRUS برای اراضی دارای زهکش زیرزمینی ( Yousfi et al )

شاخص RMSE و ضریب تعیین در سیستم تک عمقی مطابق جدول (۷) نتایج بهتری را نشان داد. همچنین بررسی شاخص‌های RMSE و ضریب تعیین نشان داد که در دوره سه بهترین مقادیر



وقوع پیوست و تنها در دوره زمانی متفاوت بوده‌اند. بررسی رطوبت میانگین در این دوره‌ها مطابق شکل (۴) نشان داد که در مزرعه الف و سناریو یک بعد از گذشت ۱۰ روز رطوبت به حد ظرفیت زراعی نرسید، در حالی که در مزرعه ب و سناریو دو در روز ششم رطوبت به ۴۰/۸ درصد رسید. در دوره ۲، که بارش میان دوره‌ای رخ داد، فقط در مزرعه ب و سناریو دو بین روزهای هفتم تا دهم رطوبت در حد ظرفیت زراعی قرار گرفت. در دوره ۵، بعد از بارش ۳۰/۷ میلی‌متری نیز فقط مزرعه ب و سناریو دو رطوبت در روزهای هفتم تا دهم به ظرفیت زراعی رسید. دوره ۶، بارش ۷۲/۷ میلی‌متری رخ داد و بعد از گذشت ده روز در هیچ کدام از سیستم‌های در نظر گرفته شده رطوبت به ۴۰ درصد نرسید. در دوره ۷، بارش مشابه دوره ۵ بوده ولی به علت وقوع در زمان ابتدایی کشت، تبخیر از سطح خاک بیشتر بوده و در مزرعه ب در روز ششم و در سناریو دو در روز پنجم به رطوبت مورد نظر رسید.

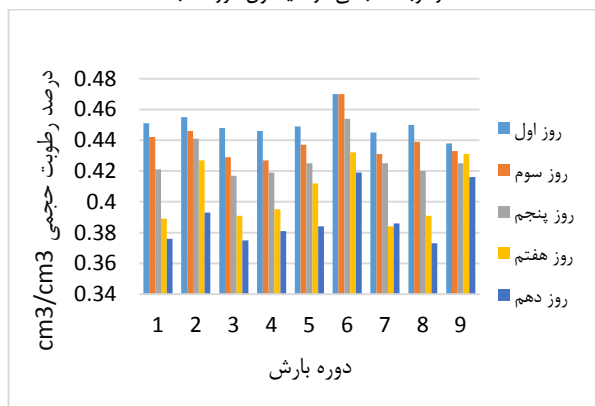
دوره ۹، نیز به لحاظ بارش‌های رخ داده شده در طول دوره رطوبت در هیچ سیستمی به ظرفیت زراعی نرسید. تحلیل رطوبت‌ها در شکل (۴) نشان داد که کاهش رطوبت در لایه اول بعد از روز سوم روند کاهشی پیدا کرد و در روزهای قبل از آن حالت ماندانی در مزرعه ایجاد شد. با افزایش مدت بعد از بارش آهنگ کاهش رطوبت، افزایش یافت. همچنین شکل (۴) نشان داد که طی ده روز، اعمال یک زهکش در عمق ۴۰ سانتی‌متری تأثیر چشم‌گیری در کاهش رطوبت میانگین رطوبت لایه اول نداشت و این سناریو نتایج تقریباً مشابهی با سیستم مزرعه الف (تک عمقی) داشت. اعمال زهکش در عمق ۹۰ سانتی‌متری (کاهش فاصله بین دو زهکش از ۳۰ متر به ۱۵ متر) در بارش سنگین در دوره ۷ بیشترین کاهش رطوبت را حاصل نمود. آنچه از بررسی رطوبت‌ها در شکل (۴) نشان داد، در جای‌گیری زهکش میانی، عمق نصب ۶۵ سانتی‌متری در مزرعه ب با سناریو ۲ (زهکش در عمق ۹۰ سانتی‌متری) نتایج نزدیکی را به‌جز در دوره ۷ حاصل نمود. علت اصلی را می‌توان در عاملیت لایه کفه شخم دانست. زیرا کاهش هدایت هیدرولیکی در این لایه و همچنین سطح ایستابی بالا در مزرعه، مانع از کاهش رطوبت برای رسیدن به حد ظرفیت زراعی شده و به زمان طولانی‌تری نیاز است. برای کاهش اثر لایه کفه شخم، دو سناریوی دیگر مورد بررسی قرار گرفت. سناریو سه، شامل نصب زهکش‌هایی در اعماق ۹۰، ۴۰، ۴۰، ۹۰، ۴۰، ۹۰ سانتی‌متری با فاصله ۷/۵ متر از یکدیگر و سناریو چهار زهکش‌ها با عمق ۹۰، ۶۵، ۶۵، ۹۰ سانتی‌متری با فاصله ۷/۵ متری از یکدیگر (مطابق شکل ۲) در مدل لحاظ شد. بر اساس خروجی‌های مدل میانگین رطوبت در لایه اول برای روزهای اول، سوم، پنجم، هفتم و دهم بعد از بارش برای نه دوره شبیه‌سازی شد. میانگین رطوبت شبیه‌سازی شده در سناریو سه و چهار در شکل (۵) بیان شد.

Ebrahimian and noori, ) و برای اراضی شالیزاری (al., 2014) به کار برده شد و روابط مورد استفاده برای تعیین فواصل زهکش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها بیان کردند که مدل HYDRUS برای اراضی دارای سیستم‌های زهکشی و اراضی شالیزاری کاربرد دارد و نتایج این پژوهش نیز بیان‌کننده توانایی مدل در اراضی شالیزاری دارای زهکشی در سطح مزرعه را نشان داد. همچنین مدل قابلیت اعمال دو و سه خروجی هم‌زمان را دارد که با نتایج سایر مطالعات (Salehi et al., 2017) مطابقت دارد و می‌توان از این مدل برای طراحی سیستم زهکشی (Ebrahimian and noori, 2015) و مشخص نمودن راهکارهای افزایش کارایی زهکش‌ها با مدیریت سطح ایستابی استفاده نمود. این مدل (Karandish et al., 2017) در کشت برنج با دو بار زهکشی و اعمال آبیاری در فصل کارایی داشت. در این مطالعه نیز تحت شرایط کشت دوم اراضی شالیزاری با اعمال بارش و زهکش‌های باز در طول فصل زراعی مدل کاربردی بود. مطابق نتایج سایر پژوهشگران؛ اختلافات بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی توسط مدل می‌تواند ناشی از وجود درز و ترک‌ها و گاه‌گرایان‌های ترجیحی باشد (Akay et al., 2008; Wang et al., 2011) که در سیستم زهکشی دو عمقی بیشتر نشان داد.

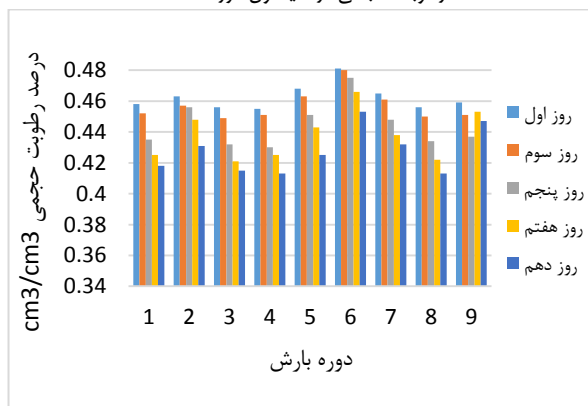
#### سناریوهای مورد مطالعه

ظرفیت زراعی اندازه‌گیری شده در مزرعه برابر ۴۰/۸ درصد حجمی است. بررسی رطوبت در لایه اول (۳۰-۰ سانتی‌متری) به لحاظ وجود حداکثر ریشه در این لایه (به علت لایه کفه شخم در لایه ۶۰-۳۰ سانتی‌متری) اهمیت ویژه‌ای دارد. بررسی رطوبت در لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری در دو مزرعه نشان داد که بعد از بارش بیش از ۲۰ میلی‌متر برای رسیدن رطوبت به حد ظرفیت زراعی مزرعه در این لایه، حداقل به یک دوره ده روزه نیاز است. برای بررسی عملکرد بهتر زهکش میانی و جانمایی دقیق‌تر آن دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریو یک، زهکش میانی در لایه دوم یا لایه کفه شخم (عمق ۴۰ سانتی‌متری) قرار گرفت. عمق نصب زهکش‌ها به ترتیب ۹۰، ۴۰، ۹۰ با فاصله ۱۵ متری از یکدیگر (مطابق شکل ۲) لحاظ شد. در سناریو دو، زهکش در مرز لایه سوم و چهارم خاک مزرعه (عمق ۹۰ سانتی‌متری) در مزرعه الف جانمایی شد. به‌عبارت دیگر عمق نصب زهکش‌ها به ترتیب ۹۰، ۹۰، ۹۰ و فاصله ۱۵ متر از یکدیگر (مطابق شکل ۲) در نظر گرفته شد. بر اساس گراف‌های خروجی مدل میانگین رطوبت در لایه اول برای روزهای اول، سوم، پنجم، هفتم و دهم بعد از بارش در هر دوره محاسبه شد. میانگین رطوبت شبیه‌سازی شده در مزارع الف، ب، سناریو یک و دو در شکل (۴) نشان داده شد. دوره‌های ۱، ۳ و ۸ که تقریباً بارش‌های مشابهی در هر دوره به

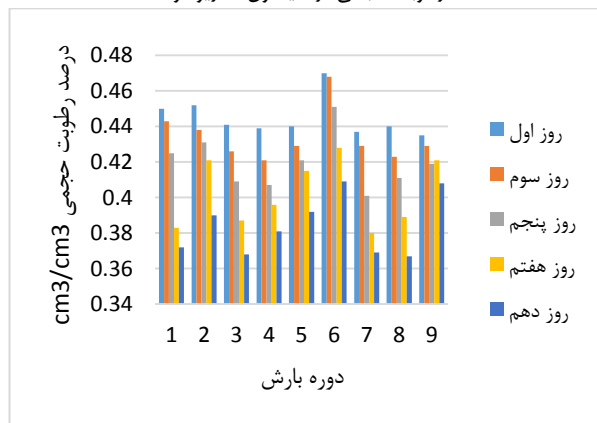
رطوبت حجمی در لایه اول مزرعه ب



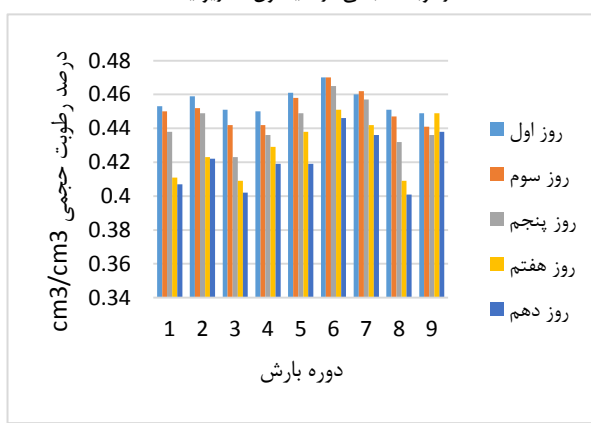
رطوبت حجمی در لایه اول مزرعه الف



رطوبت حجمی در لایه اول سناریو دو

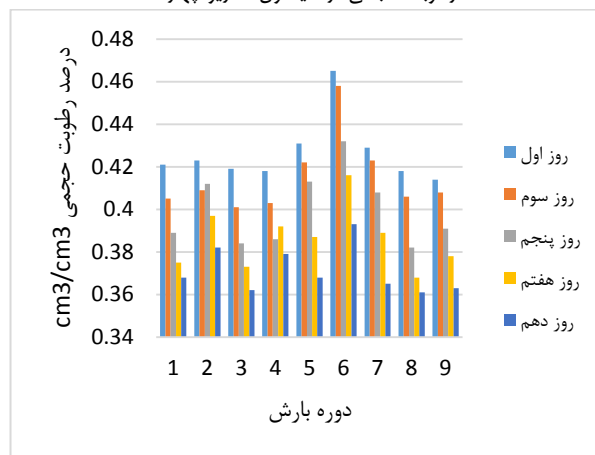


رطوبت حجمی در لایه اول سناریو یک

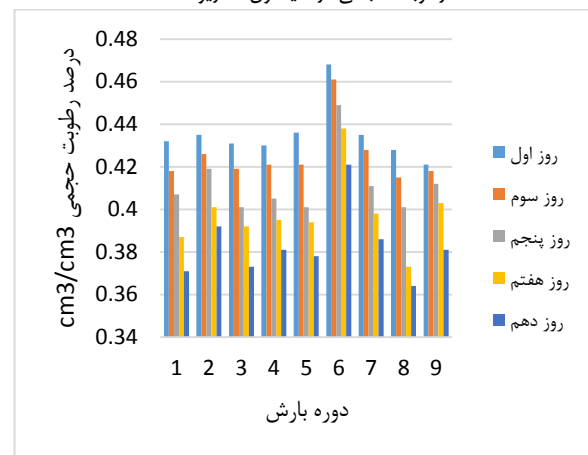


شکل ۴- درصد رطوبت حجمی برای روزهای اول، سوم، پنجم، هفتم و دهم بعد از بارش در نه دوره بارش برای مزرعه الف، ب، سناریو یک و دو

رطوبت حجمی در لایه اول سناریو چهار



رطوبت حجمی در لایه اول سناریو سه



شکل ۵- درصد رطوبت حجمی برای روزهای اول، سوم، پنجم، هفتم و دهم بعد از بارش در نه دوره بارش برای سناریو سه و چهار

زراعی رسید. در دوره‌های ۲، ۵ و ۷ در سناریو سه، روز ششم و در سناریو چهار، روز پنجم بعد از بارش رطوبت لایه اول در حد ظرفیت

شکل (۵) نشان داد که در دوره‌های ۱، ۳ و ۸ در سناریو سه، روز ششم و در سناریو چهار در روز چهارم بعد از بارش رطوبت به ظرفیت

زمان رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی را در تمامی دوره‌ها نسبت به مزرعه ب (دوعمقی) بیش از چهار روز زودتر، ممکن شد. در بارش دوره ۶ در سناریو چهار آهنگ کاهش رطوبت، نسبت به سایر سناریوها سریع‌تر رخ داد.

درصد کاهش رطوبت در روزهای اول، سوم، پنجم، هفتم و دهم برای هر دوره در هر سناریو نسبت به مزرعه الف مقایسه و در جدول (۸) گنجانده شد.

زراعی قرار گرفت. دوره ۶ تنها در سناریو چهار، برای روزهای بین هفتم تا دهم درصد رطوبت به ۴۰/۸ درصد رسید. دوره ۹، با توجه به بارش‌های رخ داده شده در طول دوره، در سناریو سه در روز هفتم و در سناریو چهار در روز چهارم رطوبت به ظرفیت زراعی رسید. آنچه از بررسی رطوبت‌ها نشان داده شد کاهش رطوبت در لایه اول بعد از روز اول روند کاهشی پیدا کرد و به‌جز در دوره ۶ حالت ماندابی ایجاد نشد. سناریو سه زمان رسیدن به رطوبت ظرفیت زراعی را در همه دوره‌ها نسبت به مزرعه ب بیش از دو روز تسریع بخشید و در سناریو چهار

جدول ۸- درصد کاهش رطوبت برای روزهای مختلف دوره‌های مورد بررسی در مزرعه ب، سناریوهای یک، دو، سه و چهار نسبت به مزرعه الف

دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳	دوره ۴	دوره ۵	دوره ۶	دوره ۷	دوره ۸	دوره ۹	
۱/۵۳	۱/۷۳	۱/۷۵	۱/۹۸	۴/۰۶	۲/۲۹	۴/۳۰	۱/۳۲	۴/۵۸	روز اول
۲/۲۱	۲/۴۱	۴/۴۵	۵/۳۲	۵/۶۲	۲/۰۸	۶/۷۱	۲/۴۴	۳/۹۹	روز سوم
۳/۲۲	۳/۲۹	۳/۴۷	۲/۵۶	۵/۷۶	۴/۴۲	۷/۰۰	۳/۲۳	۲/۷۵	مزرعه ب روز پنجم
۸/۴۷	۴/۶۹	۷/۱۳	۷/۰۶	۷/۰۰	۷/۳۰	۱۳/۱۲	۷/۳۵	۴/۸۶	روز هفتم
۱۰/۰۵	۸/۸۲	۹/۶۴	۷/۷۵	۹/۶۵	۷/۵۱	۱۱/۴۷	۹/۶۹	۶/۹۴	روز دهم
۱/۰۹	۰/۸۶	۱/۱۱	۱/۱۰	۱/۵۰	۲/۲۹	۱/۰۸	۱/۱۰	۲/۱۸	روز اول
۰/۴۴	۱/۰۹	۱/۵۶	۲/۰۰	۱/۰۸	۲/۰۸	۰/۲۲	۰/۶۷	۲/۲۲	روز سوم
۰/۹۲	۰/۶۶	۲/۰۸	۱/۳۸	۰/۴۴	۲/۱۱	۱/۹۷	۰/۴۶	۰/۳۳	سناریو یک روز پنجم
۳/۲۹	۲/۲۳	۲/۸۵	۰/۹۳	۱/۱۳	۳/۲۲	۰/۹۰	۳/۰۸	۰/۸۸	روز هفتم
۲/۶۳	۲/۰۹	۳/۱۳	۱/۴۲	۱/۴۱	۱/۵۵	۰/۹۲	۲/۹۱	۲/۰۱	روز دهم
۱/۷۵	۲/۳۸	۳/۲۹	۳/۵۲	۵/۹۸	۲/۲۹	۶/۰۲	۳/۵۱	۵/۲۳	روز اول
۱/۹۹	۴/۱۶	۵/۱۲	۶/۶۵	۷/۳۴	۲/۷۱	۷/۱۴	۶/۲۲	۴/۸۸	روز سوم
۲/۳۰	۵/۴۸	۵/۳۲	۳/۳۵	۶/۶۵	۵/۰۵	۱۲/۲۵	۵/۳۰	۴/۱۲	سناریو دو روز پنجم
۹/۸۸	۶/۰۳	۸/۰۸	۶/۸۲	۶/۳۲	۸/۱۵	۱۴/۰۳	۷/۸۲	۷/۰۶	روز هفتم
۱۱/۰۰	۹/۵۱	۱۱/۳۳	۷/۵۷	۷/۷۶	۹/۷۱	۱۵/۳۷	۱۱/۱۴	۸/۷۲	روز دهم
۵/۶۸	۶/۰۵	۵/۸۴	۵/۴۹	۶/۸۴	۲/۷۰	۶/۴۵	۶/۱۴	۸/۲۸	روز اول
۷/۵۲	۶/۷۸	۶/۸۵	۶/۶۵	۹/۰۷	۳/۹۶	۷/۳۶	۷/۷۸	۷/۳۲	روز سوم
۶/۴۴	۸/۱۱	۷/۱۸	۵/۸۱	۱۱/۰۹	۵/۴۷	۱۰/۰۷	۷/۶۰	۵/۷۲	سناریو سه روز پنجم
۸/۹۴	۱۰/۴۹	۶/۸۹	۷/۰۶	۱۱/۰۶	۶/۰۱	۹/۹۵	۱۱/۶۱	۱۱/۰۴	روز هفتم
۱۱/۲۴	۹/۰۵	۱۰/۱۲	۷/۷۵	۱۱/۰۶	۷/۰۶	۱۱/۴۷	۱۱/۸۶	۱۴/۷۷	روز دهم
۸/۰۸	۸/۶۴	۸/۱۱	۸/۱۳	۷/۹۱	۳/۳۳	۷/۷۴	۸/۳۳	۹/۸۰	روز اول
۱۰/۴۲	۱۰/۵۰	۱۰/۹۶	۱۰/۶۴	۸/۸۶	۴/۵۸	۸/۴۴	۹/۷۸	۹/۵۳	روز سوم
۱۰/۵۷	۹/۶۵	۱۱/۱۱	۱۰/۲۳	۸/۴۳	۹/۰۵	۱۰/۷۲	۱۱/۹۸	۱۰/۵۳	سناریو چهار روز پنجم
۱۱/۷۶	۱۱/۳۸	۱۱/۴۰	۷/۷۶	۱۲/۶۴	۱۰/۷۳	۱۱/۹۹	۱۲/۸۰	۱۶/۵۶	روز هفتم
۱۱/۹۶	۱۱/۳۷	۱۲/۷۷	۸/۲۳	۱۳/۴۱	۱۳/۲۵	۱۶/۲۸	۱۲/۵۹	۱۸/۷۵	روز دهم

رطوبت نسبت به مزرعه الف در روز سوم بعد از بارش در دوره ۷، سناریو یک به میزان ۰/۲۲ درصد رخ داد.

### نتیجه‌گیری کلی

با استفاده از داده‌های دقیق رطوبت مستخرج شده از دستگاه واسنجی شده TDR به بررسی شبیه‌سازی رطوبت خاک و جریان آب

بررسی جدول (۸) نشان داد که در سناریو سه و چهار درصد کاهش رطوبت در روزهای اول تا پنجم بیشتر از سایر سناریوهاست. در نتیجه عامل اصلی درصد کم کاهش رطوبت در روزهای ابتدایی بعد از بارش وجود لایه کفه شخم و عدم تخلیه رطوبت از این لایه است که با افزودن زهکش در این لایه حرکت آب به سمت زهکش‌ها تسهیل شد. بیشترین کاهش رطوبت در روز دهم بعد از بارش واقع در دوره ۹، سناریو چهارم به میزان ۱۸/۷۵ درصد و کمترین کاهش

کرد که مدل هم‌زمان با اعمال چند خروجی زهکش شبیه‌سازی مناسبی ارائه داد. مدل جهت اعمال مدیریت آب در مزرعه، ارزیابی سیستم‌های زهکشی و مدیریت در هنگام وقوع بارش‌های سنگین و سیلابی کاربرد دارد. با توجه به قابلیت مدل در شبیه‌سازی حرکت املاح، پیشنهاد می‌گردد مدل برای مدیریت انتقال نیترات بین زهکش‌ها استفاده شود.

### منابع

عباسی، ف. ۱۳۹۲. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ دوم. دانشگاه تهران: موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۲۵۰ ص.

گلایی، م، الباجی، م، ناصری، ع. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل HYDRUS-2D در پیش‌بینی هدایت الکتریکی و یون‌های پروفیل خاک (مطالعه موردی: کشت نیشکر تحت تنش شوری). نشریه علوم آب و خاک علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۳۱: ۳-۲۳۱-۲۴۱.

مختاری مطلق، پ، شاهنظری، ع، نوری امامزاده‌ئی، م. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی رطوبت خاک بین دو زهکش زیرزمینی در اراضی شالیزاری با مدل HYDRUS-2D. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲: ۱-۹۳-۱۰۷.

Ahmadi, M. Z. 1999. Use of piezometers to find the depth to impermeable layer in the design of drainage systems. *Journal of Hydrological Sciences*. 44.1: 25-31.

Aimrun, M., Amin, M. S. M and Eltaib, S. M. 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Journal of Geo derma*. 121: 197-203.

Akay, O., Fox, G.A and Simunek, J. 2008. Numerical simulation of flow dynamics during macropores-subsurface drain interactions using HYDRUS. *Vadose Zone*. 7.3:909-918.

Darzi, A., Mirlatifi, M., Shahnazari, A., Ejlali, F and Mahdian, M.H., 2012. Influence of surface and subsurface drainage on rice yield and its component in paddy fields. *Journal of Water research in agriculture*. 26: 1, 61-71.

Darzi-Naftchali, A and Shahnazari, A. 2014. Influence of subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields. *European Journal of Agronomy*, 56:1-8.

Ebrahimian, H and Noory, H. 2015. Modeling paddy field subsurface drainage using HYDRUS -2D. *Journal of Paddy and Water Environment*. 13.4:477-485.

Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Abbasi, F and Navabian, M. 2012. Comparison of one- and

در اراضی شالیزاری برای کشت دوم پرداخته شد. مزرعه پژوهشی تحت کشت کلزا و خاک مزرعه به‌صورت مطبق با شش لایه و یک‌لایه برای پوشش دور زهکش در نظر گرفته شد نتایج نشان داد که مدل HYDRUS نسبت به رطوبت حجمی اشباع دارای حساسیت زیاد می‌باشد. در این پژوهش دو و سه خروجی هم‌زمان از دو مزرعه با مدل HYDRUS شبیه‌سازی و ارزیابی شد. نتایج ارزیابی و صحت سنجی نشان داد که مدل HYDRUS 2D/3D از دقت کافی و لازم برای برآورد رطوبت در اراضی شالیزاری دارای زهکشی برخوردار است. مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی نتایج قابل قبولی ارائه داد. شبیه‌سازی سطح ایستابی مدل HYDRUS 2D/3D برای زهکش تک عمقی نسبت به سیستم دو عمقی نتایج بهتری را نشان داد. در این مطالعه قوس ایجادشده توسط مدل در قسمت اشباع با سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در چاهک‌ها همخوانی داشت. مدل توانست بارش‌های متفاوت رخ داده شده در طول دوره را به‌خوبی شبیه‌سازی کند که قابلیت مدل را در شبیه‌سازی افت و خیز سطح ایستابی، قبل و بعد از بارش نشان داد. بررسی داده‌های میدانی نشان داد که عملکرد مزرعه الف (زهکش تک عمقی) در بارش‌های بیش از ۲۰ میلی‌متر ضعیف بود. مزرعه ب در کاهش سطح ایستابی و در نتیجه تخلیه رطوبت در این لایه نتایج بهتری نسبت به مزرعه الف نشان داد. برای بررسی راهکار مدیریت انتقال رطوبت بین زهکش‌ها و تخلیه سریع‌تر رطوبت در لایه اول، چهار سناریو در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که زهکش موجود در عمق ۴۰ سانتی‌متری عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مزرعه ب و زهکش در عمق ۹۰ سانتی‌متری داشت. از دلایل این امر می‌توان به اعمال زهکش در لایه کفه شخم در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری اشاره نمود. نتایج سناریوی دو و مزرعه ب نزدیک به یکدیگر بود. این امر نشان داد که عامل اصلی ممانعت از تخلیه رطوبت لایه اول، وجود لایه کفه شخم است. نتایج بررسی سناریو سه و چهار نشان داد که وجود دو زهکش میانی اثر بخشی بیشتری نسبت به افزودن یک زهکش میانی و یا کاهش فاصله بین زهکش‌ها داشت. به طور کلی نتایج نشان داد که بهترین محل برای جای‌گذاری زهکش میانی، دقیقاً بعد از لایه کفه شخم است و اعمال دو زهکش میانی در این لایه باعث تخلیه سریع‌تر رطوبت از لایه اول خاک مزرعه شده و زمان رسیدن رطوبت به حد ظرفیت زراعی را نسبت به سایر سناریوها به چهار روز کاهش داد. مدل در اراضی زراعی برای شبیه‌سازی و انتقال رطوبت بین زهکش‌ها به‌شرط تعریف شرایط مرزی مناسب و واسنجی دقیق کاربردی می‌باشد و می‌توان سطح ایستابی بین زهکش‌ها را بر اساس رطوبت اشباع از مدل استخراج کرد. مدل HYDRUS 2D/3D می‌تواند شبیه‌سازی انتقال رطوبت بین دو زهکش را بررسی و برای مدیریت انتقال رطوبت بین زهکش‌ها کاربرد دارد. همچنین می‌توان با اعمال بارش‌های سنگین در مدل زمان تخلیه رطوبت و افت سطح ایستابی را کنترل کرد. نتایج بیان

- Mekong Delta. Materials, reports and documents of Department of Water Resources, Hanoi Agriculture University, Hanoi, Vietnam.
- Ouyang, Y and Boersma, L. 1992. Dynamic oxygen and carbon dioxide exchange between soil and atmosphere: II. Model simulations. *Journal of Soil Science*. 56:1702-1710.
- Salehi, A. A., Navabian, M., Varaki, M. E 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. *Journal of Paddy and Water Environment*. 15.2:433-442.
- Simunek, J., Senja, M and Van Ghenuchten, M. Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0, IGWMC-TPS-70, Int. Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co. 251 P.
- Simunek, J., van Genuchten, M and Sejna, M. Th. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone*.7:587-600.
- Tabuchi, T. 2004. Improvement of paddy field drainage for mechanization. *Journal of Paddy and Water Environment*, 2.1:5-10.
- Wang, F. X., Kang, Y and Liu, S. P. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in north China Plain. *Journal of Agricultural Water Management*, 79: 248-264.
- Wang, Y., Zhang, B., Lin, L. and Zepp, H. 2011. Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China. *Journal of Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140 (3-4), 441-453.
- Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Journal of American Meteorological Society*. 63.11:1309-1313.
- Yousfi, A., mechergui, M and Ritzema, H. 2014. A drain-spacing equation that takes the horizontal flow in the unsaturated zone above the groundwater table into account. *Journal of Irrigation and Drainage*. 63: 373-382.
- two dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138.10: 929-938.
- Gee, G.W and Bauder, j. w. 1986. Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis*. 2<sup>nd</sup> ed. Klute, A. (eds). Agron. Monogr. 9. ASA. Madision. WI. 411-383
- Jafari-Talukolaee, M., Shahnazari, A., Ahmadi, M. Z. and Darzi-Naftchali, A. 2015. Drain Discharge and Salt Load in Response to Subsurface Drain Depth and Spacing in Paddy Fields. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(11):1-7.
- Jamal, I. H., Bari, A., Khan, S and Zada, I. 2009. Genetic variation for yield and yield components in rice. *Journal of Agricultural and Biological Science*. 4:60-64.
- Jung, K. Y., Yun, E. S., Park, K. D., Lee, Y. H., Hwang, J. B., Park, C. Y. and Ramos, E. P. 2010. Effect of subsurface drainage for multiple land use in sloping paddy fields. In: *19th Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*, Brisbane, Australia.
- Kandelous, M. M and Simunek, J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface subsurface drip irrigation. *Journal of Irrigations Science*, 28:435-444.
- Karandish, F., Darzi-Naftchali, A and Šimunek, J. 2017. Application of HYDRUS-2D for predicting the influence of subsurface drainage on soil water dynamics in a rainfed-canola cropping system. *13th International Drainage Workshop of ICID*, Ahwaz, Iran.
- Legates, D. R. and McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Journal of Water Resources Research*. 35:233-241.
- Liu, H. F., Genard, M., Guichard, S and Bertin, N. 2007. Model assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *J. of Experimental Botany* 58.13:3567-3580.
- Nash, J.E and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting thorough conceptual models, A discussion of principles. *Hydrology*. 10:282-290.
- Nguyen, D. B. 2007. Irrigation of Paddy Fields in

## Soil Moisture Management for Determination of Depth and Space of Drainages in Second Cropping of Paddy by Using HYDRUS 2D/3D Model

P. Mokhtari Motlagh<sup>1</sup>, A. Shahnazari<sup>2\*</sup>, M.R. Nouri Emamzade<sup>3</sup>

Recived: Nov.15, 2018

Accepted: Jan.07, 2019

### Abstract

Depletion of excess soil moisture from root zone is one of the objectives of the implementation of drainage systems. In this study the ability of HYDRUS 2D/3D model to soil moisture transport management for determining of depth and space of drains in second cropping of paddy fields of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in For the three growing season (2014-2017) is assessed. So, two kinds of fields were constructed: Field A with subsurface drainage systems and drain depth of 0.9 m and drain spacing of 30 m and field B having drain spacing of 15 m and alternate drain depths of 90, 65 and 90 cm. Sensitivity analysis and calibration were first performed with the aim of verifying the HYDRUS model. The sensitivity analysis indicated that the software had maximum sensitivity to the saturated volumetric water content. Four scenarios were considered for field A in HYDRUS model which consist of: middle drain in 1- the depth of 40, 2- in the depth of 90, 3- two middle drains in the drain of 40 and 4- two middle drains of 65 cm. Scenario 4, 3, 2 in field B and scenario 1 showed the maximum of soil moisture depletion respectively. The maximum loss of soil moisture was observed in scenario 4 by 18.75 percent and minimum loss of soil moisture was occurred in scenario 1 by 0.22 percent. Also, evaluation of results showed that scenario 3 and scenario 4 depleted the soil moisture during the period of 2-days and 4-days, respectively earlier in respect to of first level of soil and reached to field capacity. Also, results showed that scenario 4 is the best in contrast to scenario 1 which has the worst.

**Key words:** Field Capacity, Plough layer, Scenario, Water Level

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari -Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari -Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord - Iran

(\* - Corresponding Author Email: aliponh@yahoo.com)