

## شبیه‌سازی رطوبت خاک بین دو زهکش زیرزمینی در اراضی شالیزاری با مدل HYDRUS-2D

پیمان مختاری مطلق، علی شاهنظری<sup>۱\*</sup> و محمدرضا نوری امامزاده‌ئی

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

peymokhtari@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

Aliponh@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد.

nouri1351@yahoo.com

### چکیده

بررسی انتقال رطوبت خاک بین دو زهکش و روند تغییرات رطوبتی در محیط اطراف ریشه دارای اهمیت بسیاری می‌باشد. مدل HYDRUS-2D با به‌کارگیری معادلات بقای جرم، علاوه بر تسریع در نتایج، موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود. در این مطالعه سیستم زهکشی زیرزمینی با عمق ۰/۹ متر و فاصله ۳۰ متر با عمق آب زیرزمینی ۵۰ سانتی‌متر در طول فصل کشت کلزا به‌عنوان کشت دوم در اراضی شالیزاری شهرستان ساری مورد بررسی قرار گرفت. پروفیل خاک تا عمق دو متری در نظر گرفته شد و شش لایه برای خاک تعریف شد. هدایت هیدرولیکی خاک برای هر لایه خاک از روش پیزومتر و با رابطه کرکهام محاسبه و برای هر لایه، از سطح خاک تا عمق دو متری برابر ۰/۸، ۰/۱۱، ۰/۲۹، ۰/۱۶، ۰/۳۸ و ۰/۰۸۳ متر بر روز شد. سایر پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مدل از جمله بارش، خروجی زهکش‌ها و رطوبت روزانه اندازه‌گیری گردید. برای واسنجی مدل، داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده سطح ایستابی بین دو زهکش مقایسه شد. مدل برای یک دوره اشباع خاک صحت‌سنجی شد. رطوبت‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده آن برای ارزیابی مدل مقایسه شد. میانگین آماره‌های ارزیابی مربعات خطا، ضریب تعیین، جذر و میانگین انحراف، درصد خطا و راندمان مدل به ترتیب برابر  $0.0214 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ،  $0.932$ ،  $0.0407 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ،  $0.079$  و  $0.525$  شد. آماره‌ها نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی مدل رضایت‌بخش بود.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی خاک، کلزا، معادله ریچاردز، رابطه کرکهام

۱- آدرس نویسنده مسئول: ساری، گروه مهندسی آب دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

\*- دریافت: مرداد ۱۳۹۶ و پذیرش: دی ۱۳۹۶

## مقدمه

۲۰۰۷). سیستم‌های زهکشی زیرزمینی، باعث کاهش سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از ایجاد شرایط غرقابی و ماندابی می‌شود و شرایط مناسبی را برای بهره‌برداری پایدار و دائمی از اراضی شالیزاری فراهم نموده‌اند و باعث کاهش هدر رفت این اراضی به علت عدم نیاز به احداث زهکش‌های مازاد سطحی شده‌اند (شاهنظری و همکاران، ۱۳۸۹). نصب سیستم زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری، قدمت زیادی در جهان ندارد و به‌طور عمده در کشورهای جنوب شرقی آسیا مورد استفاده قرار گرفته است (پذیرا، ۱۳۸۷).

در سال‌های اخیر مدل‌های بسیاری برای شبیه‌سازی حرکت آب ارائه شده که نرم افزار HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۸) یکی از با ارزش‌ترین این مدل‌ها است. در مطالعات فراوان آزمایشگاهی و مزرعه‌ای برای شبیه‌سازی یا برآورد معکوس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از مدل HYDRUS-2D استفاده کردند (عباسی و همکاران، ۲۰۰۳ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین از مدل HYDRUS-2D برای بررسی توزیع رطوبت و بررسی مکش در خاک استفاده شد (فیلیپوی و همکاران، ۲۰۱۴؛ سیال و همکاران، ۲۰۰۹ و اسکگز و همکاران، ۲۰۰۴). جریان آب و انتقال املاح به سمت زهکش در مدل HYDRUS-2D توسط محققان کدگذاری شده است (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۸). در مطالعه‌ای، یک معادله زهکشی برای جریان افقی در منطقه غیراشباع بالای سطح ایستابی ارائه شد و معادله به دست آمده با معادله هوخهات توسط مدل HYDRUS-2D مقایسه گردید و مشخص شد مدل کارایی مطلوبی دارد (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۴). زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری با HYDRUS-2D توسط محققان مدل‌سازی شد. آن‌ها از مدل HYDRUS-2D به‌عنوان یک ابزار در طراحی سیستم‌های زهکشی استفاده کرده و بیان کردند که مدل از کارایی خوبی برخوردار است (ابراهیمیان و نوری، ۲۰۱۵).

وجود آب اضافی در خاک اطراف ریشه، رشد گیاه را مختل می‌سازد و ماندابی شدن طولانی مدت به علت فقدان اکسیژن کافی در ناحیه ریشه موجب مرگ گیاه می‌گردد. عملکرد محصول به مقدار چشم‌گیری در خاک‌های با زهکشی ضعیف کاهش می‌یابد. زهکشی از اجزای حیاتی و ضروری بخش کشاورزی و عنصری مهم در تولید محصولات است (بی‌نام، ۱۳۸۰). به‌علت رشد جمعیت جهان و محدودیت منابع آب، کشاورزی باید در جهت تولید محصول بیشتر با میزان آب کمتر حرکت کند که فهم حرکت آب در خاک و سازوکار جذب آب توسط ریشه می‌تواند کمک بسیاری در این زمینه باشد. شبیه‌سازی عددی راه حل مؤثر در بهینه‌سازی مدیریت آب در مزرعه می‌باشد (مشکات و همکاران، ۱۹۹۹، اسپچیتز و همکاران، ۲۰۰۲). برنج یکی از عمده محصولات غذایی در ایران است.

در اراضی شالیزاری به دلیل وجود بافت خاک سطحی سنگین، زهکشی زیرسطحی علاوه بر زهکشی سطحی برای کشت دوم لازم است (شاهنظری و همکاران، ۱۳۸۹؛ ابراهیمیان و نوری، ۲۰۱۵ و توباچی، ۲۰۰۴). از طرفی بارش باران در طول برداشت محصول (اواخر تابستان و پاییز) در اراضی شالیزار، موجب می‌شود تا ماشین‌آلات سنگین کشاورزی مانند کمباین و تراکتور به علت بافت سنگین و زهکشی ضعیف نتوانند به‌راحتی در خاک حرکت کنند و به علت ظرفیت باربری پایین، بهره‌وری کار بیش از حد کم شود. برای رفع این معضل و همچنین تولید محصولات غیر برنج مانند کلزا پس از برداشت برنج برای کشت فصل دوم در مزارع شالیزاری در راستای درآمدزایی کشاورزان مستلزم خروج بیشتر زهاب از مزرعه می‌باشد. استفاده از زهکشی سطحی تقویت شده علاوه بر حفاظت از محصولات در برابر جاری شدن سیل در بارش‌های شدید می‌تواند از طریق زهکشی زیرسطحی مشکل فاسد شدن ریشه و توقف رشد محصولات غیر برنج را مرتفع کند (اوگیتو و اوتا،

مواد معدنی بود. کشت انجام شده بر روی مزرعه مورد مطالعه کلزا بوده که بذر کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) به میزان شش کیلوگرم در هکتار در تاریخ پنجم آبان ماه ۱۳۹۳ کشت و در ۱۹ اردیبهشت ۹۴ (طول دوره رشد ۱۹۵ روز) برداشت شد. به منظور تعیین میزان رطوبت خاک در بین دو زهکش ۱۱ عدد لوله دسترسی دستگاه رطوبت سنج<sup>۱</sup> با فواصل صفر (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی متر)، ۰/۵، ۱/۵، ۴، ۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۲۶، ۲۸/۵، ۲۹/۵، ۳۰ (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی متر) متر نصب شد. علت نصب لوله‌های دسترسی در کل فاصله ۳۰ متر بین دو زهکش، متفاوت بودن رطوبت در هر نقطه و عدم تقارن رطوبت در نیمه فاصله زهکش بود. فواصل لوله‌های دسترسی در نزدیکی خط زهکش، به لحاظ تغییرات سریع تر رطوبت، کمتر و با افزایش فاصله از زهکش، فاصله لوله‌ها افزایش یافت. لوله‌های دسترسی به عمق حدود یک متر بوده که موجب شد تا رطوبت خاک در چهار عمق بین فواصل ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۷۰-۶۰ سانتی متر اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری رطوبت از روز ۱۷ دی ماه سال قبل از بارش باران برای تعیین رطوبت اولیه آغاز و قرائت‌ها هر روز یک‌بار (در ساعت ۱۰ صبح) انجام شد. در شکل ۱ شماتیک مزرعه مورد مطالعه و فواصل لوله‌های دسترسی رطوبت سنج گنجانده شد.

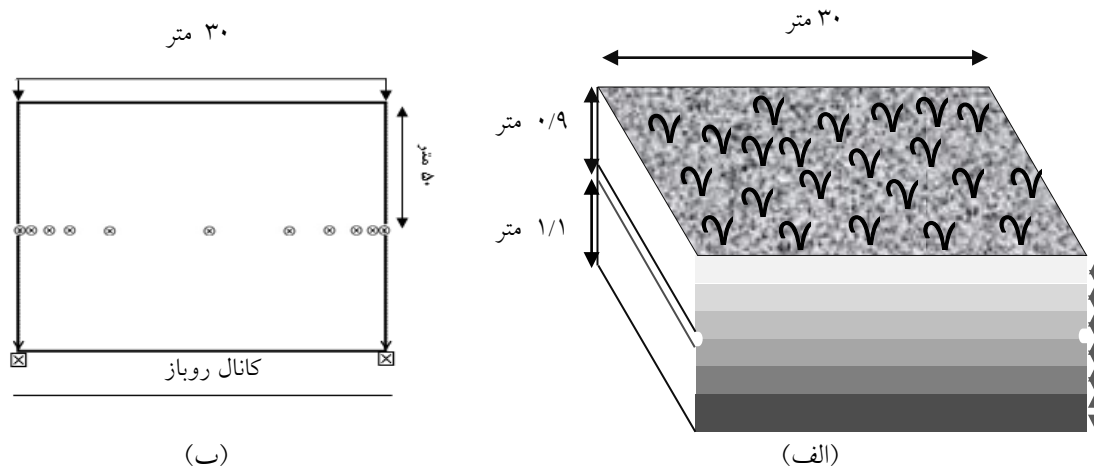
برای واسنجی دستگاه رطوبت سنج TDR TRIME-FM، نمونه‌های خاک در فواصل مختلف از زهکش‌ها برداشت شد. دستگاه رطوبت سنج با تانک شن مخصوص دستگاه واسنجی شد. برای واسنجی دقیق تر دستگاه رطوبت سنج در سطح مزرعه بیش از ۷۰ نمونه خاک در فواصل و اعماق مختلف برداشت شد. رطوبت‌های حجمی اندازه‌گیری شده دستگاه با رطوبت‌های برداشتی مقایسه و رابطه واسنجی رطوبت به شرح شکل ۲ حاصل شد. در هر بار برداشت رطوبت با دستگاه، رطوبت با رابطه شکل ۲ واسنجی شده و مورد بررسی قرار گرفت.

کاراندیش و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای تحت عنوان کاربرد مدل HYDRUS-2D دوبعدی برای پیش‌بینی تأثیر زهکش زیرزمینی در پویایی آب خاک در محصولات کلزا تحت بارش عملکرد مدل HYDRUS-2D را در بررسی دبی خروجی زهکش‌ها را با استفاده از ضریب 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. صالحی و همکاران (۲۰۱۷) مدل HYDRUS-2D را برای شبیه‌سازی آبشویی نترات در مدل‌های فیزیکی مورد ارزیابی قرار دادند. مدل‌های فیزیکی دارای زهکش بوده و کشت برنج در آن‌ها انجام شد. آن‌ها از مدل HYDRUS-2D برای بررسی دبی خروجی زهکش‌ها در زهکشی میان فصل برنج استفاده شد که نتایج آن‌ها نشان از قابلیت مدل در شبیه‌سازی دبی خروجی بود.

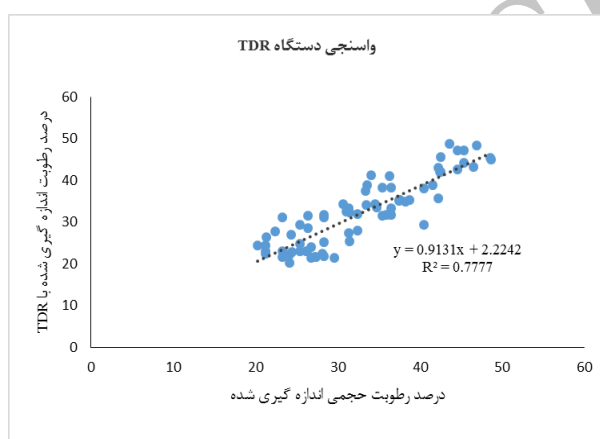
بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی انتقال رطوبت در اراضی شالیزاری که دارای سیستم زهکشی زیرزمینی در سطح مزرعه، استفاده نشده است. لذا در این مطالعه مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی انتقال رطوبت بین دو زهکش در سیستم زهکشی زیرزمینی برای کشت دوم (کلزا) در اراضی شالیزاری ارزیابی شد.

## مواد و روش‌ها

مطالعه در مزرعه پژوهشی اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال زراعی ۹۴-۹۳ انجام شد. عرض و طول جغرافیایی منطقه به ترتیب ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ درجه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵- متر است. اقلیم منطقه بر اساس روش تعیین اقلیم دومارتن، از نوع مرطوب است (درزی و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعه بر روی سطح ۰/۳ هکتار که دارای سیستم زهکشی زیرزمینی انجام شد. فاصله بین لوله‌های زهکش ۳۰ متر و عمق نصب زهکش برابر ۰/۹ متر و پوشش روی لوله زهکش از



شکل ۱- (الف) شماتیک موقعیت لایه‌های خاک مزرعه مورد مطالعه، (ب) موقعیت استقرار لوله‌های رطوبت‌سنج (⊗ محل نصب لوله‌های دستگاه؛ که به ترتیب از راست به چپ در فواصل صفر (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی‌متر)، ۰/۵، ۱/۵، ۴، ۷/۵، ۱۵، ۲۲/۵، ۲۶، ۲۸/۵، ۲۹/۵، ۳۰ (روی زهکش با عمق ۹۰ سانتی‌متر) نصب شد و ⊠ خروجی زهکش)



شکل ۲- منحنی و رابطه واسنجی دستگاه رطوبت‌سنج

بسته بودن انتهای آن، هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده، هدایت هیدرولیکی افقی در نظر گرفته شد (احمدی، ۱۹۹۹). با مشخص شدن مقادیر هدایت هیدرولیکی می‌توان عمق لایه نفوذناپذیر را تعیین کرد. ابتدا آب داخل پیزومتر تخلیه شده و سرعت بالا آمدن سطح ایستابی درون پیزومتر یادداشت شد (۱). اندازه‌گیری‌ها در فصل پاییز و زمستان و زمانی که سطح ایستابی بالاست انجام گرفت. کرکهام با حل معادله لاپلاس و پذیرفتن فرضیه‌هایی که برای روش چاهک در نظر گرفته شده، معادله (۱) را برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه کرد:

$$K = \frac{864\pi(D/2)^2 \ln(y_1/y_2)}{A(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

در این رابطه:

برای تعیین بافت خاک از لایه‌های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰، ۹۰-۱۲۰، ۱۲۰-۱۵۰، ۱۵۰-۲۰۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. نمونه‌های خاک گرفته شده در آزمایشگاه پس از خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده و با استفاده از روش هیدرومتری نوع بافت خاک مشخص شد. به‌منظور اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه‌های مختلف از خاک مزرعه پیزومترهایی در عمق‌های ۰/۴، ۰/۶۵، ۰/۹، ۱/۲، ۱/۵ و ۲ متری و با فاصله‌های یک متر از یکدیگر، در وسط فاصله دو زهکش نصب شده‌اند. سپس هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه‌های مختلف اندازه‌گیری شد که به دلیل وجود حفره در دیواره ۱۰ سانتی‌متر انتهایی پیزومتر و

هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)،  $D$  قطر حفره زیر لوله (سانتی‌متر)،  $y_1$  فاصله بین سطح آب در پیژومتر تا سطح ایستابی متعادل (سانتی‌متر) در لحظه  $t_1$  (ثانیه)،  $y_2$  فاصله بین سطح آب در پیژومتر تا سطح ایستابی متعادل (سانتی‌متر) در لحظه  $t_2$  (ثانیه) ضریب شکل (سانتی‌متر) است (۱). اندازه‌گیری‌ها بعد از بارندگی و در شرایط اشباع خاک صورت گرفت که در جدول ۱ نتایج ارائه شد.

جدول ۱- مشخصات خاک مزرعه و هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در هر لایه از سطح زمین تا عمق دو متری

شماره لایه	عمق خاک (سانتی‌متر)	درصد شن	درصد سیلت	درصد شن	بافت	هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر روز)
۱	۰-۳۰	۴۹	۴۴	۷	سیلتی رسی	۰/۸
۲	۳۰-۶۰	۵۵	۴۲	۳	سیلتی رسی	۰/۱۱
۳	۶۰-۹۰	۴۶	۴۶	۸	سیلتی رسی	۰/۲۹
۴	۹۰-۱۲۰	۴۲	۵۲	۶	سیلتی رسی	۰/۱۶
۵	۱۲۰-۱۵۰	۵۲	۴۲	۶	سیلتی رسی	۰/۳۸
۶	۱۵۰-۲۰۰	۵۹	۳۵	۶	رس	۰/۰۸۳

نرم‌افزار کراپ وات محاسبه شد. جدول ۲ بارش برای دوره بررسی در طول فصل رشد را نشان داد.

مدل HYDRUS-2D بسته نرم‌افزاری تحت سیستم عامل ویندوز است که می‌تواند به صورت عددی حرکت آب، انتقال املاح و گرما را در شرایط دوبعدی در منطقه‌ی اشباع و غیراشباع و در حالت افقی، عمودی و شعاعی شبیه‌سازی کند. در این مدل برای حل عددی معادلات حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین<sup>۱</sup> و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ-مارکواریت<sup>۲</sup> استفاده شده است. معادله حرکت آب بر پایه‌ی حل معادله‌ی دوبعدی ریچاردز صورت گرفته شد (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹).

در تحقیقات زهکشی به‌طور معمول به لایه یا افقی از خاک که ضریب آبگذری آن ۰/۱ تا ۰/۲ میانگین وزنی ضرایب آبگذری لایه‌های بالایی باشد، لایه نفوذ ناپذیر گفته می‌شود (بای‌بوردی، ۱۳۷۸). مطابق جدول ۱، لایه ۲۰۰ سانتی‌متری به پایین را می‌توان لایه نفوذناپذیر برای لایه‌های فوقانی در نظر گرفت. عمق لایه نفوذناپذیر در شبیه‌سازی مدل دو متر لحاظ شد. برای بررسی نوسانات سطح ایستابی از چاهک‌های مشاهده‌ای استفاده شد که در وسط طول زهکش (۵۰ متر فاصله از زهکش روباز)، شش چاهک در عمق ۰/۹ متر به فاصله‌های ۰، ۱، ۳، ۶، ۱۰ و ۱۵ متر برای زهکش‌های با فاصله زهکش ۳۰ متر نصب شد. از طرفی بررسی هدایت هیدرولیکی محاسبه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که در لایه ۳۰-۶۰ سانتی‌متری لایه کفه شخم<sup>۱</sup> وجود دارد که بر روی الگوی جریان آب به سمت زهکش‌ها و سطح ایستابی تأثیرگذار است (گارگ و همکاران، ۲۰۰۹). 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 جمع-آوری و تبخیر و تعرق کلزا از روش پنمن-مانتیش و با

1- Galerkin  
2- Marquardt-Levenberg

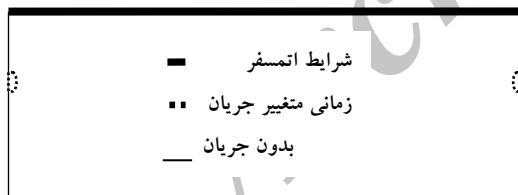
1- Hard pan

جدول ۲- بارش روزانه (میلی‌متر) در طول کشت کلزا برای دوره مورد مطالعه

تاریخ	بارندگی	تاریخ	بارندگی	تاریخ	بارندگی	تاریخ	بارندگی
۱۱ آبان	۲/۵	۷ آذر	۳/۲	۱۵ بهمن	۲/۱	۴ اسفند	۴
۱۲ آبان	۳۱/۶	۸ آذر	۶/۷	۱۶ بهمن	۳/۴	۷ اسفند	۸/۳
۱۳ آبان	۲/۶	۱۱ آذر	۲۸/۳	۲۲ بهمن	۲/۳	۱۳ اسفند	۴۸/۴
۲۷ آبان	۲/۲	۲۵ آذر	۷/۱	۲۳ بهمن	۳	۱۴ اسفند	۸/۵
۲۸ آبان	۱۷/۵	۱۸ دی	۱۹/۱	۱ اسفند	۴/۵	۱۷ اسفند	۹/۴
۲ آذر	۶/۱	۳ بهمن	۵/۶	۲ اسفند	۸	۲۴ اسفند	۸/۶
۵ آذر	۳/۳	۱۰ بهمن	۶/۴	۳ اسفند	۱۰/۷	۲۶ اسفند	۷/۹
مجموع	۱۱۸/۶	مجموع	۹۳/۵	مجموع	۴۶	مجموع	۹۵/۱

### شرایط اولیه و مرزی تعریف شده به مدل

کشت کلزا در مزرعه به صورت دیم است، از این رو برای مرز بالای مدل شرایط اتمسفر<sup>۳</sup> در نظر گرفته شد تا بارش‌های مدنظر بر اساس تاریخ در مدل اعمال شود. همچنین به علت فرض عمق دو متری به‌عنوان 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>۴</sup> لحاظ شد. برای دور دو لوله زهکش نیز خروجی زهکش با شرط مرزی زمانی متغیر جریان<sup>۵</sup> در نظر گرفته شد. در شکل ۳ شرایط مرزی اعمال شده در مدل را نشان داده شد. رطوبت اولیه خاک پس از اندازه‌گیری با دستگاه رطوبت‌سنج به‌صورت خطی به مدل وارد شد.



شکل ۳- شرایط مرزی اعمال شده در مدل

مش بندی برای هفت لایه که شامل شش لایه ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰، ۹۰-۱۲۰، ۱۲۰-۱۵۰، ۱۵۰-۲۰۰ و یک لایه پوشش معدنی دور لوله زهکش اعمال شد. از پوشش معدنی دور دو لوله زهکش (شن و ماسه)، استفاده شد.

- 6- Atmospheric boundary
- 7- No flux boundary
- 8- Time variable boundary condition

### مدل تحلیلی مورد استفاده در HYDRUS-2D

مدل تابع ون گنوختن<sup>۱</sup> است که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت و به‌صورت معادله ۲ و ۳ ارائه شد (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$k(h) = k_s s_e^l \left[ 1 - (1 - s_e^{l/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

در این رابطه:

$m=1-(1-n)$  و  $n>1$  می‌باشد. فرض اولیه پارامترها بر اساس مدل رزتا<sup>۲</sup> موجود در نرم افزار HYDRUS-2D به دست آمد.  $S_e$  اشباع نسبی،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده  $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ،  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک  $(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ،  $k_s$  هدایت هیدرولیکی  $(\text{cm}/\text{day})$  اشباع،  $\alpha$   $(1/\text{cm})$  عکس مقدار فشار در نقطه ورود هوا،  $n$  شاخص توزیع اندازه خلل و فرج و  $l$  پارامتر مربوط به اتصال خلل و فرج می‌باشد. پارامترهای  $\alpha$ ،  $n$  و  $l$  در مدل HYDRUS-2D ضرایب تجربی بدون بعد هستند که به خلل و فرج خاک وابسته‌اند که مدل HYDRUS-2D این قابلیت را دارد که با استفاده از مدل رزتا و از طریق ورود درصدهای سیلت، رس و شن تخمین اولیه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی در اختیار کاربر قرار دهد.

- 4- Van Genuchten
- 5- ROSETTA

است. داده برداری از روز ۱۳۰ تا ۱۴۴ بعد از کشت تا تثبیت خروجی زهکش‌ها ادامه یافت.

ارزیابی مدل با مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با آماره‌های (EF) راندمان مدل (نش و استکلیف، ۱۹۷۰)، (PE) درصد خطا،  $(R^2)$  ضریب تعیین (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶)، (RMSE) جذر مربعات خطا (ویلموت، ۱۹۸۲) و (AD) میانگین انحراف یا میانگین خطای مطلق (لگاتس و مک‌کابه، ۱۹۹۹) مطابق روابط ۴ تا ۸ انجام شد.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - O_i))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (5)$$

$$PE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (6)$$

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

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (8)$$

در این روابط:

$O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقدار مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده در زمان  $t$ ،  $n$  تعداد مشاهدات،  $\bar{O}$  متوسط مقادیر مشاهده شده در طول دوره زمانی و  $\bar{P}$  متوسط مقادیر پیش‌بینی شده در طول دوره زمانی است. آماره‌های (EF)، راندمان مدل را بیان می‌کند که دارای محدوده تغییرات بین منفی بینهایت تا یک بوده و بهترین مقدار آن برابر یک است. مقادیر صفر تا یک نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی بهتری در مقایسه با میانگین مشاهده‌ها داشته و مقادیر منفی نشان

ضخامت پوشش معدنی 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 که در مش‌بندی اعمال شد.

### واسنجی مدل

برای واسنجی مدل از سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در چاهک‌های مشاهده‌ای و سطح اشباع در خروجی مدل استفاده شد. در اراضی زهکشی رطوبت اولیه در خاک به علت قوس حاصل از سطح ایستابی نمی‌توان لایه‌ای در نظر گرفت. تنها در دو صورت می‌توان رطوبت را خطی در نظر گرفت؛ یکی در زمانی که به علت عدم بارش سطح ایستابی افت نموده و در هر لایه ثابت باشد و دیگری در زمانی که بعد از بارش سنگین سطح ایستابی با سطح خاک برابری کند و سطح ایستابی افقی گردد. در این مطالعه از حالت اول برای واسنجی و از حالت بارش سنگین برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل روز ۱۸ دی‌ماه سال ۹۳ (روز ۷۳ بعد از کشت) با بارش ۱۹/۱ میلی‌متر انتخاب شد. بدین علت که بعد از تاریخ ۲۵ آذرماه (مطابق جدول ۲) بارشی صورت نگرفت. داده‌برداری به مدت چهار روز تا تثبیت خروجی‌های زهکش ادامه یافت. در نتیجه رطوبت اولیه بین دو زهکش به صورت خطی در هر لایه لحاظ گردید. پارامترهای هیدرولیکی خاک با مدل ون گنوختن-معلم در نرم افزار HYDRUS-2D واسنجی شد.

### صحت‌سنجی مدل

مدل واسنجی شده برای دوره‌ای با بارش سنگین صحت‌سنجی شد. با بارش سنگین 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

بیشترین مقدار آن برابر صفر است و مقادیر کمتر نشان دهنده عملکرد بهتر است (لگاتس و مک‌کابه، ۱۹۹۹).

## نتایج و بحث

### واسنجی مدل

مدل HYDRUS-2D این قابلیت را دارد که با استفاده از مدل رزتا و از طریق ورود درصدهای سیلت، رس و شن تخمین اولیه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی در اختیار قرار دهد. بر همین اساس مقادیر تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی حاصل و مدل اجرا شد. بین سطح اشباع شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D 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 گردید. سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک بر اساس سعی و خطا و با توجه به بیشینه و کمینه مقادیر آن‌ها (بای بوردی، ۱۳۷۲ و عباسی، ۱۳۸۶) لحاظ گردید. پارامترهای هیدرولیکی خاک واسنجی شد. پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک در جدول ۳ شرح داده شد.

دهنده پیش‌بینی ضعیف‌تر مدل نسبت به میانگین مشاهدات است. راندمان یک معرف مدل کامل است. (نش و استکلیف، ۱۹۷۰). آماره (PE)، درصد خطا را نشان می‌دهد و برابر با نسبت کل اختلاف‌ها به مجموع مقادیر مشاهده‌ای است که مقادیر آن بین منفی صد تا بینهایت می‌باشد. بهترین مقدار آن برابر صفر است و هرچه مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، بیان‌کننده این است که مدل گرایش کمتری به تخمین بالاتر یا پایین‌تر دارد. ضریب تعیین ( $R^2$ )، رابطه کمی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی 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 (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). آماره جذر مربعات خطا (RMSE)، معیاری برای برآورد انحراف معیار خطای شبیه‌سازی 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 (ویلومت، ۱۹۸۲). آماره میانگین انحراف یا میانگین خطای مطلق (AD)، متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. محدوده تغییرات این آماره از صفر تا بینهایت است.

جدول ۳- پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده ورودی مدل

*Ks (cm/day)	پارامترهای هیدرولیکی خاک				$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	عمق لایه (cm)	شماره لایه
	l	n	$\alpha$ (1/cm)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )			
۸۰ (جدول ۱)	۰/۵	۱/۶	۰/۰۵۹	۰/۴۸۱	۰/۱۱	۰-۳۰	۱
۱۱ (جدول ۱)	۰/۵	۱/۶۲	۰/۰۶۴	۰/۴۷۵	۰/۱۴	۳۰-۶۰	۲
۲۹ (جدول ۱)	۰/۵	۱/۶۸	۰/۰۶۸	۰/۴۸	۰/۱۳	۶۰-۹۰	۳
۱۶ (جدول ۱)	۰/۵	۱/۷۱	۰/۰۶۵	۰/۴۸	۰/۱۲	۹۰-۱۲۰	۴
۳۸ (جدول ۱)	۰/۵	۱/۷۴	۰/۰۶	۰/۴۸	۰/۱۱	۱۲۰-۱۵۰	۵
۸/۳ (جدول ۱)	۰/۵	۱/۶۳	۰/۰۵۸	۰/۴۸	۰/۱۰	۱۵۰-۲۰۰	۶
۱۱۲	۰/۵	۲/۶۸	۰/۱۴۵	۰/۴۳	۰/۰۷	دور لوله زهکش	۷

\* از جدول ۱ حاصل شد. لایه هفت، صرفاً برای پوشش مواد معدنی روی لوله زهکش در نظر گرفته شد.

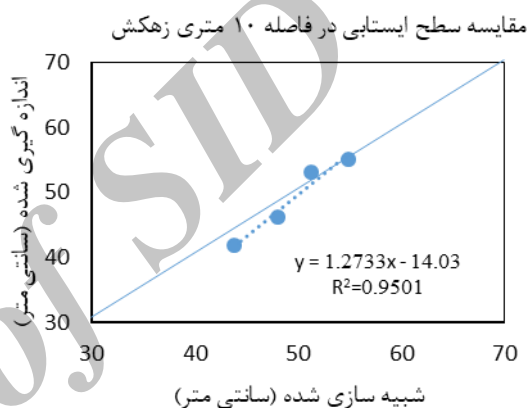
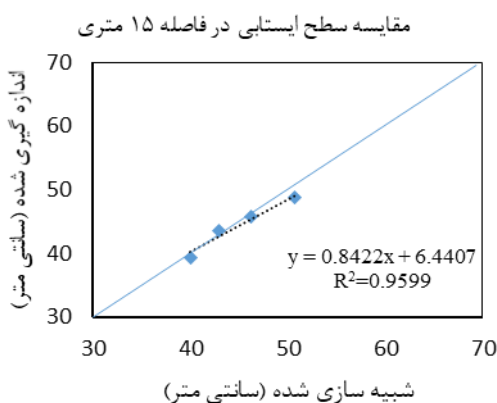
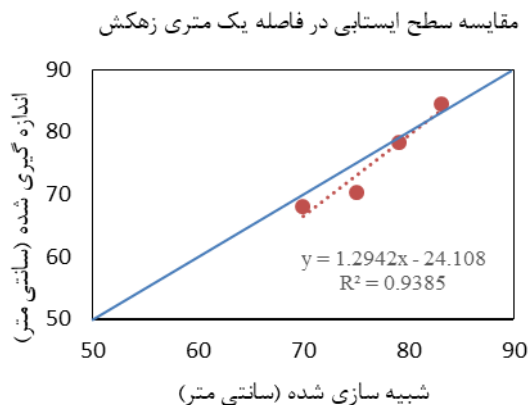
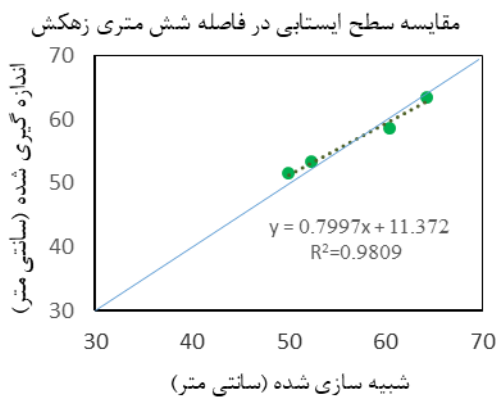
توان سطح اشباع در پروفیل خاک را برابر سطح ایستابی فرض نمود. بر همین اساس سطح ایستابی شبیه‌سازی شده با سطح ایستابی اندازه‌گیری در چاهک‌هایی با فواصل

پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده، مدل برای شبیه‌سازی رطوبت بعد از بارش ۱۸ دی سال ۹۳ (روز ۷۳ بعد از کشت) برای چهار روز بعد از بارش اجرا شد. می-



مقایسه و در شکل ۴ نشان داده شد.

یک، شش، ۱۰ و ۱۵ متری از خط زهکش با یکدیگر



شکل ۴- مقایسه سطح ایستابی شبیه سازی و اندازه گیری شده از روز ۷۳ تا ۷۷ بعد از کشت در چاهک های با فاصله یک، شش، ۱۰ و ۱۵ متری از زهکش

شده است. نتایج تحلیل آماری بین داده های رطوبت اندازه گیری شده با داده های شبیه سازی شده با مدل HYDRUS-2D در جدول ۴ بیان شد.

شکل ۴ نشان داد ضریب تعیین بین سطح ایستابی شبیه سازی شده با سطح ایستابی اندازه گیری شده قابل قبول است و پارامترهای هیدرولیکی خاک واسنجی

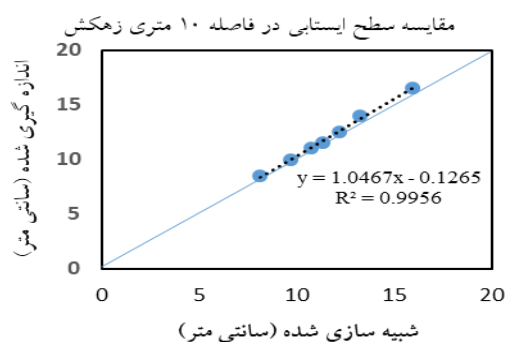
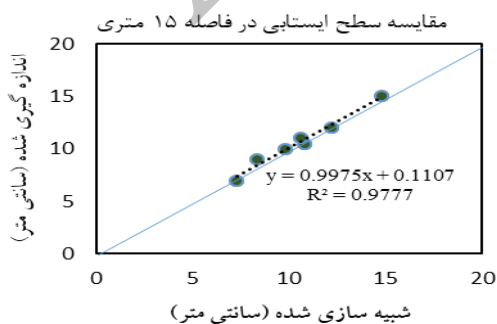
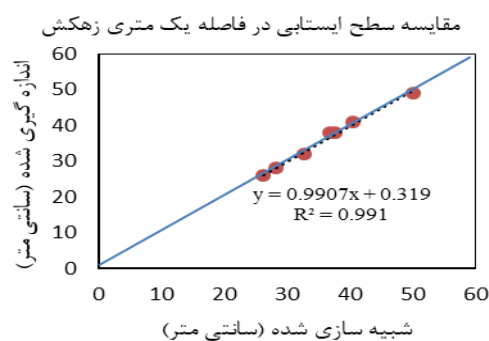
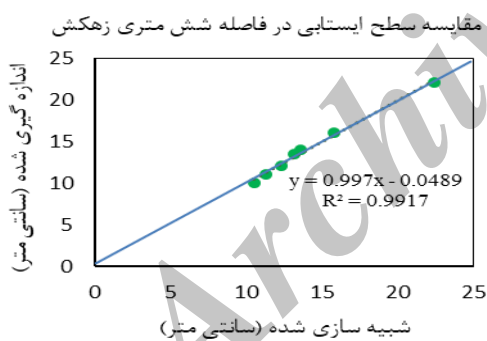
جدول ۴- نتایج تحلیل آماری بین داده های اندازه گیری شده با داده های شبیه سازی شده رطوبت خاک با مدل HYDRUS-2D برای روز ۷۴ و ۷۶ بعد از کشت

EF	PE	AD (cm <sup>3</sup> /cm <sup>-3</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>-3</sup> )	عمق (cm)	روز بعد از بارش
۰/۸۳۶	۰/۴۹۸	۰/۰۳۱	۰/۸۷۱	۰/۰۴۳	۰-۲۰	روز اول (روز ۷۴ بعد از کشت)
۰/۹۹۱	۰/۲۱۸	۰/۰۸۳	۰/۹۵۳	۰/۰۵۲	۲۰-۴۰	
۰/۹۳۸	۰/۳۴۱	۰/۰۴۸	۰/۹۱	۰/۰۳۱	۴۰-۶۰	
۰/۹۷۸	۰/۰۱۹	۰/۰۶۹	۰/۹۷	۰/۰۱۸	۶۰-۷۰	
۰/۸۴۳	۰/۲۵۴	۰/۰۹۸	۰/۹۰۲	۰/۰۱۵	۰-۲۰	روز سوم (روز ۷۶ بعد از کشت)
۰/۹۱۹	۰/۳۱	۰/۰۶۷	۰/۹۷۴	۰/۰۲	۲۰-۴۰	
۰/۹۵۳	۰/۱۸	۰/۰۵۲	۰/۹۸۱	۰/۰۲۲	۴۰-۶۰	
۰/۹۸۳	۰/۰۹۴	۰/۰۳۱	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۶۰-۷۰	
۰/۹۳	۰/۲۳۹	۰/۰۶	۰/۹۴۴	۰/۰۲۶		میانگین کل

### صحت‌سنجی مدل

مدل واسنجی شده برای دوره‌ای با بارش سنگین صحت‌سنجی شد. با بارش سنگین نزدیک به ۴۸ میلی‌متر در ۱۴ اسفندماه سال ۹۳ (روز ۱۳۰ بعد از کشت) که 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. شبیه‌سازی انتقال رطوبت توسط مدل انجام شد. در روز سوم (۱۷ اسفندماه سال ۹۳) بارش حدود هفت میلی‌متر بر روی مزرعه مورد مطالعه رخ داد. بارش باعث افزایش سطح رطوبت اشباع در پروفیل خاک شده و بالا آمدن سطح ایستابی را بین روز دوم و چهارم بعد از بارش سنگین را باعث شد. در واقع مدل برآورد مناسبی از افت و خیز سطح ایستابی دارد. سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در چاهک‌های بین دو زهکش و سطح اشباع در خروجی مدل با یکدیگر مقایسه شد. شکل ۵ منحنی‌های سطح ایستابی اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی مقایسه شد.

هرچه مقدار RMSE نسبت به صفر اختلاف داشته باشد نشان دهنده پیش‌بینی ضعیف‌تر مدل است که به عنوان مثال برای دو روز (اول و سوم بعد از بارش) در جدول ۴ نتایج واسنجی نشان داد بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب برابر ۰/۰۵۲ و ۰/۰۱۱ شد که نزدیک به صفر است (ویلموت، ۱۹۸۲). بررسی نتایج جدول ۴ نشان داد که شاخص  $R^2$  دارای کمترین مقدار ۰/۸۷۱ و بیشترین آن برابر ۰/۹۹ است که به یک نزدیک است و همبستگی داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). شاخص AD میانگین انحراف مدل را بین ۰/۰۳۱ تا ۰/۰۹۸ نشان داد که نزدیک به صفر است و نشان دهنده عملکرد مطلوب مدل است (لگاتس و مک-کابه، ۱۹۹۹). شاخص PE بین ۰/۰۱۹ تا ۰/۴۹۸ حاصل شد که به صفر نزدیک است و نشان می‌دهد مدل گرایش کمتری به تخمین بالاتر یا پایین‌تر دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶) و شاخص EF بین مقادیر ۰/۸۳۶ تا ۰/۹۹۱ حاصل شد که با توجه به نزدیکی به عدد یک نشان دهنده کارایی مطلوب مدل است (نش و استکلیف، ۱۹۷۰).



شکل ۷- مقایسه سطح ایستابی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده از روز ۱۳۱ تا ۱۳۸ بعد از کشت در چاهک‌های با فاصله یک، شش، ۱۰ و ۱۵ متری از زهکش

در وسط دو زهکش ۱۵ سانتی متر افت داشت که با نتایج خروجی مدل همخوانی داشت و نشان دهنده دقت مدل در شبیه سازی سطح ایستابی می باشد که این نتایج با فیلیپوی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی داشت. با استفاده از آماره های ارزیابی، داده های برداشت شده با دستگاه رطوبت سنج، واسنجی شده (مطابق با رابطه شکل ۲ الف) و با داده های رطوبتی شبیه سازی شده مقایسه شد که برای چهار روز ششم، هفتم، هشتم و نهم به شرح جدول ۵ می باشد.

بررسی منحنی های مقایسه سطح ایستابی در فواصل یک، شش، ۱۰ و ۱۵ متری نشان از واسنجی دقیق پارامترهای هیدرولیکی خاک مدل اجرا شده دارد. در شکل ۵ اعمال رطوبت اولیه در مدل به صورت خطی لحاظ شده بود در حالی که در شکل ۵ که مدل صحت-سنجی شده، رطوبت اولیه در کل پروفیل خاک به خاطر ایجاد حالت ماندابی یکسان اعمال شد. در شکل ۵ روابط همبستگی بسیار منظمی حاصل و شاخص  $R^2$  بین ۰/۹۷۱ تا ۰/۹۹۵ ارائه شد. از طرفی اندازه گیری ها نشان داد پس از گذشت هفت روز بعد از بارش سنگین سطح ایستابی

جدول ۵- نتایج تحلیل آماری بین داده های اندازه گیری شده با داده های شبیه سازی شده رطوبت خاک با مدل HYDRUS-2D از روز ۱۳۶ تا ۱۳۹ بعد از کشت

EF	PE	AD (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	عمق (cm)	روز بعد از بارش
۰/۸۱۴	-۰/۳۴۷	۰/۰۵۶	۰/۹۳۴	۰/۰۲۸	۰-۲۰	روز ششم
۰/۹۹۱	-۰/۰۷۲	۰/۰۶۴	۰/۹۴۵	۰/۰۲۷	۲۰-۴۰	(روز ۱۳۶ بعد از کشت)
۰/۹۹۸	-۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۹۸۸	۰/۰۱۴	۴۰-۶۰	
۰/۹۹۶	-۰/۰۳۱	۰/۰۰۸	۰/۹۹۳	۰/۰۱۱	۶۰-۷۰	
۰/۹۸۱	-۰/۱۰۳	۰/۰۱۷	۰/۹۷۶	۰/۰۱۳	۰-۲۰	روز هفتم
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۳	۰/۰۲۸	۰/۹۸۱	۰/۰۱۵	۲۰-۴۰	(روز ۱۳۷ بعد از کشت)
۱/۰۰	-۰/۰۰۹	۰/۰۲۵	۰/۹۸۷	۰/۰۱۴	۴۰-۶۰	
۰/۹۹۳	-۰/۰۵۸	۰/۰۱۴	۰/۹۸۸	۰/۰۱۵	۶۰-۷۰	
۰/۸۳۴	-۰/۲۹۲	۰/۰۴۷	۰/۹۴۱	۰/۰۲۴	۰-۲۰	روز هشتم
۰/۹۹۹	-۰/۰۲۴	۰/۰۶۷	۰/۹۰۴	۰/۰۳۱	۲۰-۴۰	(روز ۱۳۸ بعد از کشت)
۰/۹۸۴	-۰/۱۱۷	۰/۰۵۶	۰/۹۵۴	۰/۰۲۶	۴۰-۶۰	
۰/۹۲۷	-۰/۲۶۷	۰/۰۸۴	۰/۹۴۵	۰/۰۳۸	۶۰-۷۰	
-۰/۷۹۰	-۰/۲۳۳	۰/۰۳۸	۰/۸۸۴	۰/۰۲۱	۰-۲۰	روز نهم
-۰/۳۱۰	-۰/۰۸۴	۰/۰۷۷	۰/۷۵۰	۰/۰۳۵	۲۰-۴۰	(روز ۱۳۹ بعد از کشت)
-۰/۵۳۹	-۰/۰۱۹	۰/۰۳۷	۰/۸۰۸	۰/۰۱۸	۴۰-۶۰	
-۱/۴۷۰	-۰/۰۳۴	۰/۰۱۰	۰/۹۳۷	۰/۰۱۲	۶۰-۷۰	
۰/۵۲۵	-۰/۰۷۹	۰/۰۴۰۷	۰/۹۳۲	۰/۰۲۱۴		میانگین کل

۰/۰۰۹- در روز هفتم عمق ۶۰-۴۰ سانتی متری حاصل شده و به صفر نزدیک است و بدترین مقدار آن برابر ۰/۳۴۷ شد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶) که با توجه به نزدیکی آن به صفر نشان از پیش بینی بهتر مدل در مقایسه با میانگین مشاهده ها است (نش و استکیلف، ۱۹۷۰) که مطابق جدول ۵ که مقدار شاخص EF برای روز هفتم در عمق ۶۰-۴۰ سانتی متری بهترین مقدار یعنی برابر یک شد و بدترین پیش بینی مدل نسبت به میانگین مشاهدات برابر ۱/۴۷۰- برای روز نهم در عمق ۷۰-۶۰ سانتی متری است.

شاخص RMSE مطابق جدول ۵ مقادیر آن بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۳۸ به دست آمده که نشان دهنده عملکرد مطلوب مدل است. کمترین و بیشترین شاخص  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۷۵۰ و ۰/۹۹۳ است که به دلیل نزدیکی بودن به یک نشان دهنده همبستگی بیشتر بین داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). شاخص AD مطابق جدول ۵ مقادیر آن بین ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۸۴ است و نزدیک به صفر است (لگاتس و مک کابه، ۱۹۹۹). برای شاخص PE بهترین مقدار برابر

با شش لایه و یک لایه برای پوشش دور زهکش در نظر گرفته شد. زهکش‌ها در طول فصل کشت باز بوده و نیاز آبی محصول توسط بارش تأمین شد. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل HYDRUS-2D از دقت کافی و لازم برای برآورد رطوبت در اراضی شالیزاری دارای زهکشی برخوردار است. در این مطالعه پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از سطح ایستابی در چاهک‌های مزرعه واسنجی و باعث شد تا قوس ایجاد شده توسط مدل در قسمت اشباع با سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در چاهک‌ها همخوانی کامل داشته باشد. برای صحت‌سنجی مدل از دوره‌ای با بارش سنگین استفاده شد. در این دوره سطح ایستابی با سطح خاک برابر شد. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که انتقال رطوبت روی زهکش و تا فاصله دو متری از هر زهکش سریع‌تر رخ داده و می‌توان آن را در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (ساعت) بررسی کرد. مدل در شبیه‌سازی سطح ایستابی نتایج قابل قبولی ارائه داد. از طرفی مدل افت و خیز سطح ایستابی را قبل و بعد از بارش به خوبی نشان داد. مدل در اراضی زراعی برای شبیه‌سازی و انتقال رطوبت بین زهکش‌ها به شرط تعریف شرایط مرزی مناسب و واسنجی دقیق کاربردی می‌باشد و می‌توان سطح ایستابی بین زهکش‌ها را بر اساس رطوبت اشباع از مدل استخراج کرد. با مدل HYDRUS-2D می‌توان شبیه‌سازی انتقال رطوبت بین دو زهکش را بررسی و این مدل 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. مدل جهت اعمال مدیریت آب در مزرعه و مدیریت در هنگام وقوع بارش‌های سنگین کاربرد دارد. با توجه به قابلیت مدل در شبیه‌سازی حرکت املاح، پیشنهاد می‌گردد از مدل در شبیه‌سازی انتقال نیترات بین دو زهکش استفاده شود.

بررسی شاخص‌های آماری نشان می‌دهد مدل HYDRUS-2D از دقت کافی و لازم برای شبیه‌سازی رطوبت در اراضی شالیزاری برخوردار است. سیال و اسکگر (۲۰۰۹) با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده رطوبت حجمی خاک برآزش مناسب آن‌ها را با ضریب تعیین ۰/۹۸ را نشان داد که در این مطالعه نیز میانگین ۰/۹۳ بیان شد و مطابق با نتایج آن‌ها می‌باشد. بشارت و همکاران نیز (۱۳۹۳) مقدار RMSE را برابر ۰/۲۳۶ و  $R^2$  را بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۴ برای نفوذ آب به خاک در لایسیمتر وزنی با مدل HYDRUS-2D بدست آوردند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. مدل HYDRUS-2D برای اراضی دارای زهکش زیرزمینی توسط یوسفی و همکاران، (۲۰۱۴) و برای اراضی شالیزاری توسط ابراهیمیان و نوری (۲۰۱۵) به کار برده شد و روابط مورد استفاده برای تعیین فواصل زهکش‌ها مورد بررسی قرار گرفت و بیان کردند که مدل HYDRUS-2D برای اراضی دارای سیستم‌های زهکشی و اراضی شالیزاری کاربرد دارد که نتایج این پژوهش نیز بیان‌کننده توانایی مدل در اراضی شالیزاری دارای زهکشی در سطح مزرعه را نشان داد. مطابق نتایج سایر پژوهشگران؛ اختلافات بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی توسط مدل می‌تواند ناشی از وجود درز و ترک‌ها و گاه‌گاه جریان‌های ترجیحی باشد (آکای و همکاران، ۲۰۰۸؛ گاردنس و همکاران، ۲۰۰۵؛ سنדר و گریکه، ۲۰۰۹ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

#### نتیجه‌گیری

با استفاده از داده‌های دقیق رطوبت مستخرج شده از دستگاه واسنجی شده TDR به بررسی شبیه‌سازی رطوبت خاک و جریان آب در اراضی شالیزاری برای کشت دوم پرداخته شد. شرایط مزرعه‌ای و سطحی در حدود ۰/۳ هکتار در نظر گرفته شد. خاک به صورت مطبق

## فهرست منابع

۱. بای بوردی، م. ۱۳۷۸. اصول مهندسی زهکشی و بهسازی خاک. چاپ هشتم. انتشارات دانشگاه تهران. شماره ی انتشارات ۱۳۳۴، تهران. ۶۴۱ ص.
۲. بای بوردی، م. ۱۳۷۲. فیزیک خاک. چاپ پنجم. انتشارات دانشگاه تهران. شماره ی انتشارات ۱۶۷۲، تهران. ۶۷۱ ص.
۳. بشارت، س.، بهمنش، ج.، رضایی، ح. و ر.، دلیر حسن نیا. ۱۳۹۳. ارزیابی مدل HYDRUS در نفوذ آب به خاک با استفاده از اندازه گیری های آزمایشگاهی در لایسیمتر وزنی. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. جلد بیست و یکم، شماره پنجم، ۱۳۹۳. ص ۲۹۷-۳۰۶
۴. بی نام. ۱۳۸۰. مدیریت کیفیت زه آب های کشاورزی زهکشی. گروه کار اثرات زیست محیطی طرح های آبیاری و زهکشی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. شماره ی انتشارات ۴۳. ۱۸۰ ص.
۵. پذیرا، ا. ۱۳۸۷. زهکشی زیرزمینی در اراضی ساحلی. مجموعه مقالات پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست. ۱۶ آبان ۱۳۸۷ کمیته ملی آبیاری و زهکشی، تهران: ۷۰-۵۱.
۶. شاهنظری، ع.، احمدی م ض.، آقاجانی ق. و درزی ع.، (۱۳۸۹) گزارش نهایی طرح تحقیقات کاربردی ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری. ۵۳ ص.
۷. عباسی ف (۱۳۸۶) فیزیک خاک پیشرفته. چاپ اول. انتشارات دانشگاه تهران. شماره ی انتشارات ۲۸۷۱، تهران. ۲۵۰ ص.
8. Abbasi, F., Jacques, D., Simunek, J., Feyen, J., and M.Th. van Genuchten. 2003. Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. American Society of Association Executives, 46(4): 1097-1111.
9. Ahmadi, M.Z. 1999. Use of piezometers to find the depth to impermeable layer in the design of drainage systems. Hydrological Sciences Journal. 44.1: 25-31.
10. Akay, O., Fox, G.A., and J. Simunek. 2008. Numerical simulation of flow dynamics during macropores-subsurface drain interactions using Hydrus. Vadose Zone. 7 (3), 909–918.
11. Darzi, A., Mirlatifi, M., Shahnazari, A., Ejlali, F., and M.H. Mahdian. 2012. Influence of surface and subsurface drainage on rice yield and its component in paddy fields. Water research in agriculture. 26(1): 61-71.
12. Ebrahimian, H., and H. Noory. 2015. Modeling paddy field subsurface drainage using HYDRUS -2D. Paddy and Water Environment. 13(4): 477-485.
13. Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and H. Zaradny. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York. 188 p.
14. Filipovi, V., Kochem Mallmann, F.J., Coquet, Y., and J. Simunek. 2014. Numerical simulation of water flow in tile and mole drainage systems Agricultural Water Management 146: 105–114.
15. Gardenas, A., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., and J. Simunek. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. Agricultural Water Management. 74: 219– 42.
16. Garg, K.K., Das, B.S., Safeeq, M., and P.B.S. Bhadoria. 2009. Measurement and modeling of soil water regime in a lowland paddy field showing preferential transport. Agricultural Water Management. 96: 1705–1714.

17. Karandish, F., Darzi-Naftchali, A., and J. Šimůnek. 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.
18. Legates, D.R., and G.J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. 35: 233-241.
19. Meshkat, M., Warner, R.C., and S.R. Workman. 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. *Irrigation Drain Engineering*. 125(6): 315-323.
20. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting thorough conceptual models, A discussion of principles. *Hydrology*. 10: 282-290.
21. Ogino, Y., and S. Ota. 2007. The evolution of Japan’s rice field drainage and development of technology. *Irrigation Drain*. 56(1):69–80.
22. Salehi, A.A., Navabian, M., Varaki, M.E., and N. Pirmoradian. 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*. 15(2): 433-442.
23. Sander, T., and H.H. Gerke. 2009. Modelling field-data of preferential flow in paddy soil induced by earthworm burrows. *Contaminant Hydrology*. 104 (1–4), 126–136.
24. Schmitz, G.H., Shutze, N., and U. Petersohn. 2002. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *Irrigation Drain engineering*. 128(5): 287-297.
25. Simunek, J., Senja, M., and M.Th., Van Ghenuchten. 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.
26. Simunek, J., van Ghenuchten, M., and M.Th. Sejna. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone*. 7: 587–600.
27. Siyal, A.A., and TH. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 96: 893–904.
28. Skaggs, T.H., Trout, J., Simunek, J., and A. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *Irrigation Drain Engineering*. 130: 304-310
29. Tabuchi, T. 2004. Improvement of paddy field drainage for mechanization. *Paddy and Water Environment*. 2(1):5–10.
30. Wang, F.X., Kang, Y., and S.P. Liu. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in north China Plain. *Agricultural Water Management*. 79: 248–264.
31. Wang, Y., Zhang, B., Lin, L., and H. Zepp. 2011. Agroforestry system reduces subsurface lateral flow and nitrate loss in Jiangxi Province, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 140 (3–4), 441–453.
32. Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *American Meteorological Society*. 63(11): 1309–1313.
33. Yousfi, A., mechergui, M., and H. Ritzema. 2014. A drain-spacing equation that takes the horizontal flow in the unsaturated zone above the groundwater table into account. *Irrigation and Drainage*. 63: 373–382.

## Simulation of Soil Moisture between Two Drain Pipes in Paddy Fields by HYDRUS-2D Model

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

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

**peymokhtari@yahoo.com**

Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

**Aliponh@yahoo.com**

Associate Professor, Water Engineering Department, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

**nouri1351@yahoo.com**

### Abstract

Evaluation of soil moisture transfer between two subsurface drains and water drainage from the roots is very important. In this regard, application of conservation of mass equations by HYDRUS-2D software, in addition to reducing costs, could speed up access to the results. In this study, a subsurface drainage systems with drain depth of 0.9 m, drain spacing of 30 m, and groundwater depth of 50 cm was studied during one growing season of canola in paddy fields located in Sari region. Soil profile was considered from the surface to a depth of two meters and six layers of soil were defined. Soil saturated hydraulic conductivity (K) for each of the 6 layers of the soil was calculated by Piezometric method and using Kirkham equation. The K values for the surface layer down to the layer at the depth of 2 m were, respectively, 0.8, 0.11, 0.29, 0.16, 0.38 and 0.083 m/day. Other input parameters of HYDRUS-2D model were measured every day including precipitation, water table depth, and soil moisture. Observed data and simulated water tables between the two drain pipes were compared and the model was calibrated in saturated period. The performance of the model was evaluated by statistical approaches considering root mean square error (RMSE), the coefficient of determination ( $R^2$ ), the average deviation (AD) percent error (PE) and the modeling efficiency (EF), which were 0.0214  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 0.932, 0.0407  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , 0.079, and 0.525, respectively. The results showed that simulation was considerably satisfactory.

**Keywords:** Canola, Kirkham equation, Richard's equation, Soil hydraulic conductivity

---

1 - Corresponding Author: Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

\*- Received: July 2017 and Accepted: January 2018