نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۶ / شماره ۳/ ۱۴۰۱
https://doi.org/10.22092/jwra.2022.359654.937

بررسی ابعاد زهکش روباز در اراضی تجهیز، نوسازی و یکپارچه‌سازی شده شالیزاری

طاهره غلامی اسطلخی کوهی، مریم نوابیان[1] و مهدی اسمعیلی‌ورکی

دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان.
t.gholami92@yahoo.com
دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط‌زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان.
Navabian@guilan.ac.ir
دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط‌زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان.
esmaeili@guilan.ac.ir

دریافت: مرداد ۱۴۰۱ و پذیرش: آذر ۱۴۰۱

چکیده

برای کنترل سطح ایستابی هنگام برداشت محصول برنج و کشت گیاه دوم در اراضی شالیزاری، احداث سامانه‌های زهکشی اجتناب‌ناپذیر است. یافتن بهترین گزینه طراحی زهکش از دیدگاه مسائل محیطی و اقتصادی اهمیت بسیاری دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد زهکش روباز در کنترل سطح ایستابی در کشت گیاه برنج و گیاه دوم در اراضی شالیزاری انجام شد. در این راستا، عملکرد زهکش‌های روباز شامل بار آبی و شدت تخلیه آب به زهکش در دوره رشد گیاهان برنج و کشت دوم با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D، اطلاعات مورد نیاز از ۱۳۰ هکتار از اراضی شالیزاری روستاهای نوده، جیرسر و نوپاشان در شهرستان صومعه‌سرا، در سال ۱۳۹۸ برداشت شد. پارامترهای بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل و سرعت نفوذ اندازه‌گیری شدند. همچنین بار آبی به‌صورت ماهانه در منطقه اندازه‌گیری شد. پس از اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D، گزینه‌های مختلف طراحی زهکش روباز شامل عمق و عرض کف در مدل اجرا و نتایج آن مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل HYDRUS-2D دقت مناسبی در شبیه‌سازی روند تغییرات بار آبی دارد. شاخص‌های ارزیابی مدل شامل R^2، RMSE، nRMSE و MAE در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۹۸، ۴/۳۹ سانتی‌متر، ۱/۶٪ و ۳/۵۵ سانتی‌متر و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۹۸، ۴/۳۳ سانتی‌متر، ۱/۶۷٪ و ۳/۳۷ سانتی‌متر به‌دست آمد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که زهکش روباز با عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر در طول دوره کشت برنج و کشت دوم به ترتیب با میزان تخلیه زه‌آب برابر ۷۲۶۴۴۰ و ۱۶۹۹۶۰ سانتی‌متر مکعب بر واحد طول زهکش و ضریب عکس‌العمل به ترتیب ۰/۲۹۳ و ۰/۵۸۳ در روز، دارای بالاترین عملکرد در کنترل سطح ایستابی بود. مقادیر ضرایب عکس‌العمل نشان داد که زهکش روباز پتانسیل خوبی برای دستیابی به اهداف زهکشی شامل توسعه برداشت مکانیزه برنج و همچنین توسعه کشت دوم در منطقه نداشت.

واژه‌های کلیدی: سطح ایستابی، عمق زهکش، عرض کف زهکش، مدل HYDRUS-2D

[1] – آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان.

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت، نیاز به تولید محصولات غذایی و کشاورزی را افزایش می‌دهد. برنج یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی در سراسر جهان است که توسط نیمی از جمعیت جهان مورد مصرف قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). سطح اراضی شالیزاری در جهان در سال ۲۰۱۹ بالغ بر ۱۶۲ میلیون هکتار و مقدار تولید شلتوک نیز ۷۵۵ میلیون تن گزارش شده است (فائو، ۲۰۱۹). بر اساس آمارنامه سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت شلتوک کشور بالغ بر ۸۹۲ هزار هکتار با تولید ۴/۴۲ میلیون تن و میانگین عملکرد ۴۹۵۷ کیلوگرم در هکتار است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). حدود ۷۰ درصد سطح زیر کشت برنج کشور در دو استان شمالی گیلان و مازندران قرار دارد که تولید بیش از ۷۱ درصد از برنج کشور را بر عهده دارند. سطح زیر کشت برنج در استان گیلان نزدیک به ۲۲۰ هزار هکتار بوده است و رقم‌های متنوعی مانند کاظمی، هاشمی، دم سیاه، دم زرد، صدری، بینام، دم سرخ، دم سفید و حسنی کشت می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در راستای بهبود کشاورزی پایدار در منطقه، اجرای طرح تجهیز، نوسازی و یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری اهمیت به‌سزایی دارد. "تجهیز، نوسازی و یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری به کلیهٔ فعالیت‌های زیر بنایی اطلاق می‌شود که با هدف استفاده بهینه از منابع آب‌وخاک و اقتصادی نمودن تولید در اراضی کشاورزی آبی به اجرا گذاشته می‌شود" (عظیمی، ۱۳۸۶). در طرح تجهیز و نوسازی اراضی شالیزاری، قطعات نامنظم و غیر هندسی دارای شکل منظمی شده و با اجرای شبکهٔ آبیاری و زهکشی، امکان آبیاری و زهکشی هر قطعه به‌طور مستقل فراهم می‌شود. بنابراین اشراف هر یک از قطعات به کانال آبیاری و زهکشی، استقلال قطعات در استفاده از کانال‌های آبیاری و زهکشی، افزایش بازده آبیاری و صرفه‌جویی در مصرف آب و امکان مدیریت کمی و کیفی زه‌آب می‌تواند از مزایای مهم طرح به شمار رود. اراضی شالیزاری در قالب طرح تجهیز و یکپارچه‌سازی به‌صورت قطعات دارای ابعاد یکسان ۱۰۰×۳۰ متر بوده که در بالادست و پایین‌دست آن کانال‌های آبیاری و زهکشی در نظر گرفته می‌شوند.

شالیزارهای استان گیلان به دلیل مشکلاتی از جمله نبود زهکشی مناسب و عدم لایروبی زهکش‌های سنتی موجود، به دلیل بارندگی زیاد در فصول پاییز و زمستان، دچار آب‌گرفتگی هستند. ازاین‌رو کشت در نیمه دوم سال عملاً غیرممکن بوده و این امر تأثیر بسزایی در اقتصاد خانواده‌ها و کشاورزان می‌گذارد. سامانه‌های زهکشی با خروج آب مازاد می‌توانند شرایط مناسب برای کشت دوم محصولات شامل صیفی و سبزی و دانه‌های روغنی را فراهم آورده و باعث افزایش تولید و رونق اقتصادی این مناطق شود. علاوه‌براین در اراضی شالیزاری استان گیلان به دلیل اشباع مداوم خاک و تجمع آب در سطح بسیاری از اراضی در طول سال، شرایط غیرهوازی ایجاد شده و موجب تجمع عناصر مضر و گازهای سمی در پروفیل خاک می‌شود که کاهش عملکرد کشت متوالی برنج را در پی دارد. اگرچه گیاه برنج، گیاه آب‌دوستی است اما زهکشی میان‌فصل در دوره پنجه‌زنی و زهکشی پایان‌فصل در زمان برداشت برنج منجر به بهبود عملکرد کمی و کیفی برنج و سهولت برداشت می‌شود. همچنین باران‌های شدید در ابتدای فصل رشد برنج منجر به خفگی نشاء می‌شود. از این‌رو بهره‌برداری چند منظوره از اراضی شالیزاری مستلزم ایجاد زیر ساخت زهکشی برای تخلیه به‌موقع آب مازاد در طول دوره رشد برنج و نیمه دوم سال است. در حال حاضر اراضی شالیزاری سنتی و تجهیز و نوسازی شده استان گیلان، به ترتیب مجهز به انهار سنتی و زهکش‌های سطحی هستند که غالب آن‌ها با توجه به ماهیت‌شان، مدیریت و بهره‌برداری نامناسب، اهداف اراضی شالیزاری در کشت برنج و توسعه کشت دوم را نمی‌توانند به‌خوبی برآورده نمایند.

پیچیدگی فرآیند زهکشی در اراضی شالیزاری و زمان‌بر بودن و هزینه آزمایش‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز برای ارزیابی سامانه‌های زهکشی را

اجتناب‌ناپذیر می‌کند (مومن نژاد و همکاران، ۱۳۹۸). مدل HYDRUS با حل عددی معادله ریچاردز به شبیه‌سازی حرکت آب در خاک می‌پردازد (سیمیونک، ۱۹۹۹). این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع در حالت افقی، عمودی و شعاعی بوده و توانایی تخمین خصوصیات فیزیکی خاک به روش معکوس را نیز دارد (سیمیونک و همکاران، ۲۰۰۶).

معماری و همکاران (۱۳۹۷) پژوهشی به‌منظور بررسی عملکرد کیفی و فنی زهکش زیرزمینی در کشت لوبیا (پاچ‌باقلا)، به‌عنوان کشت دوم اراضی شالیزاری و ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی زهکشی در بافت خاک رسی‌سیلتی انجام داند. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی روند تغییرات غلظت نمک محلول خاک با مقادیر R^2، RMSE و nRMSE به ترتیب برابر ۰/۸۱، ۰/۰۳۸ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۳/۷ درصد در مرحله واسنجی و ۰/۴۳، ۰/۰۳۹ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۸/۵ درصد در مرحله اعتبارسنجی، عملکرد خوبی داشت. محمدپور (۱۳۹۸) پژوهشی را با هدف بررسی خصوصیات ترانشه بر عملکرد زهکش زیرزمینی در خاک رسی در زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل برنج در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان انجام داد. زهکش لوله‌ای در عمق ۶۵ سانتی‌متری خاک و با قطر ۱۰ سانتی‌متر در ترانشه پر شده با شن و ماسه به ابعاد ۲۰ و ۷۵ سانتی‌متری (عرض و عمق) در لایسیمتر کارگذاری شد و لایه سخت در عمق ۱۷ سانتی‌متری سطح خاک و به ضخامت سه سانتی‌متر ایجاد شد. نتایج شبیه‌سازی بار آبی با توجه به مقادیر ۰/۹۸۲، ۲/۸ سانتی‌متر و ۴/۵ درصد به ترتیب برای شاخص‌های ارزیابی R2، RMSE و nRMSE، نشان داد که مدل HYDRUS-2D دقت مناسبی در شبیه‌سازی حرکت آب و غلظت املاح زه‌آب و پروفیل خاک دارد.

یانگ و همکاران (۲۰۱۷) با شبیه‌سازی حرکت آب در اراضی شالیزاری تحت آبیاری غرقاب دائم، نشان دادند مدل برای شبیه‌سازی ارتفاع آب روی خاک و رواناب خروجی از کرت دارای دقت با شاخص‌های آماری R^2 و RMSE به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۵۷ سانتی‌متر و ۰/۹۹ و ۰/۸۹ سانتی‌متر است. همچنین بیان کردند که خصوصیات لایه خاک زیر لایه شخم، بر جریان عمودی آب در اراضی شالیزاری نقش کلیدی دارد. چن و همکاران (۲۰۲۲) با مدل‌سازی مدیریت آب و نیتروژن در اراضی شالیزاری با استفاده از مدل HYDRUS-1D بیان کردند که مدل در بخش حرکت آب توانایی شبیه‌سازی خوبی با ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۳۸ سانتیمتر و ۰/۹۸ دارد.

ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی در محیط اشباع، دو مدل HYDRUS-1D و HYDRUS-2D به‌منظور شبیه‌سازی انتقال آب و نیترات برای سه روش کودآبیاری جویچه‌ای (ساختار مشابه با کانال روباز در زهکشی) و خاکی با محدوده بافت لومی رسی تا لومی شنی، مورد استفاده قرار دادند. مقادیر ضریب تبیین برای غلظت نیترات و محتوای آب خاک در مدل HYDRUS-1D به ترتیب ۰/۴۵۸–۰/۳۰۸ و ۰/۶۲۳–۰/۴۸۷ و برای مدل HYDRUS-2D به ترتیب ۰/۸۹–۰/۷۹ و ۰/۸۷–۰/۵۷ محاسبه شد.

ازآنجاکه زهکشی نقش مؤثری برای ایجاد شرایط مناسب برداشت برنج و رونق کشت دوم در اراضی شالیزاری می‌تواند ایفا کند و با توجه به ابعاد کرت‌های شالیزاری در طرح تجهیز و نوسازی و رویکرد استفاده از زهکش‌های روباز در این طرح‌ها، هدف از این پژوهش بررسی ابعاد بهینه زهکش‌های روباز برای حصول به اهداف زهکشی در دو نوبت کشت گیاه برنج و کشت دوم در اراضی شالیزاری در نظر گرفته شد. بر اساس این پژوهش، پاسخ این سؤال داده خواهد شد که چه ابعادی از زهکش روباز برای اهداف ذکرشده مناسب است و آیا گزینه مناسبی می‌تواند باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

برای دستیابی به هدف پژوهش از اطلاعات اراضی شالیزاری ۱۳۰ هکتار از منطقه نوده، جیرسر و

نوپاشان واقع در شهرستان صومعه‌سرا، (در محدوده جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۱ ثانیه تا ۴۹ درجه و ۱۷ دقیقه و ۲۳ ثانیه‌ی طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۵ دقیقه و ۱۵ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه و ۳۲ ثانیه‌ی عرض شمالی) که غالباً دارای زهکش روباز در کرت‌های شالیزاری ۱۰۰×۳۰ متر است، استفاده شد.

داده‌های ورودی مدل HYDRUS-2D

در مدل HYDRUS از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی (نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه)، برای محاسبه تبخیر-تعرق و مقادیر بارش استفاده شد. ازآنجاکه در مدل می‌بایست تبخیر و تعرق به تفکیک آورده شود، تبخیر- تعرق پتانسیل با استفاده از شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده، به تبخیر و همچنین تعرق تفکیک شد (بلمند و همکاران، ۱۹۸۳). روابط (۱) و (۲) نحوه محاسبه تبخیر و تعرق را به‌صورت جداگانه نشان می‌دهند:

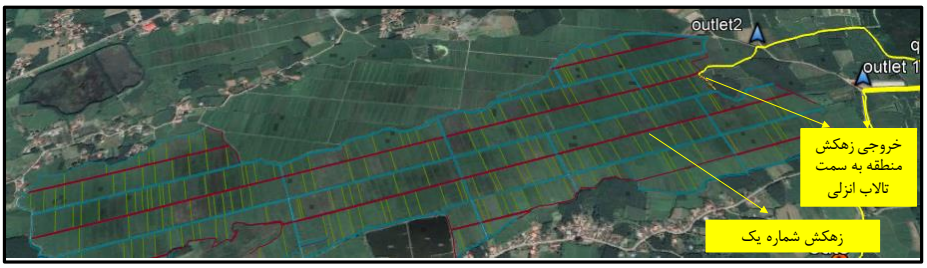
$$E_p = ET_c \times e^{-Kgr \times LAI} \quad (۱)$$

$$T_p = E_c - E_p \quad (۲)$$

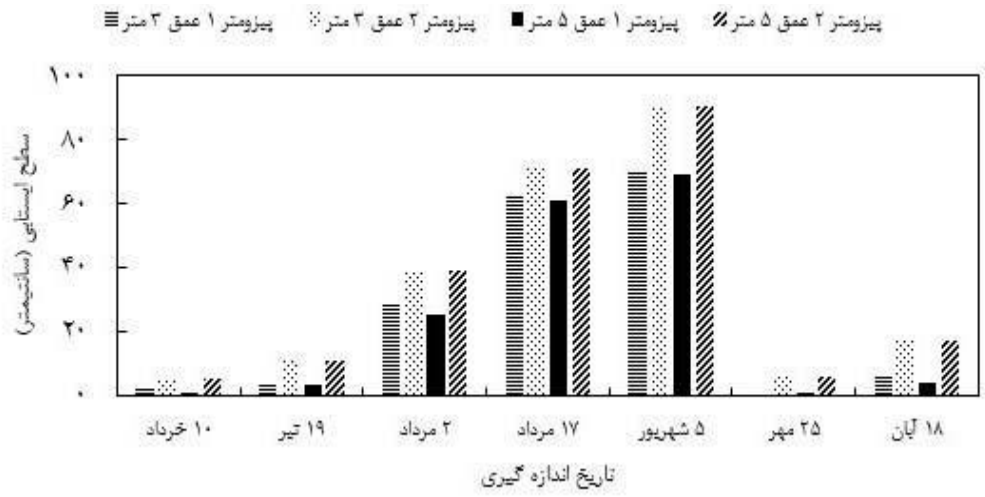
که در این روابط ET_c، E_p و T_p به ترتیب تبخیر- تعرق پتانسیل، تبخیر پتانسیل و تعرق پتانسیل (سانتی‌متر بر روز)، LAI شاخص سطح برگ و K_{gr} ضریب توسعه تابش خورشیدی کل می‌باشند. محدوده شاخص سطح برگ در طول دوره رشد گیاه برنج ۳/۴ – ۰/۷۴ در نظر گرفته شد (محمدپور، ۱۳۹۸). مقدار K_{gr} برای گیاه برنج توسط فوگات و همکاران (۲۰۱۰) به میزان ۰/۴ انتخاب شد.

برای محاسبه تبخیر و تعرق داده‌های هواشناسی شامل بارش، حداکثر و حداقل دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی برای سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ از ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی دریافت و با استفاده از معادله پنمن مانتیث تبخیر- تعرق پتانسیل محاسبه شد. برای محاسبه تبخیر- تعرق برنج از ضرایب گیاهی ۰/۹۹، ۱/۳۵ و ۱/۱۴ به ترتیب برای دوره رشد ابتدایی، میانی و پایانی موجود در پژوهش پیرمرادیان و همکاران (۱۳۹۲) استفاده شد.

اطلاعات زهکش شامل هندسه زهکش و ارتفاع آب داخل زهکش در طول بازه مورد مطالعه از ۱۵ اردیبهشت تا ۱۷ آبان ۱۳۹۸ از زهکش شماره (۱) واقع در شکل (۱)، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سطح ایستابی، دو پیزومتر مرکب در عمق سه و پنج متری در محدوده جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۶ دقیقه و ۲۳ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه و ۷ ثانیه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۱۶ دقیقه و ۵۸ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۲۶ دقیقه و ۱۰ ثانیه عرض شمالی حفر و سطح آب داخل پیزومترها به‌صورت ماهانه و به مدت یک سال با استفاده از دستگاه عمق‌سنج قرائت شد. شکل (۲) مقادیر سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در دو پیزومتر را نشان می‌دهد. بیشترین سطح ایستابی پس از برداشت محصول برنج در شهریور ماه روی داده است.



شکل ۱- موقعیت زهکش شماره (۱) در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- مقادیر سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در دو پیزومتر

با توجه به واحد فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه، دو پروفیل خاک با ابعاد ۱/۵×۲×۱ متر برای مطالعات خاک حفر شد. پس از حفر گودال، ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک از جمله رنگ خاک، ساختمان، پایداری و مرز بین افق‌ها و لایه‌ها با استفاده از راهنمای تشریح پروفیل خاک بررسی شد. در تشریح پروفیل‌ها از هر یک از افق‌های خاک نمونه‌برداری و برای انجام آزمایش به آزمایشگاه کیفیت آب دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان منتقل شدند. ابتدا نمونه خاک‌ها هوا خشک و سپس کوبیده و از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند. برخی خصوصیات خاک از جمله تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه و جرم مخصوص حقیقی خاک به روش پیکنومتری، تخلخل خاک به روش پارافینه کردن و رطوبت ظرفیت زراعی با استفاده از دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شدند (نشریه شماره ۴۶۷ دستورالعمل تجزیه‌های آزمایشگاهی نمونه‌های خاک و آب). همچنین برای تعیین هدایت آبی اشباع لایه سطحی خاک، نفوذپذیری خاک به روش استوانه مضاعف در دو نقطه در دو طرف زهکش اندازه‌گیری شد.

شبیه‌سازی زهکش در مدل HYDRUS-2D

هندسه مزرعه، زهکش روباز و لایه‌بندی خاک در مدل HYDRUS-2D در شکل (۳) نشان داده شده است. مزرعه به‌صورت دو بعدی با طول ۲۰۶ متر (مجموع ۱۰۰ متر طول کرت در دو طرف زهکش و جاده بین کرت‌ها) و عمق پنج متر بر اساس اطلاعات پروفیل خاک (شش لایه خاک) شبیه‌سازی شد. برخی خصوصیات فیزیکی خاک در جدول (۱) آمده است. در پروفیل شماره ۱، بیش‌ترین مقدار شن در لایه سطحی مشاهده شد. جرم مخصوص ظاهری و تخلخل در افق‌ها روند منظمی نداشت و بافت خاک در افق‌های مختلف، متفاوت به‌دست آمد به‌طوری‌که در لایه اول خاک لومی و در لایه آخر بافت خاک لوم رس سیلتی بود. در این پروفیل لایه سخت در عمق حدود ۳۳ سانتی‌متری با مشخصات ۷۶/۷ درصد سیلت، ۱۸/۹ درصد رس، جرم مخصوص حقیقی ۲/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جرم مخصوص ظاهری ۱/۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب مشاهده شد. در پروفیل شماره ۲، مقدار شن نسبت به سایر اجزای خاک بسیار کمتر بود و در عمق‌های زیرین مقدار آن بیش‌تر بود. بخش عمده‌ای از ذرات خاک مربوط به جزء سیلت به دست آمد. بیش‌ترین مقدار رس در افق‌های زیرین بوده و روند نامنظمی نسبت به عمق داشت. جرم مخصوص ظاهری و تخلخل در افق‌ها روند منظمی نداشتند. بافت خاک از نوع لوم سیلتی و لوم رس سیلتی بود که به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد سیلت منجر به ایجاد شرایط زهکشی ضعیف در این محدوده شده است. در این پروفیل لایه سخت در عمق حدود ۳۴ سانتی‌متری با مشخصات ۵۲/۷

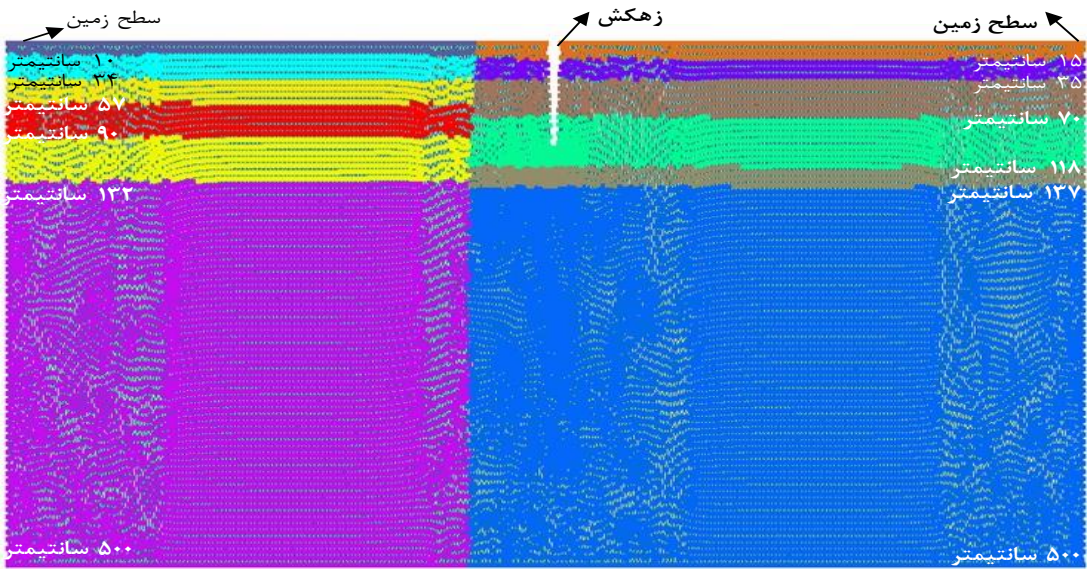
درصد سیلت، ۲۶/۷ درصد رس، جرم مخصوص حقیقی ۲/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و جرم مخصوص ظاهری ۱/۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب مشاهده شد.

برای بیان خصوصیات هیدرولیکی خاک بر اساس تجربیات پژوهش‌های پیشین (محمدپور، ۱۳۹۸) از مدل Van Genuchten-Mualem (ونگنوختن، ۱۹۸۰) استفاده شد. پارامترهای هیدرولیکی ۱۲ لایه مورد نظر از طریق شبکه عصبی مصنوعی موجود در مدل HYDRUS و با اعمال اطلاعات درصد ذرات شن، رس و سیلت، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت ظرفیت زراعی تعیین شدند. ازآنجاکه هدایت آبی اشباع (K_S) یکی از پارامترهای مهم و با تغییرات گسترده زمانی و مکانی است، مقدار این پارامتر در ۱۲ لایه، از روش حل معکوس موجود در مدل HYDRUS و با استفاده از داده‌های بار آبی قرائت‌شده از پیزومترها، به‌دست آمدند. همچنین پارامتر n لایه‌های ۱و پارامتر رطوبت اشباع (θ_S) لایه ۲ از روش حل معکوس تعیین شدند. از مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸) برای جذب آب توسط ریشه استفاده شد. مقادیر پارامترهای فدس شامل P_0، P_{0pt}، P_{2H}، P_{2L}، P_3، r_{2H} و r_{2L} برای گیاه برنج از پژوهش فوگات و همکاران (۲۰۱۰) به ترتیب ۱۰۰، ۵۵، ۱۶۰–، ۲۵۰–، ۱۵۰۰۰–، ۰/۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شد.

شرط اولیه برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف زهکش روباز با قرار دادن سطح آب زیرزمینی در تاریخ ۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۸ (شروع فصل رشد برنج) مشخص شد. همچنین مرز بالادست برای اعمال آبیاری در فصل کشت برنج و بارش در فصل کشت دوم و مرز پایین‌دست به علت نوسان سطح ایستابی، به‌صورت ارتفاع آب متغیر و مرزهای جانبی به‌صورت بسته و بدون جریان فرض شدند. همچنین مرز دیواره زهکش به‌صورت نشت انتخاب شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D

واسنجی مدل HYDRUS برای دوره کشت گیاه برنج در محدوده زمانی ۱۹ اردیبهشت تا ۱۱ مرداد (برداشت برنج در منطقه) با استفاده از اطلاعات هواشناسی و شناساندن محیط موردمطالعه به مدل، شامل شکل هندسی (عرض کف ۱۴۰ و عمق ۱۰۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم) و موقعیت زهکش و پیزومترها، مساحت منطقه موردمطالعه، اطلاعات ارتفاع آب روی سطح خاک بر اساس آبیاری عرف منطقه (عمق آب پنج سانتی‌متر تا ۵۰ روز، عمق آب سه سانتی‌متر تا روز ۶۵، اعمال باران تا روز ۷۵ و اعمال زهکشی تا روز ۹۰) و داخل زهکش، سطح ایستابی، شرایط اولیه و مرزی، اطلاعات لایه‌های مختلف خاک و استفاده از حل معکوس جهت تخمین برخی خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های خاک (جدول ۴)، انجام شد.



شکل ۳- هندسه مزرعه مورد مطالعه در مدل HYDRUS و لایه‌بندی خاک

جدول ۱- محدوده خصوصیات فیزیکی پروفیل شماره ۱ (سمت چپ زهکش) و ۲ (سمت راست زهکش) مربوط به شش لایه خاک

شماره پروفیل	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	جرم مخصوص حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل (درصد)
۱	۵/۴-۳۶/۳	۳۱/۲-۶۲/۷	۱۷/۴-۴۵/۶	۲/۱۹-۲/۵۵	۱/۲۶-۱/۶۴	۳۰/۶-۴۹/۸۲
۲	۴/۲-۱۸/۱	۵۲/۹-۷۶/۷	۱۸/۹-۲۸/۹	۲/۴۶-۲/۶	۱/۳۴-۱/۷۴	۳۲-۴۸

پس از واسنجی و تعیین پارامترهای مجهول از طریق حل معکوس، از داده‌های مشاهداتی بازه زمانی ۱۱ مرداد تا ۱۷ آبان برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در این مرحله مقادیر بهینه پارامترهای تعیین‌شده توسط حل معکوس در مرحله واسنجی، ثابت در نظر گرفته شد و عملکرد مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک مورد بررسی قرار گرفت. از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و درصد خطا (nRMSE) جهت ارزیابی مدل HYDRUS استفاده شد (روابط ۳، ۴، ۵ و ۶):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum|P_i - O_i|}{n} \quad (۵)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (۶)$$

که در آن P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده‌شده و n تعداد کل مشاهدات است. RMSE میزان تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد و هر چه این شاخص کم‌تر باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی بهتر است. MAE انحراف از خطا را نشان می‌دهد و بدیهی است هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. جامیسون و همکاران (جامینسون و همکاران، ۱۹۹۱) روشی ساده را برای برآورد خطا ارائه کردند که در آن میانگین مربعات خطا به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات است که با nRMSE نمایش داده می‌شود که در محدوده کم‌تر از ۱۰ درصد نشان‌دهنده کارکرد عالی، در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد نشان‌دهنده کارکرد بسیار خوب و در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد نشانه کارکرد متوسط و در بیش‌تر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده ضعیف بودن کارکرد مدل است که در بررسی‌های بنایان و هوگنبوم (۲۰۰۹) نیز این محدوده‌ها تائید شدند.

ارزیابی عملکرد زهکش

عکس‌العمل زهکش در تخلیه آب پروفیل خاک را با ضریب عکس‌العمل نشان می‌دهند. ضریب عکس‌العمل زهکشی پایان‌فصل گیاه برنج و در زمان کشت گیاه دوم از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$\alpha = \frac{Ln_{h(t-1)} - Ln_{h(t)}}{\Delta t} \times 100 \quad (۷)$$

که در این رابطه h_{t-1} و h_t به‌ترتیب مقدار بار آبی در گام زمانی قبل و زمان قرائت (سانتی‌متر) و Δt فاصله زمانی میان قرائت بار آبی (روز) است.

سناریوهای زهکش روباز

پس از اطمینان از نتایج مدل HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در منطقه مورد مطالعه، گزینه‌های مختلف طراحی زهکشی روباز مدل شد تا اثر ابعاد زهکش بر کنترل سطح ایستابی در منطقه برآورد شود. بدین منظور مدل برای دو فصل کشت گیاه برنج و گیاه کشت دوم در اراضی شالیزاری اجرا شد. در فصل کشت برنج، هدف بررسی افت سطح ایستابی در زمان قطع آبیاری در زمان برداشت برنج و در فصل کشت دوم، هدف بررسی افت سطح ایستابی بعد از بارش یک باران پنج روزه با شدت پنج سانتی‌متر بر روز (متوسط باران پنج ساله در منطقه) در نظر گرفته شد. ازآنجاکه در زهکشی سطحی، بسترسازی

نقش مؤثری دارد، فرض شد که با شیب‌بندی صحیح کرت‌ها، آب پس از قطع باران از سطح خاک حذف می‌شود.

زهکش‌های روباز با هندسه مقطع ذوزنقه‌ای به اعماق ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر با عرض کف ۱۴۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر و شیب دیواره یک به نیم شبیه‌سازی شدند؛ بنابراین ۱۲ حالت از ابعاد مختلف زهکش روباز (با توجه به ابعاد زهکش‌های موجود در منطقه)، برای تعیین بهترین ابعاد هندسی مورد ارزیابی قرار گرفتند. کدگذاری سناریوهای زهکش روباز براساس عمق، عرض کف و طول دوره زهکشی در جدول (۲) آمده است.

برای مقایسه توانایی طراحی‌های مختلف زهکش در کاهش سطح ایستابی و تخلیه آب از خاک، شش نقطه مشاهداتی در وسط و انتهای خط زهکش در سه عمق پنج (نزدیک سطح خاک)، ۲۷ (روی لایه سخت) و ۵۰ (عمق توسعه ریشه غالب گیاهان کشت دوم در اراضی شالیزاری) سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

جدول ۲- کدگذاری سناریوهای زهکش روباز در طول فصل رشد گیاه برنج و گیاه کشت دوم اراضی شالیزاری

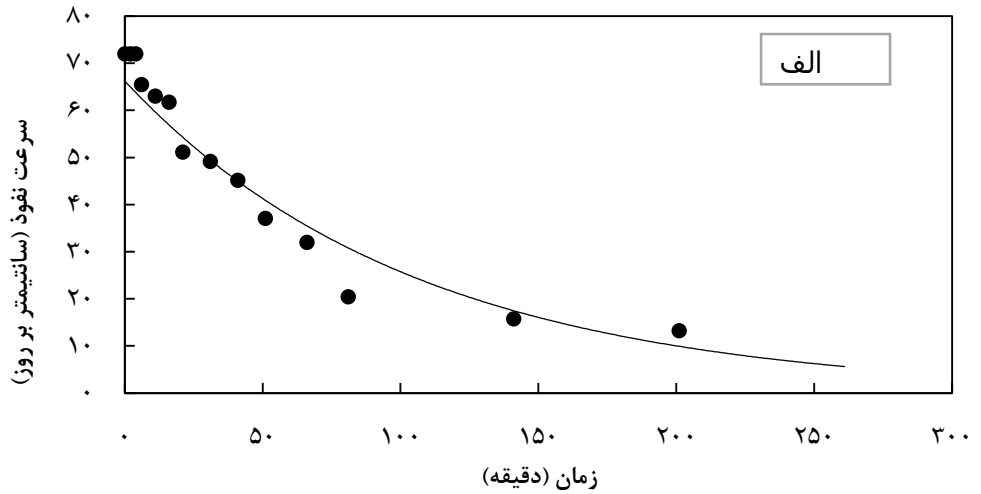
مفهوم هر یک از پارامترهای کدگذاری	کد سناریو
عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت برنج	$SD_{100}W_{140}R$
عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت برنج	$SD_{100}W_{170}R$
عمق و عرض کف ۱۵۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت برنج	$SD_{150}W_{140}R$
عمق و عرض کف ۱۵۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت برنج	$SD_{150}W_{170}R$
عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت برنج	$SD_{200}W_{140}R$
عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت برنج	$SD_{200}W_{170}R$
عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت دوم	$SD_{100}W_{140}AR$
عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت دوم	$SD_{100}W_{170}AR$
عمق و عرض کف ۱۵۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت دوم	$SD_{150}W_{140}AR$
عمق و عرض کف ۱۵۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت دوم	$SD_{150}W_{170}AR$
عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت دوم	$SD_{200}W_{140}AR$
عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر با شیب دیواره یک به نیم در دوره کشت دوم	$SD_{200}W_{170}AR$

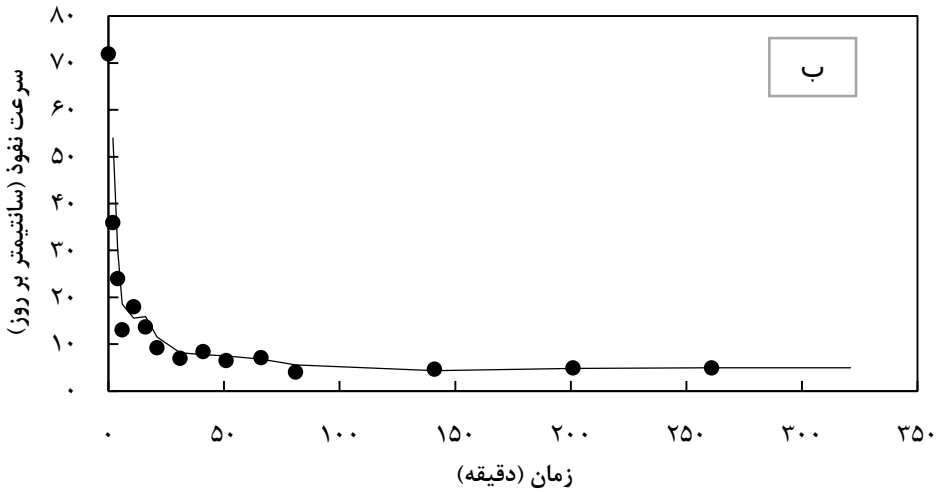
نفوذپذیری خاک

روند تغییرات سرعت نفوذ خاک در دو نقطه اندازه‌گیری شده در شکل (۴) آمده است. سرعت نفوذ نهایی که تقریباً معادل هدایت آبی اشباع در نظر گرفته می‌شود به ترتیب در سمت چپ و راست زهکش برابر با ۱۳/۲۴ و ۴/۹۳ سانتی‌متر بر روز به‌دست آمد که بر اساس کلاس زهکشی (هانت و جلیکس، ۱۹۹۲)، خاک در نقطه سمت چپ مستعد آب‌گرفتگی و دارای کلاس زهکشی ضعیف و در نقطه سمت راست، مستعد آب‌گرفتگی و دارای کلاس زهکشی فوق‌العاده ضعیف است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

داده‌های مشاهداتی بار آبی پیزومتر و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مدل مقایسه شدند. نتایج این ارزیابی با ریشه میانگین مربعات خطای ۴/۳ سانتیمتر و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده زیر ۱۰ درصد در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی (جدول ۳)، نشان می‌دهد مدل توانست به‌خوبی شبیه‌سازی را انجام دهد و می‌توان به نتایج شبیه‌سازی مدل اعتماد نمود. مقادیر پارامترهای خاک که طی مرحله واسنجی که به روش حل معکوس مشخص شدند در جدول (۴) آمده است. مقایسه هدایت آبی اشباع به‌دست‌آمده از طریق حل معکوس در لایه‌های اول خاک در دو پروفیل سمت چپ و راست زهکش با مقادیر نفوذ نهایی به‌دست‌آمده در آزمایش استوانه مضاعف نشان می‌دهد که مدل توانسته است به‌خوبی شرایط ورود آب به لایه خاک را شبیه‌سازی نماید.





شکل ۴- سرعت نفوذ لحظه‌ای خاک در نقطه سمت چپ زهکش (الف) و سمت راست زهکش (ب)

جدول ۳- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

مرحله ارزیابی	MAE (سانتی‌متر)	nRMSE (درصد)	RMSE (سانتی‌متر)	R^2 (-)
واسنجی	۳/۵۵	۱/۶۰	۴/۳۹	۰/۹۸
اعتبارسنجی	۳/۳۷	۱/۶۷	۴/۳۳۷	۰/۹۸

جدول ۴- مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی در لایه‌های مختلف پروفیل‌های سمت چپ و راست زهکش

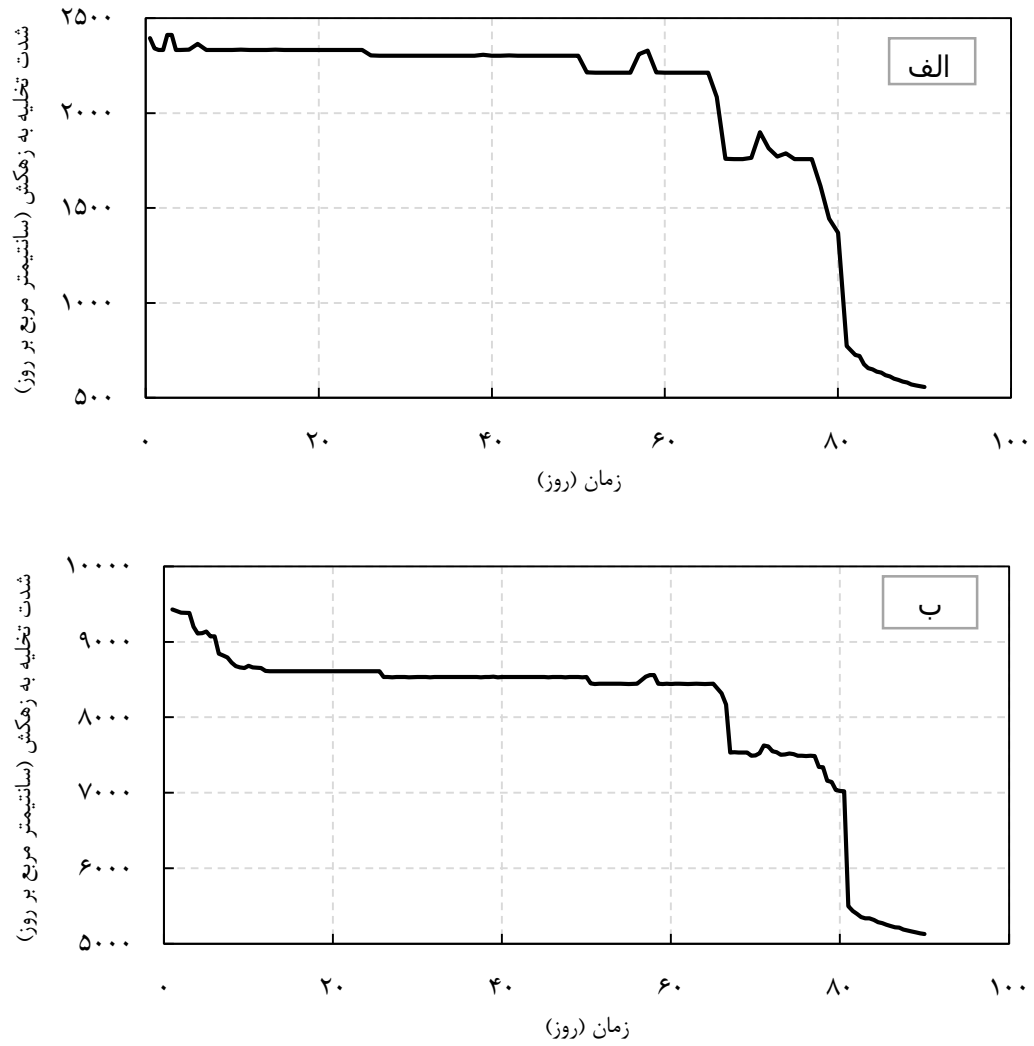
	سمت چپ زهکش						سمت راست زهکش					
	شماره لایه											
پارامتر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۱	۲	۳	۴	۵	۶
K_s (cm/day)	۱/۳۸	۰/۴	۱۸/۲	۲۶/۰۲	۵/۲۶	۹/۶	۱۲/۹۶	۰/۹۱	۵/۷	۳/۷۹	۷/۴۹	۱۹/۴۴
(-)n	۳/۱۱۰۹	–	–	–	–	–	–	۱/۶۲۰۲	–	–	–	–
sΘ	–	۰/۴۳۱۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

شبیه‌سازی سناریوهای زهکش

نتایج شبیه‌سازی زهکش‌های روباز در طول دوره کشت برنج در جدول (۴) و شکل (۵) مقادیر شبیه‌سازی‌شده شدت تخلیه زه‌آب در زهکش روباز با عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر و عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر را برای نمونه نشان می‌دهد. مطابق با شکل در زهکش با عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر، شدت تخلیه آب داخل زهکش به ازای طول واحد زهکش در روز اول شبیه‌سازی ۲۳۴۰/۵ سانتی‌متر مربع در روز بود و تا روز ۶۶ ام با یک شیب بسیار ملایم میزان این تخلیه کم شد. در روز ۶۷ ام تخلیه آب با کاهش چشمگیری به حدود ۱۷۵۹ سانتی‌متر مربع در روز رسید که این کاهش چشمگیر به علت قطع آبیاری پس از شروع بارش‌های خفیف بود. از روز ۷۵ ام با قطع بارش تا روز ۹۰ ام، زه‌آب با شیب تندتر و سرعت بیشتری در حال تخلیه است و در روز ۹۰ ام به ۵۵۵ سانتی‌متر مربع در روز رسید. در نهایت میزان کل زه‌آب تخلیه‌شده در واحد طول زهکش در ۹۰ روز شبیه‌سازی حدود ۱۸۱۹۲۰ سانتی‌متر مربع به‌دست آمد. مقایسه گزینه‌های مختلف طراحی زهکش روباز در جدول (۴) نشان می‌دهد با افزایش عمق زهکش روباز شدت تخلیه آب بیشتر بود به‌طوری که افزایش عمق زهکش از ۱۰۰ به ۱۵۰ سانتی‌متر و از ۱۵۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر در عرض کف ۱۴۰ سانتی‌متر، به ترتیب منجر به افزایش ۱۷۰/۹۱ و ۴۸/۳ درصدی شد. درحالی‌که افزایش عمق از ۱۰۰ به ۱۵۰ و از ۱۵۰ به ۲۰۰ سانتی‌متری در عرض کف ۱۷۰ سانتی‌متری افزایش ۱۷۵/۴۷ و ۴۴/۹۵ درصدی را به همراه داشت؛ بنابراین اثر عمق زهکش از عرض کف زهکش روباز بیشتر بوده و همچنین تغییر عمق از ۱۰۰ به ۱۵۰ سانتی‌متر نسبت به تغییر عمق از ۱۵۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر تأثیر بیشتری بر حجم آب خروجی از خاک داشت. برای بررسی زمان مناسب برای ورود ماشین‌آلات به داخل اراضی برای برداشت محصول، مکش خاک در نقطه مشاهداتی رو و زیر لایه سخت در وسط کرت مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان مکش و خشکی ایجادشده در ابعاد مختلف زهکش، تفاوت معنی‌داری نداشت و هیچ یک از ابعاد زهکش نتوانستند وضعیت رطوبتی خاک را به ظرفیت زراعی برسانند. از این‌رو شرایط مناسب برای برداشت مکانیزه محصول برنج ظرف مدت ده روز زهکشی با ابعاد زهکش‌های روباز مورد بررسی روی نمی‌دهد.

جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف زهکش روباز در طول دوره کشت گیاه برنج

کد سناریو	شدت تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش در روز اول ($cm^2.day^{-1}$)	شدت تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش در روز ۹۰ام ($cm^2.day^{-1}$)	مجموع تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش (cm^2)	مکش در نقطه مشاهداتی بر روی لایه سخت در وسط کرت در روز خروج خاک از حالت اشباع (cm)	مکش در نقطه مشاهداتی بر روی لایه سخت در وسط کرت ۱۰ روزپس از خروج خاک از حالت اشباع (cm)	مکش در نقطه مشاهداتی زیر لایه سخت در وسط کرت ۱۰ روزپس از خروج خاک از حالت اشباع (cm)
$SD_{100}W_{170}R$	۲۳۴۰	۵۵۵	۱۸۱۹۲۰	−۱۲/۷۵	−۳۰/۳۱	−۱۵/۳۸
$SD_{100}W_{140}R$	۲۳۰۹	۵۲۳	۱۷۱۱۹۰	−۱۲/۶۵	−۳۰/۱۶	−۱۵/۳۵
$SD_{150}W_{170}R$	۶۶۴۱	۲۹۹۸	۵۰۱۱۴۰	−۱۲/۶۹	−۳۰/۴۹	−۱۵/۳۹
$SD_{150}W_{140}R$	۵۹۹۲	۲۷۳۰	۴۶۳۷۸۰	−۱۲/۷۱	−۳۰/۵۱	−۱۵/۳۲
$SD_{200}W_{170}R$	۹۴۲۸	۵۱۲۹	۷۲۶۴۴۰	−۱۲/۷۶	−۳۰/۵۴	−۱۵/۳۳
$SD_{200}W_{140}R$	۹۰۳۸	۴۸۶۰	۶۸۷۹۸۰	−۱۲/۷۲	−۳۰/۵۲	−۱۵/۳۳



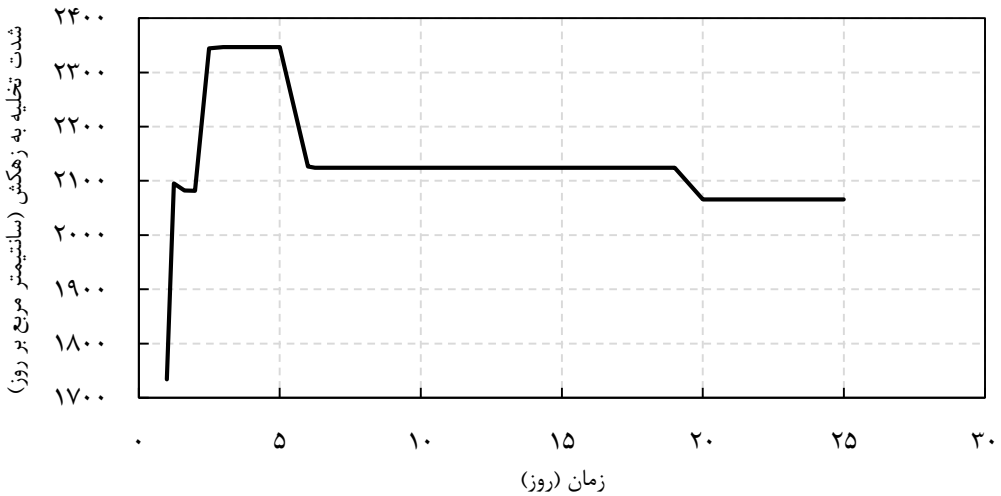
شکل ۵- مقادیر شبیه‌سازی‌شده تخلیه زه‌آب در زهکش روباز با عمق و عرض کف ۱۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر (الف) و عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر (ب)

برای بررسی عملکرد زهکش در دوره رشد کشت گیاه دوم در اراضی شالیزاری، سطح خاک به میزان ۱۳۶/۶- سانتی‌متر به حالت مکش در نظر گرفته شد. همچنین ۵ سانتی‌متر باران بی‌وقفه در طول پنج روز متوالی به‌عنوان شرایط بحرانی برای دوره کشت دوم در مدل اعمال و اثر آن بر کنترل سطح ایستابی مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۶) نتایج شبیه‌سازی زهکش‌های روباز بعد از دوره کشت گیاه برنج و شکل (۶) مقادیر شبیه‌سازی شده شدت تخلیه زه‌آب زهکش روباز با عمق ۱۰۰ و عرض کف ۱۷۰ سانتی‌متر را در دوره کشت گیاه دوم نشان می‌دهد. طبق نتایج شکل (۶) در روز اول، پنجم و ششم شبیه‌سازی شدت تخلیه زه‌آب به ازای واحد طول زهکش به ترتیب ۱۷۳۳، ۲۳۴۶ و ۲۱۲۶ سانتی‌متر مربع در روز به دست آمد. همچنین مجموع زه‌آب تخلیه‌شده به ازای واحد طول زهکش در پنج روز اول شبیه‌سازی ۱۰۸۵۷ سانتی‌متر مربع بود. طبق نتایج در پنج روز اول شبیه‌سازی به علت باران پنج‌روزه، روی سطح خاک آب‌ماندگی ایجاد شد. پس از قطع بارش سطح ایستابی کاهش پیدا کرد. سطح آب در روز پنجم و ششم شبیه‌سازی در نقطه مشاهداتی نزدیک به زهکش، به ترتیب ۱/۲ سانتی‌متر روی خاک و ۲/۸ سانتی‌متر زیر سطح خاک به‌دست آمد در حالی‌که در نقطه مشاهداتی وسط کرت ارتفاع آب به ترتیب ۴/۶ سانتی‌متر روی سطح خاک و روی سطح خاک بود. سطح ایستابی در این نقطه در روز اول شبیه‌سازی در عمق ۳۵ سانتی‌متر قرار داشت

که می‌تواند به علت سرعت نفوذ آب در خاک باشد. در پنج روز اول با گذشت زمان، آب در داخل خاک جمع شده و روی سطح خاک رسید. همچنین سطح ایستابی از اواسط روز دوم تا روز پنجم ثابت بود. جدول (۵) نشان می‌دهد که با افزایش عمق زهکش روباز شدت تخلیه آب بیشتر شد به‌طوری‌که افزایش عمق زهکش از ۱۰۰ به ۱۵۰ سانتی‌متر و از ۱۵۰ به ۲۰۰ سانتی‌متر در عرض کف ۱۴۰ سانتی‌متر، به ترتیب منجر به افزایش ۱۶۹/۷ و ۴۸/۸ درصدی شد. درحالی‌که در عرض کف ۱۷۰ سانتی‌متری افزایش ۱۷۳/۵ و ۴۵/۶ درصدی را به همراه داشت. بنابراین مشابه نتایج دوره رشد گیاه برنج، اثر تغییر بر عمق زهکش از عرض کف بیشتر بود و عمق ۱۵۰ سانتی‌متری بر تخلیه زه‌آب پروفیل خاک بیشترین تأثیر را داشت. مقایسه مکش خاک در عمق پنج سانتی‌متری در وسط کرت و نزدیک زهکش نشان می‌دهد که سطح خاک پس از دو هفته زهکشی، نتوانست مکش قابل قبولی ایجاد نماید. سطح ایستابی در وسط کرت نیز پس از گذشت دو هفته زهکشی، به عمق ۶ سانتی‌متری خاک رسید و با توجه به عمق توسعه ریشه گیاهان کشت دوم نمی‌تواند، شرایط خوبی برای گیاه ایجاد نماید. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد بزرگ‌تر زهکش روباز در کشت دوم نمی‌تواند تفاوت معنی‌داری در شرایط تهویه خاک ایجاد کند و افزایش عمق و عرض کف زهکش صرفاً حجم آبی که از لایه‌های پایین‌تر خاک تخلیه می‌کند را افزایش می‌دهد اما در ایجاد مکش بیشتر در لایه‌های سطحی خاک موفق نبود.

جدول ۶- نتایج شبیه‌سازی سناریوهای زهکش روباز در دوره کشت گیاه دوم

کد زهکش	شدت تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش در روز اول ($cm^2.day^{-1}$)	شدت تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش روز ۵ ام ($cm^2.day^{-1}$)	شدت تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش روز ۶ ام ($cm^2.day^{-1}$)	مجموع تخلیه در طول واحد زهکش زه‌آب روز ۲۰ ام (cm^2)	مکش در عمق پنج سانتیمتری خاک وسط کرت دو هفته پس از قطع باران (cm)	مکش در عمق پنج سانتیمتری خاک در نزدیک زهکش دو هفته پس از قطع باران (cm)	سطح ایستابی در وسط کرت دو هفته پس از قطع باران (cm)
$SD_{100}W_{170}AR$	۱۷۳۳	۲۳۴۶	۲۱۲۶	۴۲۶۶۲	-۰/۴۹	-۲/۸۸	۶/۱
$SD_{100}W_{140}AR$	۱۷۳۰	۲۲۳۱	۱۹۷۶	۴۰۰۰۳	-۰/۴۹	-۲/۸۸	۶/۱
$SD_{150}W_{170}AR$	۵۴۵۴	۶۱۲۳	۵۸۲۱	۱۱۶۷۰۰	-۰/۴۹	-۲/۱۲	۶/۱
$SD_{150}W_{140}AR$	۴۸۸۱	۵۶۶۹	۵۳۹۳	۱۰۷۹۱۰	-۰/۴۹	-۲/۱۲	۶/۱
$SD_{200}W_{170}AR$	۷۹۴۲	۸۷۳۴	۸۴۹۴	۱۶۹۹۶۰	-۰/۴۹	-۳/۴۵	۶/۱
$SD_{200}W_{140}AR$	۷۳۹۱	۸۴۸۶	۸۰۲۶	۱۶۰۶۶۰	-۰/۴۹	-۳/۴۳	۶/۱



شکل ۶- مقادیر شبیه‌سازی‌شده تخلیه زه‌آب در طول واحد زهکش روباز با عمق ۱۰۰ و عرض کف ۱۷۰ سانتی‌متر در دوره کشت گیاه دوم

بررسی ضریب عکس‌العمل و نرخ کاهش سطح ایستابی

طبق نتایج ضریب عکس‌العمل زهکش‌های روباز در جدول (۷) تفاوت معنی‌داری بین ضریب عکس‌العمل گزینه‌های طراحی زهکش روباز در دوره کشت برنج و پس از آن مشاهده نشد. ضرایب عکس‌العمل بر اساس افت بار آبی در وسط کرت محاسبه‌شده است که عدم تفاوت مقادیر آن در ابعاد مختلف زهکش نشان می‌دهد که زهکش روباز اثرگذاری بر روی تخلیه پروفیل خاک ندارند. مقادیر ضریب عکس‌العمل در مقایسه با ضریب عکس‌العمل زهکش‌های لوله‌ای نشان می‌دهد که توانایی تخلیه مؤثر آب را در زمان کشت دوم و برداشت محصول برنج ندارد. مومن‌نژاد (۲۰۱۷)، ضریب عکس‌العمل زهکش زیرزمینی با عمق و فاصله ۷۰ و ۵۰۰ سانتی‌متر و پوشش ژئوتکستایل (PP450) را برای کشت برنج، نزدیک به یک گزارش کرد. این تفاوت بین زهکش روباز و زیرزمینی علاوه بر ماهیت این دو زهکش می‌تواند در شیوه اجرای زهکش روباز باشد که صرفاً در انتهای کرت قابل اجرا است در حالی‌که زهکش زیرزمینی در فواصل ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ سانتی‌متری در اراضی شالیزاری قابل اجرا است و ازاین‌رو پتانسیل بیشتری در تخلیه پروفیل خاک دارد. ضریب عکس‌العمل در زمان قطع منبع تغذیه (آبیاری یا باران) بر اساس افت بار آبی محاسبه می‌شود ازاین‌رو ضریب عکس‌العمل در دوره کشت برنج نسبت به گیاه کشت دوم متفاوت (حدود دو برابر بیشتر) به‌دست آمد. در زمان قطع آبیاری در دوره کشت برنج، ارتفاع آب روی خاک با توجه به عرف آبیاری در استان گیلان ۳۰ میلی‌متر بود درحالی‌که در زمان کشت گیاه دوم، شدت باران پنج‌روزه پنج سانتی‌متر بر روز منجر به ارتفاع آب ۴۶ میلی‌متر شد.

جدول ۷- میانگین ضریب عکس‌العمل زهکش روباز دوره کشت گیاه برنج و گیاه دوم

کد سناریو	ضریب عکس‌العمل دوره کشت برنج(day^{-1})	کد سناریو	ضریب عکس‌العمل دوره گیاه دوم (day^{-1})
$\boldsymbol{SD_{100}W_{170}R}$	۰/۲۸۶	$SD_{100}W_{170}AR$	۰/۵۸۳۰
$\boldsymbol{SD_{100}W_{140}R}$	۰/۲۸۳	$SD_{100}W_{140}AR$	۰/۵۸۳۰
$\boldsymbol{SD_{150}W_{170}R}$	۰/۲۸۶	$SD_{150}W_{170}AR$	۰/۵۸۲۷
$\boldsymbol{SD_{150}W_{140}R}$	۰/۲۹۳	$SD_{150}W_{140}AR$	۰/۵۸۲۹
$\boldsymbol{SD_{200}W_{170}R}$	۰/۲۹۳	$SD_{200}W_{170}AR$	۰/۵۸۳۱
$\boldsymbol{SD_{200}W_{140}R}$	۰/۲۸۶	$SD_{200}W_{140}AR$	۰/۵۸۳۱

زهکش با عمق و عرض کف ۲۰۰ و ۱۷۰ سانتی‌متر در طول دوره کشت برنج حجم آب بیشتری را نسبت به گزینه‌های دیگر تخلیه و در نهایت سطح ایستابی را تا عمق ۷۴ سانتی‌متری کنترل کرد؛ اما به نظر می‌رسد این حجم از تخلیه زه‌آب منجر به هدررفت زیاد آب‌شده و با اعمال سازه کنترل‌کننده در آن می‌توان از تخلیه بیش از حد زه‌آب جلوگیری نمود. این ابعاد زهکش در کشت دوم توانست سطح ایستابی را تا عمق ۲۵ سانتی‌متر کنترل نماید که اگرچه برای گیاهان با عمق توسعه ریشه کمتر از ۲۵ سانتی‌متری مناسب است (اگرچه صعود کاپیلاری را نیز می‌بایست لحاظ نمود که منجر می‌شود گیاهان با عمق توسعه ریشه کمتر شرایط بهتری داشته باشند) اما برای کشت گیاهان کشت دوم با عمق توسعه ریشه حدود ۵۰ سانتی‌متر، مؤثر نیست. اگرچه به دلیل لایه سخت در اراضی شالیزاری، عمق ریشه گیاه غالباً تا حدود ۳۰ سانتی‌متر محدود می‌شود، چنین ابعادی از زهکش روباز نسبتاً هدف را برآورده می‌نماید؛ اما این شرایط در باران‌های با تداوم بیشتر از پنج روز و یا شدت بارش بیشتر از پنج سانتی‌متر بر روز بحرانی‌تر خواهد شد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌منظور انتخاب ابعاد بهینه زهکش روباز برای جلوگیری از آب‌گرفتگی و ایجاد شرایط مناسب کشت گیاه برنج و گیاه کشت دوم در طرح تجهیز و یکپارچه‌سازی در اراضی شالیزاری انجام شد. برای شبیه‌سازی عملکرد زهکش در هندسه‌های مختلف از مدل HYDRUS-2D استفاده شد و برای ۱۳۰ هکتار از اراضی شالیزاری روستای نوده، جیرسر و نوپاشان شهرستان صومعه‌سرای استان گیلان واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج اعتبارسنجی مدل با توجه به شاخص‌های آماری ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب ۰/۹۸ و ۱/۶۷ درصد نشان از دقت مناسب مدل داشت؛ بنابراین نتایج مدل در شبیه‌سازی سناریوهای مختلف زهکش روباز قابل اعتماد است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده زهکش روباز با مقطع ذوزنقه‌ای به عمق ۲۰۰ و عرض کف ۱۷۰ سانتی‌متر توانست با میزان شدت تخلیه ۹۴۲۸ و ۷۹۴۲ سانتیمتر مکعب بر روز در طول واحد زهکش یک روز پس از شروع فرآیند زهکشی در دوره کشت برنج و کشت گیاه دوم بیشترین تأثیر را بر سطح ایستابی و رطوبت خاک داشته باشد. اگرچه مقطع هندسی ذکرشده بهترین کنترل را بر سطح ایستابی داشت اما در کشت گیاه برنج، منجر به تخلیه بیشتر از حد آب از خاک می‌شود این در حالی است که برای گیاهانی کشت دومی که عمق توسعه ریشه آن‌ها از ۲۵ سانتی‌متر بیشتر شود، این مقطع زهکشی کارکرد مناسبی ندارد و به نظر می‌رسد در چنین اراضی می‌بایست از زهکش زیرزمینی بهره برد. ابعاد بهینه زهکش روباز به‌دست‌آمده بزرگ‌تر از کانال‌های زهکشی کنونی اراضی است و اگرچه تا حدودی پاسخگوی اهداف زهکشی در اراضی شالیزاری می‌تواند باشد، اما ابعاد بزرگ آن می‌تواند محدودیت‌هایی را در مزارع تجهیز و یکپارچه‌سازی ایجاد نماید که با اقداماتی مانند پر کردن زهکش با مواد متخلخل شاید بتوان بخشی از آن را کاهش داد. مقایسه عملکرد زهکش زیرزمینی با زهکش روباز با ابعاد به دست آمده در طرح‌های تجهیز و یکپارچه‌سازی و انتخاب گزینه مناسب‌تر در این اراضی، نیازمند مطالعات اقتصادی و فنی بیشتری است که امید است در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

فهرست منابع

۱. احمدی، ک.، عبادزاده، ح. ر.، عبدشاه، ه.، کاظمیان، آ. و رفیعی، م. ۱۳۹۷. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، جلد اول: محصولات زراعی، وزارت جهاد کشاورزی،معاونت برنامه‌وبودجه، اداره کل آمار و اطلاعات، ۱۱۶صفحه.

۲. احمدی، ک.، عبادزاده، ح. ر.، حاتمی، ف.، عبدشاه، ه. و کاظمیان، ا. ۱۳۹۹. آمارنامه کشاورزی جهاد کشاورزی، جلد اول: محصولات زراعی.

۳. عظیمی، ر. ۱۳۸۶. تحلیلی بر روند اجرایی طرح تجهیز، نوسازی و یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری استان مازندران، انتشارات جهاد کشاورزی ساری.

۴. پیرمرادیان، ن.، ذکری، ف.، رضایی، م. و عبدالهی، و. ۱۳۹۲. استخراج ضرایب گیاهی سه رقم برنج بر پایه روش برآورد تبخیر-تعرق مرجع در منطقه رشت، نشریه تحقیقات غلات، شماره ۲، صفحه‌های ۱۰۶-۹۵.

۵. محمدپور، ف. ۱۳۹۸. بررسی اثر خصوصیات ترانشه بر عملکرد زهکش زیرزمینی در خاک رسی با استفاده از مدل HYDRUS-2D، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۶. معماری، ن.، نوابیان، م.، پیرمرادیان، ن. و اصفهانی، م. ۱۳۹۷. ارزیابی عملکرد زهکش زیرزمینی بر رشد گیاه لوبیا محلی در اراضی شالیزاری با استفاده از مدل فیزیکی. مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، دوره ۴۹ ، شماره ۶، صفحه‌های ۱۲۵۵-۱۲۴۴.

۷. مومن‌نژاد، ز. ۱۳۹۷. مقایسه کارایی مدل‌های SWAP و DRAINMOD در شبیه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی کنترل‌شده در مقیاس مدل فیزیکی اراضی شالی‌زاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۸. مومن‌نژاد، ز.، نوابیان، م.، و اسمعیلی ورکی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل DRAINMOD با استفاده از مدل فیزیکی در شبیه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی میان‌فصل و پایان‌فصل اراضی شالیزاری، مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۱، صفحه‌های ۱۳-۲۴.

۹. نشریه ۴۶۷ دفتر نظام فنی اجرایی. ۱۳۸۷. دستورالعمل تجزیه‌های آزمایشگاهی آب‌وخاک، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، جلد، ۲۸۷ صفحه.

10. Belmans, C., Wesseling, J. G., and Feddes, R. A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE, Journal of hydrology, Vol 63: 271-286.
11. Bannayan, M. and Hoogenboom, G. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivarcoefficients of a crop simulation model, Field Crops Research, 1: 290-302.
12. Chen, K., Yu, S., Ma, T., Ding, J., He , P., Li, Y., Dai, Y. and Zeng, G. 2022. Modeling the Water and Nitrogen Management Practices in Paddy Fields with HYDRUS-1D. Agriculture, 12, 924.
13. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Abbasi, F. and Navabian, M. 2012. Comparison of one and two-dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138 (10): 929-938.
14. Feddes, R. A., Kowalik, P. J., and Zaradny, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons, New York, NY.
15. Hunt, N., and Gilkes، R. 1992 .Farm monitoring handbook- A practical down-to-earth manual for farmers and other land users, University of Western Australia: Nedlands, W. A. and Land Management Society: Como, W.A.
16. 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 crop research, Vol 27: 337-350.
17. 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.
18. Simunek, J., Sejna, 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 Department of Agriculture, Riverside, Calif.

19. Šimůnek, J., Van Genuchten, M. Th., and Šejna, M. 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic.
20. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", Soil Science Society American Journal, 44: 892-898.
21. Yang, R., Tong, J., Hu, B. X., Li, J., and Wei, W. 2017. Simulating water and nitrogen loss from an irrigated paddy field under continuously flooded condition with Hydrus-1D model. Environmental Science Pollutant Resource. 24(17):15089-15106.
22. Zhang, J., Zhu,Y., Yu, L., Yang, M., Zou, X., Yin, C., and Lin, Y. 2022. Research Advances in Cadmium Uptake, Transport and Resistance in Rice (Oryza sativa L.). MDPI. 11:569.

Investigation of the Dimensions of Open Drains in Paddy Fields of Land Consolidation Project

T. Gholami Estalkhi Kohi, M. Navabian[1], and M. Esmaeili Varaki

MSc. student, Water Eng. Dept., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan.

t.gholami92@yahoo.com

Associated Prof., Water Eng. Dept., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; and Dept. of Water Eng. and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran.

Navabian@guilan.ac.ir

Associated Prof., Water Eng. Dept., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; and Dept. of Water Eng. and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran.

esmaeili@guilan.ac.ir

Received: August 2022 and Accepted: December 2022

Abstract

Construction of drainage systems is inevitable in paddy fields to control the level of waterlogging during rice harvest and cultivation of the second crop. Finding the best design option of drainage is very important from the point of view of environmental and economic issues. This study was conducted with the aim of investigating the performance of open drains including pressure head and depletion flux in controlling the water level in the cultivation of rice plants and the second plant in paddy fields. In this regard, the performance of open drains during rice and the second crop growth period was simulated using HYDRUS-2D model. To calibrate and validate HYDRUS-2D model, the required information was collected from 130 hectares of paddy fields in Nodeh, Jirsar and Nupashan villages in Soumesara region, in 2019. Soil texture, bulk and specific density, porosity and infiltration rate were measured. Also, pressure head of water was measured monthly in the region by piezometers. After validation, different open drain design options (bottom width and depth of drain) were run in HYDRUS-2D and its results were compared. The simulation results showed that the HYDRUS-2D had a reasonable accuracy in simulating the changes in water pressure head. The statistical indexes including R^2, RMSE, nRMSE and MAE in the calibration stage were 0.98, 4.39 cm, 1.6%, and 3.55 cm, respectively, and 0.98, 4.33 cm, 1.67%, and 3.37 cm in the validation stage, respectively. The results showed that the open drain with a depth and bottom width of, respectively, 200 and 170 cm had the best performance for controlling water table during rice and the second crop cultivation, with a discharge rate of 726440 and 169960 cm^3 per unit of drain length, and the reaction coefficient of 0.293 and 0.583 per day, respectively.

Keywords: Water table, Drainage depth, Drain bottom width, HYDRUS-2D

[1] - Corresponding author: Water Eng. Dept., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; and Dept. of Water Eng. and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran.