

شبیه‌سازی انتقال آب و نترات در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D در آبیاری جویچه‌ای نیشکر

نادر سلامتی^{۱*}، معصومه دلبری^۲، فریبرز عباسی^۳ و علی شینی دشتگل^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۳۰)

چکیده

شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک، برای مدیریت بهینه مصرف آب و کود در مزرعه بسیار مؤثر است. در این تحقیق از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی انتقال آب و نترات در آبیاری جویچه‌ای نیشکر استفاده شد. آزمایش به صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در یک قطعه ۲۵ هکتاری در اراضی کشت و صنعت نیشکر دهخدا از اسفندماه ۱۳۹۱ تا مهرماه ۱۳۹۲ اجرا شد. فاکتور اصلی تقسیط‌های کودی بود که در سه سطح (دو تقسیطی، سه تقسیطی و چهار تقسیطی) اعمال گردید. فاکتور فرعی سطوح کود مصرفی بود که در سه سطح (۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۶۰٪ کود مورد نیاز به ترتیب معادل ۳۵۰، ۲۸۰ و ۲۱۰ کیلوگرم کود اوره) اعمال شد. تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق مدل‌سازی معکوس و با استفاده از داده‌های رطوبتی که در طول دوره بیش از ۴ ماه از رشد نیشکر به دست آمده بود، انجام گرفت. پارامترهای انتقال املاح با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و داده‌های غلظت نترات برآورد گردید. براساس نتایج حاصله ضریب همبستگی میزان رطوبت و غلظت نترات مشاهده و شبیه‌سازی شده در تیمار چهار تقسیطی و ۶۰٪ سطح کودی (تیمار واسنجی شده) به ترتیب معادل ۶۲/۷ و ۹۱/۲ درصد برآورد گردید. عمق نفوذ تجمعی در تیمارهای واسنجی و اعتبارسنجی شده به ترتیب ۴۶ و ۵۸ میلی‌متر و میزان تبخیر-تعرق تجمعی در تیمارهای مذکور به ترتیب ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر به دست آمد. دامنه تغییرات میزان رطوبت در لایه سطحی خاک در تیمارهای واسنجی و اعتبارسنجی شده به ترتیب معادل ۲۱ تا ۴۵ و ۲۱ تا ۴۲ درصد بود. این در حالی است که میزان رطوبت در لایه عمقی در هر دو تیمار از ۳۳ تا ۳۸ درصد متغیر بود.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی، مدل‌سازی معکوس، نفوذ، انتقال املاح

۱. ایستگاه تحقیقات کشاورزی بهبهان

۲. گروه مهندسی آب دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

۳. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

۴. اداره آبیاری و زهکشی، موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: nadersalamati@yahoo.com

مقدمه

به علت رشد جمعیت و محدودیت منابع آب، آبیاری در کشاورزی باید در جهت تولید محصول بیشتر با میزان آب کمتر حرکت کند. فهم حرکت آب در ساز و کار جذب آب توسط ریشه می تواند کمک مؤثری در راستای این چالش نماید. شبیه سازی عددی راه حل مؤثر در بهینه سازی مدیریت آب در مزرعه می باشد (۱۴ و ۱۷). نظر به این که آگاهی از انتقال املاح از لایه سطحی خاک به لایه های زیرین خاک و آب زیرزمینی و یا انتقال سطحی املاح به علت تأثیر فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی موجود در خاک که به صورت مکانی و زمانی تغییر می کنند بسیار پیچیده است، لذا مدل های ریاضی می توانند نقش مهمی در این رابطه ایفا کنند. مدل هایی که جریان آب را در زیر سطح خاک شبیه سازی می کنند، براساس حل عددی معادله ریچاردز می توانند نفوذ و حرکت آب در خاک را شبیه سازی کنند. همچنین این مدل ها می توانند اثرات تغییر در محتوای خاک را با شرایط هیدرولیکی سطح خاک و شرایط نفوذ آب به خاک منطبق کنند (۲۴). از این موارد می توان به مدل HYDRUS-1D که یکی از مدل های پیشرفته در ارتباط با حرکت یک بعدی آب، املاح و گرما در خاک می باشد (۱۸)، اشاره کرد. این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال-انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک در شرایط اشباع و غیراشباع بوده و توانایی تخمین خصوصیات خاک به روش معکوس را دارد. روش مدل سازی معکوس یکی از روش های غیرمستقیم برای تخمین ویژگی های خاک است که در کارهای مهندسی کاربرد بیشتری دارد. در این روش، ویژگی های خاک بر پایه متغیرهای زودیافت در شرایط واقعی برآورد می شوند. همچنین مدل سازی معکوس توانایی برآورد هم زمان ویژگی های هیدرولیکی و انتقال املاح را دارد که در این صورت، اثرهای متقابل پارامترهای هیدرولیکی و انتقال و ویژگی هایی از خاک که قرار است به روش معکوس تعیین شوند، در نظر گرفته می شود (۵).

دانشمندان بسیاری الگوی پخش آب در خاک را اندازه گیری

یا به صورت عددی در آبیاری سطحی و زیرسطحی شبیه سازی نموده اند (۳، ۱۲، ۱۶ و ۲۶). تعدادی از محققین در شبیه سازی از مدل HYDRUS استفاده کرده اند (۱۲، ۲۲ و ۲۳). در بین آنها می توان به کارهایی اشاره کرد که با مقایسه نتایج شبیه سازی شده و داده های مشاهداتی آبیاری قطره ای همبستگی خوبی بین آنها به دست آمد (۲۳). پژوهشگران برای بررسی الگوی رطوبتی با استفاده از سه بافت خاک، دو نوع قطره چکان سطحی و زیرسطحی و دو راه حل عددی (HYDRUS) و تحلیلی (روش فیلیپ) دریافتند که هر دو روش مذکور تخمین قابل قبولی از جبهه رطوبتی دارند (۱۰). اما روش تحلیلی ارایه شده توسط (۱۹) که با استفاده از فرضیات منبع نقطه ای و روش های قطعیت برای خواص فیزیک خاک پایه گذاری شده اند، توانایی سریع تری جهت تصمیم گیری جبهه رطوبتی را خواهند داشت. در مقابل، روش عددی با وجود فرضیات کمتر به محاسبات مهم و دقیق تری نیاز دارند.

دو آزمایش قطره ای زیرسطحی در شرایط آزمایشگاه و مزرعه انجام شد (۱۴ و ۱۵). مقایسه داده های اندازه گیری و شبیه سازی شده برای هر دو درصدهای رطوبت خاک و ابعاد ناحیه خیس شده نشان داد که دقت مدل HYDRUS بسیار بالا بوده و می توان از آن به عنوان ابزاری مفید که قادر به بهینه کردن همه فاکتورهای اصلی در امر طراحی سیستم های قطره ای زیرسطحی است، استفاده کرد (۱۴ و ۱۵). دو نفر از محققین به بررسی الگوی پخش آب ایجاد شده با لوله های سفالی به طول ۲۰ متر و عمق ۴۰ سانتی متر برای چهار ارتفاع فشار پرداختند. از مقایسه داده های اندازه گیری و شبیه سازی شده با مدل HYDRUS با سه مقیاس آماری (R^2 , RMSE, ME) نتایج مشابهی به دست آمد که بیانگر کارایی خوب مدل در تخمین الگوی رطوبتی می باشد (۱۹). در تحقیقات دیگر که به طور مجزا انجام پذیرفت به همبستگی داده های اندازه گیری شده و اندازه های به دست آمده از مدل HYDRUS روش های تحلیل و تجربی اشاره شده است (۴ و ۱۳). در تحقیقی که برای یک مزرعه زیر کشت فلفل سبز انجام گردید، نتیجه گیری شد که با

$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$ ۰/۴۶ و مقادیر ME از ۱/۹۹ تا $\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$ ۸/۷۲ متغیر بود (۲).

نتایج تحلیل آنالیز حساسیت مدل، در پژوهشی دیگر نشان داد که حساس‌ترین پارامتر هیدرولیکی، مقدار ضریب رطوبتی خاک در حالت اشباع می‌باشد که بیش از دیگر ضرایب حساس است و با تغییر جزئی مقادیر این ضریب تغییرات به‌سزایی در خروجی‌های مدل HYDRUS مشاهده شد. همچنین ضریب همبستگی در مقادیر رطوبتی از ۸۸ تا ۹۸ درصد متغیر بود (۷).

هدف از این تحقیق واسنجی و اعتبارسنجی مدل HYDRUS-1D با استفاده از داده‌های رطوبت و غلظت نترات خاک تحت شرایط کودآبیاری جویچه‌ای نیشکر بود. در این پژوهش عرض زیاد جویچه‌ها موجب گردیده است که حرکت افقی آب کمتر شده و حرکت آب به‌طور عمده به‌صورت عمودی صورت می‌گیرد. با فرض حرکت یک‌بعدی آب در خاک و از طرفی با توجه به قابلیت بالا در شبیه‌سازی و گستره استفاده از مدل HYDRUS-1D در مطالعات آب و خاک توسط بسیاری از محققین، در این مطالعه از این مدل استفاده گردید. اعتبارسنجی مدل HYDRUS-1D به‌منظور برآورد میزان آبشویی، غلظت املاح در سطح خاک، شدت جریان املاح خروجی و غلظت تجمعی املاح خروجی از محدوده مؤثر ریشه، میزان نفوذ تجمعی از کف نمونه خاک و تعیین میزان نترات باقی‌مانده در خاک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با ۳ تکرار در یک قطعه ۲۵ هکتاری از مزارع کشت جدید در اراضی کشت و صنعت نیشکر دهخدا از اسفندماه سال ۱۳۹۱ تا مهرماه ۱۳۹۲ اجرا شد. کشت و صنعت دهخدا یکی از هفت واحد شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی می‌باشد که با طول جغرافیایی ۳۹° ۴۸' شرقی و ۴۲° ۳۱' عرض شمالی در ۲۰ کیلومتری شمال شهر اهواز واقع است. متوسط ارتفاع این واحد کشت و صنعت از سطح دریا

استفاده از مدل HYDRUS و طراحی دقیق یک سیستم کودآبیاری براساس برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل فوق می‌توان از تلفات نفوذ آب جلوگیری نمود. به‌طوری‌که در تحقیق انجام شده با تجمع آب در لایه بالای خاک و عمق توسعه ریشه، مقدار آب زهکش شده، ۱/۵ درصد از کل آب توزیع شده در مزرعه برآورد شد (۱). دو محقق دیگر نیز پیاز رطوبتی و نحوه حرکت آب در عمق ۳۰-۲۰ سانتی متری نسبت به محل استقرار قطره‌چکان‌های تحت آبیاری زیرسطحی را بررسی نمودند و با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مزرعه‌ای، مشاهده نمودند که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (۱۵). همچنین دو پژوهش‌گر دیگر با استفاده از مدل HYDRUS به‌طور هم‌زمان، پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک را تحت آبیاری جویچه‌ای و به‌روش حل معکوس به‌دست آوردند (۶).

پژوهش‌گران در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که آبشویی آترازین و دیگر مواد شیمیایی در روش آبیاری جویچه‌ای سریع‌تر از روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای است (۲۲). در تحقیق صورت گرفته که در دو کشت با خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی انجام شد، مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده داده‌های رطوبتی با نمایه‌های آماری RMSE و EF مورد سنجش قرار گرفتند که مشاهده شد مدل HYDRUS قادر است مقادیر رطوبتی را برای کشت بی‌خاک‌ورزی به‌خوبی شبیه‌سازی نماید و در کشت با خاک‌ورزی نیز مشاهده گردید که با اعمال تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک نتایج شبیه‌سازی بهبود یافت. مقادیر RMSE مربوط به داده‌های رطوبتی در کشت بی‌خاک‌ورزی کمتر از $\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$ ۰/۰۶۱ بود و مقادیر EF در کشت بی‌خاک‌ورزی از ۶۱ تا $\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$ ۹۶ درصد متغیر بود (۳). در تحقیقی دیگر مقادیر نمایه‌های آماری RMSE و ME نشان از انطباق خوب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده داده‌های رطوبتی تحلیل شده توسط مدل HYDRUS داشت. به‌طوری‌که مقادیر RMSE از ۰/۰۱ تا

۱۸/۱ متر می‌باشد. هر تیمار شامل یک هکتار بود که از ۲۲ جویچه با فاصله ۱/۸۳ متر و طول ۲۵۰ متر تشکیل شده است. فاکتور اصلی تقسیط‌های کودی بود که در سه سطح دو، سه و چهار تقسیطی اعمال شد و فاکتور فرعی میزان کود مصرفی بود که در سه سطح ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۶۰٪ کود مورد نیاز به ترتیب معادل ۳۵۰، ۲۸۰ و ۲۱۰ کیلوگرم کود اوره اعمال گردید. تیمار دو تقسیطی در مراحل پنجه‌زنی و ساقه رفتن اعمال شد. به طوری که تقسیط اول در ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۲ به مقدار ۶۰٪ کود مورد نیاز اعمال و تقسیط دوم در ۸ تیرماه ۱۳۹۲ به مقدار ۴۰٪ کود مورد نیاز اعمال گردید. تیمار سه تقسیطی در مراحل پنجه‌زنی، ساقه رفتن و قبل از مرحله رسیدگی اعمال شد که تاریخ اعمال تقسیط اول در ۲۷ فروردین ماه ۱۳۹۲ به مقدار ۳۰٪ کود مورد نیاز، تقسیط دوم در ۵ خرداد ماه ۱۳۹۲ به مقدار ۴۰٪ کود مورد نیاز و تقسیط سوم در ۷ تیرماه ۱۳۹۲ به مقدار ۳۰٪ کود مورد نیاز بود. اولین تاریخ اعمال تیمار چهار تقسیطی ابتدا بلافاصله بعد از هلینگ آب (تعویض محل جوی و پشته)، سپس به ترتیب مراحل پنجه‌زنی، ساقه رفتن و قبل از مرحله رسیدگی را شامل می‌گردد که تقسیط اول در ۲۲ اسفندماه ۱۳۹۱ به مقدار ۲۰٪ کود مورد نیاز، تقسیط دوم در ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ به مقدار ۳۰٪ کود مورد نیاز، تقسیط سوم در ۲۱ خرداد ماه ۱۳۹۲ به مقدار ۳۰٪ کود مورد نیاز و تقسیط چهارم در ۱۶ تیرماه ۱۳۹۲ به مقدار ۲۰٪ کود مورد نیاز اعمال گردید. در هر نوبت آبیاری دبی ورودی و زمان‌های پیشروی و پسروی آب در فواصل ۴۰ متری در طول جویچه و نیز در انتهای جویچه (۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰، ۲۰۰، ۲۴۰ و ۲۵۰ متری) اندازه‌گیری شد. دبی ورودی توسط فلوم‌های WSC تپ ۳ اندازه‌گیری شد. قبل از هر نوبت آبیاری، نمونه‌های خاک از چهار عمق خاک ۳۳-۰، ۶۶-۳۳، ۱۰۰-۶۶ و ۱۵۰-۱۰۰ سانتی‌متری در فواصل ۴۰ و ۲۰۰ متری از ابتدای جویچه‌های شاخص (جویچه‌های اندازه‌گیری) برداشت شده و از طریق محاسبه رطوبت وزنی و سپس رطوبت حجمی، کمبود رطوبت خاک استحصال گردید. عمق خالص آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک تعیین شد.

عمق ناخالص با فرض یک مقدار مناسب برای راندمان کاربرد (راندمان کاربرد بالاتر از ۶۰ درصد)، لحاظ گردید. به عنوان مثال، متوسط رطوبت حجمی در آبیاری اول در تیمار ۴ تقسیطی و ۶۰ درصد سطح کودی در چهار عمق اندازه‌گیری خاک، ۳۵ درصد بود، مقدار عمق خالص آبیاری محاسباتی، ۳۶ میلی‌متر و عمق ناخالص آبیاری براساس راندمان کاربرد محاسبه شده که برابر ۶۵/۵ درصد برآورد گردید، برابر ۵۵ میلی‌متر به دست آمد. از آمار ایستگاه هواشناسی کشت و صنعت دهخدا به منظور محاسبه تبخیر تعرق به روش پنمن مانیتث فائو استفاده شد و از تبخیر تعرق محاسبه شده به منظور اعمال دور آبیاری بهینه به منظور مدیریت بهینه آبیاری استفاده گردید. از نمونه‌های خاک در اعماق مختلف که قبل از هر نوبت آبیاری و به‌خصوص قبل از هر نوبت کودآبیاری برداشت گردیدند، علاوه بر اندازه‌گیری رطوبت وزنی برای اندازه‌گیری نیترات خاک در آزمایشگاه استفاده شد. لذا از میزان نیترات استخراجی از این نمونه در تاریخ اولین آبیاری به عنوان شرایط اولیه استفاده گردید. برای شرایط مرزی بالادست از گزینه (شار غلظت بالادست (Concentration Flux BC) و برای مرز پایین دست از گزینه گرادیان صفر (Zero Gradient) استفاده شد.

کود اوره مورد نیاز در بشکه‌های ۲۲۰ لیتری حل و در زمان‌های مورد نظر به آب آبیاری تزریق شد. برای تزریق ۶۰٪ کود به جویچه‌ها از بشکه‌های ۲۲۰ لیتری (درام) و برای تزریق ۲۰ و ۴۰ درصد مابقی از بشکه‌های کوچک (نیم‌درام) استفاده شد. به‌منظور ثابت بودن میزان دبی در بشکه‌های بزرگ و کوچک، سطح آب در آنها ثابت نگه داشته می‌شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مزرعه آزمایشی از جمله بافت خاک، pH، EC، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم محلول، مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌ها اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). براساس نتایج اولیه تجزیه نمونه خاک مزرعه نیشکر، درصدهای شن، سیلت، رس و چگالی ظاهری در محل اجرای آزمایش، نوع خاک، لوم رسی سیلتی تشخیص داده شد.

در این تحقیق، تبخیر و تعرق بر اساس روش تشتت تبخیر

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

EC (ds/m)	pH	(meq/l)		(meq/l)				۵۵p	SAR	نسبت (%)	نسبت (%)	نسبت (%)	نسبت (%)	عمق خاک (cm)
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CL ⁻	HCO ₃ ⁻							
۲/۳	۸/۱	۵/۵	۵/۳	۱۴/۶	۰/۱۵	۱۸/۱	۵/۳	۶/۳	۵۷/۲	۱۱	۵۱/۰	۳۸/۰	لوم رسی سیلتی	۰-۳۰
۲/۵	۸/۱	۶/۳	۶/۳	۱۷/۴	۰/۱۳	۱۶/۹	۴/۵	۶/۹	۵۸/۰	۱۰/۲	۵۰/۸	۳۹/۰	لوم رسی سیلتی	۳۰-۶۰

همه داده‌های اندازه‌گیری شده دارای دقت مشابه بوده و درجه اهمیت آنها در تابع هدف یکسان است (۵). برای ارزیابی کارایی واسنجی و اعتبارسنجی مدل از نمایه‌های آماری که توسط مدل HYDRUS-1D محاسبه می‌شود، استفاده شد. این نمایه‌های آماری شامل ضریب تبیین (R^2) (Coefficient of Determination) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (Root Mean Square Error)، خطای حداکثر (ME) (Maximum Error) و مجموع مربعات خطا (SSQ) (summation Square Error) می‌باشند که توسط مدل و در مقادیر رطوبتی به ثبت می‌رسند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i)^2} \dots [2]$$

$$ME = \text{MAX} |P_i - Q_i| [3]$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right]^{1/2} [4]$$

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2 [5]$$

که در روابط فوق، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، Q_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌های به‌کار رفته، \bar{P}_i مقدار متوسط پارامتر شبیه‌سازی شده و \bar{Q}_i مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

واسنجی مدل

واسنجی مدل توسط داده‌های رطوبت و غلظت نترات به‌منظور تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و سپس تعیین پارامترهای

کلاس A برای ماه‌های مختلف استفاده گردید. آمار مربوط به تشت تبخیر از ایستگاه هواشناسی کشت و صنعت دهخدا به‌دست آمد.

مدل HYDRUS-1D

تخمین معکوس پارامترهای هیدرولیکی و املاح خاک از قابلیت‌های مهم مدل HYDRUS است. حل معکوس پارامترها براساس حل عددی معادله ریچاردز و معادله انتقال املاح با استفاده از روش بهینه‌سازی لونبرگ - مارکوارت صورت می‌گیرد. در این روش پارامترهای نامعلوم با حداقل کردن مقدار تابع هدف بهینه می‌شوند (۲۱).

$$(q, b) = \sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^n w_{ij} [q_j(z, t_i) - q_j(z, t_i, b)]^2 [1]$$

که در آن، $b(k_s, \theta_r, \theta_s, \dots)$ بردار عوامل مشخصه مجهول، $q_j(z, t_i)$ مقادیر اندازه‌گیری شده در عمق z و زمان m, t_i و n به ترتیب تعداد سری داده‌های اندازه‌گیری شده (رطوبت خاک، مکش ماتریک، غلظت املاح و ...) و تعداد قرائت‌ها (داده‌ها) برای هر سری داده و w_{ij} و v_j به ترتیب ضرایب وزنی برای هر قرائت و هر سری از داده‌های اندازه‌گیری شده هستند. در رابطه بالا، هدف یافتن مقدار منحصر به فرد به گونه‌ای است که تابع هدف کمینه شود. ضریب‌های وزنی براساس دانسته‌ها و مفاهیم فیزیکی مسئله تعیین می‌شوند. مقدار w_{ij} تا حدودی اختیاری است و به کیفیت و اهمیت داده‌های اندازه‌گیری شده بستگی دارد. در بیشتر پژوهش‌ها مقدار واحدی در نظر گرفته می‌شود. این بدان معنی است که

انتقال املاح انجام شد. پارامترهای هیدرولیکی شامل پارامتر ۱، هدایت هیدرولیکی اشباع (k_s)، پارامترهای شکل (α و n)، رطوبت باقی مانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s) می‌باشند. تعدادی از پارامترهای انتقال املاح که به‌عنوان خروجی‌های مدل می‌باشند عبارتند از شدت جریان املاح ورودی و خروجی، غلظت تجمعی املاح در سطح و کف نمونه خاک و غلظت نیترات در عمق‌های مختلف خاک. از بین تیمارهای کودآبیاری، تیمار ۴ تقسیطی و ۶۰٪ سطح کودی برای واسنجی مدل انتخاب گردید. پس از واسنجی مدل و استخراج نتایج قابل قبول، از این نتایج به‌منظور اعتبارسنجی مدل در دیگر تیمارها استفاده شد.

به‌منظور واسنجی مدل علاوه بر داده‌های مزرعه‌ای از بعضی پارامترهای پیش فرض مدل نیز استفاده شد. از جمله داده‌های مزرعه‌ای می‌توان به میزان رطوبت و غلظت نیترات در عمق‌های مختلف خاک اشاره نمود که از آنها به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی در مدل استفاده شد.

شرایط اولیه و مرزی تعریف شده برای مدل

شرایط اولیه توزیع آب در خاک عبارت بود از مقدار رطوبت موجود در خاک قبل از اعمال اولین آبیاری که برای لایه‌های مختلف (۳۳-۰، ۶۶-۳۳، ۱۰۰-۶۶ و ۱۵۰-۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک) مقدار آن اندازه‌گیری و به‌عنوان داده ورودی برای مدل تعریف شد. هم‌زمان با اندازه‌گیری مقدار رطوبت، مقدار نیترات موجود در لایه‌های موصوف قبلی نیز اندازه‌گیری و به‌عنوان شرایط اولیه مقدار نیترات به مدل وارد شد. برای شرایط مرزی بالادست از گزینه شرایط لایه سطحی اتمسفریک و برای شرایط مرزی پایین دست از گزینه زهکشی آزاد در مدل استفاده شد.

مدل HYDRUS این قابلیت را دارد که یا با تعریف نوع بافت خاک، مقادیر تخمینی اولیه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی را ارائه می‌دهد و یا با استفاده از مدل ROSETTA و از طریق وارد نمودن درصدهای سیلت، رس، شن و چگالی

ظاهری تخمین اولیه‌ای از پارامترهای هیدرولیکی در اختیار کاربر قرار دهد (۶ و ۷). ابتدا برای حدس اولیه براساس بافت خاک (مقدار رس، سیلت و شن) و جرم مخصوص ظاهری توسط مدل ROSETTA که خود در مدل HYDRUS تعبیه شده و براساس شبکه عصبی کار می‌کند مقادیر تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی تعیین شدند. معمولاً بیشترین و کمترین مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در جداولی مشخص در کتب مرجع گرد آمده است که از مقادیر این جداول، برای تعریف حد و مرز پایین و بالای هر پارامتر هیدرولیکی در مدل HYDRUS استفاده شد. با استفاده از آنالیز حساسیت و با سعی و خطا حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی مشخص گردیدند.

در طول فصل و قبل از هر نوبت آبیاری در محل شاخص‌های چوبی که به فواصل ۴۰ متری از ابتدای جویچه و با مضربی از ۴۰ متر تا انتهای جویچه قرار داشتند، به‌خصوص شاخص‌های ۴۰ و ۲۰۰ متری به‌عنوان ابتدا و انتهای جویچه در چهار عمق ۳۳-۰، ۶۶-۳۳، ۱۰۰-۶۶ و ۱۵۰-۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک نمونه خاک برداشت گردید. از نمونه‌های خاک برداشت شده، به‌منظور اندازه‌گیری مقادیر رطوبت وزنی و حجمی استفاده شد. همچنین از نمونه‌های خاک به‌منظور تعیین مقدار غلظت نیترات موجود در خاک استفاده گردید. برای انجام آنالیز حساسیت به‌منظور تخمین بهتر پارامترهای هیدرولیکی، ابتدا مدل برای داده‌های رطوبتی در طول بیش از ۴ ماه، مورد آزمایش قرارگرفت. بدین ترتیب که در ۱۱ الی ۱۴ نوبت آبیاری انجام شده از داده‌های رطوبتی تیمارهای مختلف استفاده شد. این داده‌های رطوبتی قبل از هر آبیاری از نمونه‌های خاک برداشت شده از اعماق مختلف به‌دست آمد. وقتی با تیک‌زدن تمام پارامترهای هیدرولیکی در پنجره مربوطه در مدل HYDRUS مقدار ضریب همبستگی به مقادیر قابل قبول رسید، این آزمون متوقف گردید. ضریب همبستگی قابل قبول، حاصل برازش مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل بود. مقادیر ضریب همبستگی بالای ۶۰٪ مورد پذیرش

جدول ۲. برخی مشخصات تیمارهای کودآبیاری برای واسنجی مدل HYDRUS

سطح تقسیط	سطح کودی	نوبت آبیاری	نوبت تقسیط کودآبیاری	متوسط غلظت نترات (mg/l)	زمان قطع آبیاری (min)	زمان شروع تزریق کود (min)	مدت تزریق (min)	فاصله از ابتدای جویچه (m)	حجم و زمان نزع کودهای اندازه‌گیری
چهار	۶۰٪ سطح کودی	آبیاری اول	اول	۰/۲۳۵	۱۸۰	۱۲۱	۵۹	۲۰۰	۱۲۴
تقسیمی		آبیاری یازدهم	چهارم	۰/۹۵۰	۴۷۳	۱۷۸	۲۹۵	۴۰	۱۲۴

اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. داده‌های ورودی به‌منظور اعتبارسنجی مدل در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین نمایه‌های آماری مختلف از جمله ضریب تبیین رطوبت و غلظت نترات، RMSE، ME و SSQ میزان دقت برآورد شده مدل را نشان می‌دهند.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل

در تیمار ۴ تقسیمی و ۶۰٪ سطح کودی در آبیاری یازدهم و کودآبیاری چهارم، متوسط غلظت نترات در جویچه شاخص برابر ۰/۹۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود و زمان قطع آبیاری ۴۷۳ دقیقه، زمان شروع تزریق ۱۷۸ دقیقه و مدت زمان تزریق ۲۹۵ دقیقه بود. پارامترهای هیدرولیکی L ، k_s ، n ، α ، θ_r و θ_s حاصل از حل معکوس برای این تیمار به ترتیب برابر با ۴/۵۹، ۲/۵۵ (cm/day)، ۱/۳۳، ۰/۳۰۰ (cm/day)، ۰/۴۸ و ۰/۱۱ بودند (جدول ۴).

نتیجه آنالیز حساسیت نشان داد که حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی در تیمار ۴ تقسیمی و ۶۰٪ سطح کودی به ترتیب عبارت از θ_s ، L ، n ، α ، k_s و θ_r بودند. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی حاصل از حل معکوس مدل برای تیمار فوق در جدول (۴) نشان داده شده است. بعد از تخمین پارامترهای هیدرولیکی، با استفاده از داده‌های جدول (۲) که شامل متوسط غلظت نترات در جویچه شاخص، زمان قطع و شروع آبیاری و زمان شروع تزریق و مدت زمان تزریق کود بود، پارامترهای

بعد از تخمین پارامترهای هیدرولیکی از آنها برای تخمین پارامترهای انتقال املاح استفاده شد. به این ترتیب که داده‌های غلظت نترات که در اولین آبیاری و درست قبل از آن آبیاری در لایه‌های مختلف به دست آمده بود، به عنوان شرایط اولیه در مدل وارد شد. سپس از بقیه داده‌های غلظت نترات که در طول فصل آبیاری و قبل از هر آبیاری به دست آمده بود نیز در مدل و در قسمت مربوطه استفاده گردید. حاصل برازش داده‌های غلظت نترات اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توسط مدل با شاخص ضریب همبستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. همزمان با استفاده از شاخص ضریب همبستگی از نمایه‌های (RMSE)، (ME) و (SSQ) که توسط مدل و در مقادیر رطوبتی به ثبت رسیده بود، از یک طرف برای مقایسه میزان خطای به وجود آمده بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و از طرف دیگر برای شناخت توانایی شبیه‌سازی مدل مورد استفاده قرار گرفت. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد خطای مدل کمتر است. داده‌های ورودی به مدل برای انجام مراحل واسنجی در جدول ۲ نشان داده شده است.

اعتبارسنجی مدل

بعد از تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در تیمار ۴ تقسیمی و ۶۰٪ سطح کودی از این پارامترها برای اعتبارسنجی مدل در دیگر تیمارها استفاده شد. بدین ترتیب که با استفاده از داده‌های رطوبتی در هر تیمار که شامل عمق‌های خالص آبیاری و مدت زمان آبیاری بود، به همراه شرایط رطوبتی اولیه و مرزی تعریف شده برای هر تیمار، به‌منظور

جدول ۳. برخی مشخصات تیمارهای آزمایشی برای اعتبارسنجی مدل HYDRUS

سطح تقسیط	سطح کودی	نوبت آبیاری	نوبت تقسیط کود آبیاری	م متوسط غلظت نیترات (mg/l)	زمان قطع آبیاری (min)	زمان شروع تزریق کود (min)	مدت تزریق (min)	فاصله از ابتدای جویچه (m)	مجموع روزهای اندازه گیری
چهار تقسیطی	۱۰۰٪ سطح کودی	آبیاری هشتم	سوم	۰/۳۲۸	۵۳۰	۲۸۵	۲۴۵	۴۰	۱۲۴
سه تقسیطی	۱۰۰٪ سطح کودی	آبیاری دهم	سوم	۰/۲۴۳	۴۵۲	۱۸۷	۲۶۵	۴۰	۱۳۸
دو تقسیطی	۸۰٪ سطح کودی	آبیاری دهم	دوم	۰/۲۶۳	۴۸۴	۱۹۹	۲۸۵	۲۰۰	۱۱۷
شاهد	۱۰۰٪ سطح کودی	آبیاری چهارم	اول	۰/۳۰۲	۴۵۵	۱	۴۴۸	۴۰	۱۴۵
				۰/۳۰۲	۴۵۲	۱	۴۴۸	۲۰۰	۱۴۵

جدول ۴. پارامترهای هیدرولیکی و برخی از برآوردهای مدل HYDRUS در مرحله واسنجی مدل

تقسیم	سطح کودی	فاصله از ابتدای جویچه (متر)	ضریب تبیین رطوبت (R ²)	ضریب تبیین غلظت نیترات (R ²)	RMSE (mc ³ /mc ³)	ME (mc ³ /mc ³)	SSQ (mc ³ /mc ³)	L	K _s (cm/day)	n	α (cm/l)	θ _s	θ _r
چهار تقسیطی	سطح کودی	۴۰	۰/۶۲۷	۰/۹۱۲	۰/۳۳۸	۰/۲۹۱	۳/۰۸	-۴/۵۹	۲/۵۵	۱/۳۳	۰/۰۰۳	۰/۴۸	۰/۱۱
		۲۰۰	۰/۶۴۶	۰/۷۸۳	۰/۱۸۰	۰/۱۴۲	۱/۰۱	-۴/۵۸	۱/۰۰	۱/۳	۰/۰۰۲	۰/۴۴	۰/۱۰

انتقال املاح تعیین گردید.

نوسان داشت و این در حالی است که تغییرات ضریب همبستگی مقادیر غلظت نیترات از ۷۸/۳ تا ۹۱/۲ درصد ثبت گردید. مقادیر RMSE، ME و SSQ در تیمار چهار تقسیطی و ۶۰٪ سطح کودی در فاصله ۴۰ ابتدای جویچه به ترتیب برابر ۰/۳۳۸ cm³/cm³، ۰/۲۹۱ cm³/cm³ و ۳/۰۸ (cm³/cm³)^۲ بود (جدول ۴).

برخی از نتایج خروجی واسنجی مدل برای تیمار ۴ تقسیطی و ۶۰٪ سطح کودی در ۲۰۰ متری ابتدای جویچه بدین شرح می باشد. ارتفاع رطوبت تجمعی ذخیره شده در طول مدت

مطالعه جدول (۴) نشان می دهد که در تیمار واسنجی شده مقدار L منفی بوده و مقدار آن در ابتدا و انتهای جویچه به ترتیب برابر -۴/۵۹ و -۴/۵۸ بود. دامنه تغییرات θ_s از ۰/۴۴ تا ۰/۴۸، این دامنه تغییرات در n از ۱/۳ تا ۱/۳۳، در α از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ (۱/cm)، در k_s از ۱/۰۰ تا ۲/۵۵ (cm/day) و در θ_r از ۰/۱۰ تا ۰/۱۱ بود. همچنین مطالعه جدول (۴) نشان می دهد ضریب همبستگی مقادیر رطوبتی در تیمار واسنجی شده از ۶۲/۷ تا ۶۴/۶ درصد

جدول ۵. پارامترهای هیدرولیکی و برخی از برآوردهای مدل HYDRUS در مرحله اعتبارسنجی مدل

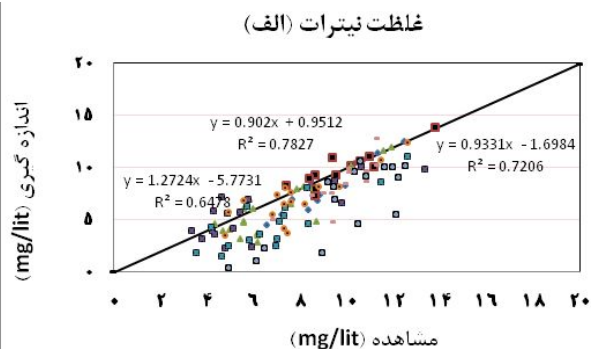
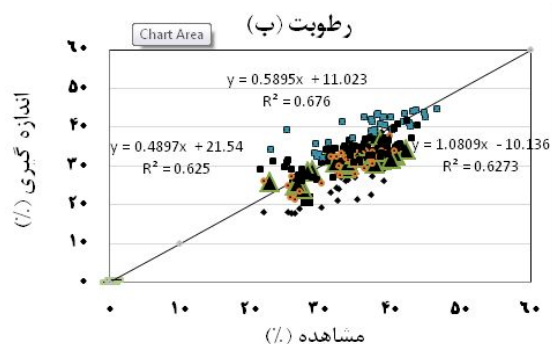
پارامترهای هیدرولیکی													
تقسیم	سطح کودی	فاصله از ابتدای جویچه (متر)	ضریب تبیین رطوبت (R ^۲)	ضریب تبیین غلظت (R ^۲)	RMSE (mc ^۳ /mc ^۳)	ME (mc ^۳ /mc ^۳)	SSQ (mc ^۳ /mc ^۳) ^۲	L	K _s (cm/day)	n	α (1/cm)	θ _s (%)	θ _r (%)
چهار تقسیمی	سطح کودی	۴۰	۶۷/۶	۷۵/۳	۰/۱۵۱	۰/۱۰۷	۰/۷۰	-۲/۹۷	۴/۷۰	۱/۳۶	۰/۰۰۵	۴۲	۱۰
سه تقسیمی	سطح کودی	۴۰	۶۰/۰	۶۱/۹	۰/۱۱۱	۰/۰۲۲	۰/۴۸	-۲/۱۶	۱/۰۰	۱/۳۰	۰/۰۰۳	۴۶	۱۱
دو تقسیمی	سطح کودی	۲۰۰	۶۲/۵	۷۲/۱	۰/۱۲۸	۰/۰۶۸	۰/۵۷	-۱/۴۳	۲/۶۹	۱/۴۰	۰/۰۰۵	۴۷	۱۰
شاهد	سطح کودی	۲۰۰	۶۷/۷	۶۷/۳	۰/۱۶۸	۰/۱۳۱	۰/۸۷	-۲/۷۳	۲/۱۰	۱/۴۰	۰/۰۰۱۵	۴۰	۱۰
شاهد	سطح کودی	۴۰	۶۰/۸	۶۴/۸	۰/۱۴۶	۰/۰۹۱	۰/۶۶	-۷/۸۰	۲/۰۰	۱/۵۰	۰/۰۰۵	۴۳	۱۰
شاهد	سطح کودی	۲۰۰	۶۷/۳	۶۴/۵	۰/۱۶۰	۰/۱۲۴	۰/۸۹	-۱/۹	۵/۶۹	۱/۳۲	۰/۰۰۱۶	۴۸	۱۰

نتایج اعتبارسنجی مدل

مطالعه جدول (۵) نشان می‌دهد که در تمام تیمارهای صحت‌سنجی شده مقدار L منفی بوده به طوری که کمترین مقدار آن در ۴۰ متری جویچه به میزان ۷/۸۰- و بیشترین آن در فاصله ۲۰۰ متری تیمار سه تقسیمی و ۱۰۰٪ سطح کودی به میزان ۱/۴۳- به ثبت رسید. دامنه تغییرات θ_s از ۰/۴۰ تا ۰/۴۸، این دامنه تغییرات در n از ۱/۳ تا ۱/۵۰، در α از ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۵ (1/cm)، در k_s از ۱/۰۰ تا ۵/۶۹ (cm/day) و در θ_r از ۰/۱۰ تا ۰/۱۱ بود.

میزان انطباق مقادیر رطوبتی و غلظت املاح مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل، در شکل ۱ و جدول ۵ نشان داده شده است. این جدول، ضریب همبستگی مقادیر رطوبتی و

شبیه‌سازی از ۴۴ تا ۵۴ سانتی‌متر متغیر بود. نفوذ تجمعی در طول این دوره به ۴۶ میلی‌متر رسید. این در حالی بود که میزان تبخیر-تعرق تجمعی ۵۰ میلی‌متر برآورد گردید. به عبارت دیگر حدود ۴ میلی‌متر کم آبیاری در نقطه ۲۰۰ متری از ابتدای جویچه اتفاق افتاده است. بیشترین تغییرات رطوبت در اعماق ۳۳-۶۶، ۳۳-۶۶، ۱۰۰-۶۶ و ۱۵۰-۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک، در لایه سطحی و کمترین آن در لایه عمقی بوده است. به طوری که تغییرات دامنه رطوبتی در لایه سطحی از ۲۱ تا ۴۵ درصد متغیر بود در حالی که این تغییرات در لایه عمقی از ۳۳ تا ۳۸ درصد متغیر می‌باشد. دلیل تغییر بیشتر در لایه سطحی ارتباط با هوای آزاد و تبخیر از سطح خاک می‌باشد که موجب تغییرات بیشتر در دامنه رطوبتی در بین نوبت‌های آبیاری شده است.



شکل ۱. الف) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مشاهده‌ای غلظت نیترات و ب) رطوبت خاک

لایه عمقی بوده است. به طوری که تغییرات دامنه رطوبتی در لایه سطحی از ۲۱ تا ۴۲ درصد متغیر بود در حالی که این تغییرات در لایه عمقی از ۳۳ تا ۳۸ درصد متغیر می‌باشد. دلیل تغییر بیشتر در لایه سطحی ارتباط با هوای آزاد و تبخیر از سطح خاک می‌باشد که موجب تغییرات بیشتر در دامنه رطوبتی در بین نوبت‌های آبیاری شده است (شکل ۱).

نفوذ تجمعی در طول این دوره به ۵۸ میلی‌متر رسید. این در حالی بود که میزان تبخیر-تعرق تجمعی ۶۰ میلی‌متر برآورد گردید. به عبارت دیگر حدود ۲ میلی‌متر کم آبیاری در نقطه ۲۰۰ متری از ابتدای جویچه در این تیمار اتفاق افتاده است.

همانند تحقیقات (۶) و (۱) از پارامترهای هیدرولیکی خاک به منظور استخراج پارامترهای انتقال املاح استفاده شد. سپس برآورد میزان نفوذ تجمعی خروجی از کف، مقادیر نفوذ، نفوذ تجمعی، مقادیر تبخیر و تعرق انجام شده و آن‌گاه مقایسه مقادیر نفوذ تجمعی با مقادیر تبخیر و تعرق به عنوان راه حلی مناسب به منظور جلوگیری از تلفات نفوذ آب برای اجرای مدیریت بهینه آبیاری و کودآبیاری انجام گرفت. مقادیر RMSE در تحقیقات انجام گرفته توسط (۱)، از ۰/۰۱۵ تا $0.17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ متغیر بود و همچنین مقادیر RMSE مربوط به داده‌های رطوبتی در پژوهش انجام گرفته توسط (۳) در کشت بی‌خاک‌ورزی کمتر از $0.61 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ بود که میزان این تغییرات با تغییرات این نمایه آماری در این پژوهش که کمتر از $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ بود، همخوانی قابل قبولی داشتند.

غلظت املاح را برای تمامی تیمارهای مورد بررسی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی مقادیر رطوبتی از ۶۰/۰ تا ۶۷/۷ درصد نوسان داشت و این در حالی است که تغییرات ضریب همبستگی مقادیر غلظت نیترات از ۶۱/۹ تا ۷۵/۳ درصد ثبت گردید. بیشترین مقادیر RMSE، ME و SSQ در تیمار شاهد در فاصله ۲۰۰ متری ابتدای جویچه به ثبت رسید که این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۱۶۰، $0.124 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و $0.89 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)^2$ بود و کمترین مقادیر این نمایه‌ها در تیمار سه تقسیمی و ۱۰۰٪ سطحی کودی در فاصله ۴۰ متری ابتدای جویچه به ثبت رسید. به طوری که این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۱۱۱، $0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و $0.48 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)^2$ بودند (جدول ۵).

شکل ۱ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و مشاهده‌ای غلظت نیترات و رطوبت خاک در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهند. برخی از نتایج خروجی اعتبارسنجی مدل برای تیمار ۲ تقسیمی و ۸۰٪ سطح کودی در ۲۰۰ متری ابتدای جویچه از بین بقیه تیمارها استخراج شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفت. ارتفاع رطوبت ذخیره شده از ۴۲ تا ۵۴ سانتی‌متر متغیر بود که بیشترین ارتفاع ذخیره شده بعد از آبیاری اول به میزان ۵۴ میلی‌متر اتفاق افتاد و کمترین آن در تاریخ ۱۳۹۲/۴/۲۳ و در روز ۱۱۷ داده‌برداری به میزان ۴۲ میلی‌متر اتفاق افتاد. البته گرم شدن هوا، افزایش تبخیر و تعرق و رشد توام گیاه در این کاهش ذخیره رطوبتی مؤثر بود. نمودار رطوبت در اعماق ۰-۳۳، ۳۳-۶۶، ۶۶-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک نشان داد که بیشترین تغییرات رطوبت در لایه سطحی و کمترین آن در

نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار ضریب تبیین بین مقادیر رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-1D و مقادیر مشاهده شده بین ۶۰/۰ تا ۶۷/۷ درصد نوسان داشت و این در حالی است که تغییرات ضریب همبستگی مقادیر غلظت نترات از ۶۱/۹ تا ۹۱/۲ درصد ثبت گردید. بیشترین مقادیر RMSE، ME و SSQ در تیمار چهار تقسیطی و ۶۰٪ سطح کودی در فاصله ۴۰ متری ابتدای جویچه به ثبت رسید که این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۳۳۸، $0/291 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و $3/08 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)^2$ بود و کمترین مقادیر این نمایه‌ها در تیمار سه تقسیطی و ۱۰۰٪ سطحی کودی در فاصله ۴۰ متری ابتدای جویچه به ثبت رسید. به طوری که این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۱۱۱، $0/022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و $0/48 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)^2$ بودند. ارتفاع رطوبت ذخیره شده در تیمار واسنجی شده از ۴۴ تا ۵۴ سانتی‌متر متغیر بود این در حالی است که این مقدار در تیمار صحت‌سنجی شده (۲ تقسیطی و ۸۰٪ سطح کودی) شده از ۴۲ تا ۵۴ سانتی‌متر متغیر بود و بیشترین ارتفاع ذخیره شده در تیمار واسنجی شده دقیقاً مصادف با بارندگی در اردیبهشت ماه بود. در تیمار منتخب اعتبارسنجی شده (۲ تقسیطی و ۸۰٪ سطح کودی) بیشترین ارتفاع ذخیره شده رطوبتی در آبیاری اول اتفاق افتاد. میزان تبخیر-تغرق تجمعی در تیمار اعتبارسنجی شده ۶۰ میلی‌متر برآورد گردید. بیشترین تغییرات رطوبت در لایه سطحی و کمترین آن در لایه عمقی بوده است. به طوری که تغییرات دامنه رطوبتی در لایه سطحی از ۲۱ تا ۴۲ درصد متغیر بود در حالی که این تغییرات در لایه عمقی از ۳۳ تا ۳۸ درصد متغیر می‌باشد. حاصل استفاده از نتایج خروجی مدل 1D-HYDRUS، برنامه‌ریزی به‌منظور مدیریت بهینه مصرف آب و کود و جلوگیری از آبهویی نترات و به‌دنبال آن کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی و افزایش ضریب سلامت جامعه خواهد بود. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده کارایی مدل برای سایر محصولات زراعی، خاک‌های مختلف و اقلیم‌های دیگر با استفاده از داده‌های صحرائی دراز مدت بررسی گردد.

مقادیر نمایه‌های آماری RMSE و ME در تحقیق انجام شده توسط (۲) به ترتیب از ۰/۰۱ تا $0/46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و از ۱/۹۹ تا $8/72 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ متغیر بودند که در مقایسه با مقادیر این پژوهش انطباق قابل قبولی داشت. همچنین مطابق تحقیقات (۴، ۱۳ و ۱۴)، ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری داده‌های رطوبتی نیز در این تحقیق به ثبت رسید که در تمام تحقیقات مشابه این پژوهش، مقدار ضریب همبستگی بیش از ۶۰٪ به دست آمد. همچنین همانند تحقیقات (۲۲)، از نمایه‌های آماری (R^2 , ME, RMSE) به‌منظور نشان دادن میزان انطباق و هم‌خوانی مقادیر مشاهده و اندازه‌گیری شده، استفاده گردید که مقادیر این ضرایب با ضرایب این پژوهش مقادیر قابل قبولی داشتند. به همین ترتیب مشابه تحقیقات (۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۶)، با استفاده از مدل HYDRUS، الگوی پخش آب در خاک اندازه‌گیری شد که در این پژوهش و همه تحقیقات فوق، این الگوی پخش آب میزان قابل قبولی داشت. در این تحقیق نیز مشابه پژوهش انجام شده توسط (۱۰)، مدل HYDRUS تخمین قابل قبولی از جبهه رطوبتی را نشان داد. در این پژوهش نیز مطابق تحقیق (۷)، رطوبت اشباع خاک، حساس‌ترین پارامتر هیدرولیکی در تحلیل آنالیز حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک بود و از طرف دیگر ضریب همبستگی داده‌های رطوبتی از ۸۸ تا ۹۸ درصد متغیر بود که با ضریب همبستگی داده‌های رطوبتی این پژوهش که از ۶۰/۰ تا ۶۷/۷ درصد نوسان داشت، هم‌خوانی قابل قبولی داشتند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به واسنجی و اعتبارسنجی مدل 1D-HYDRUS با استفاده از داده‌های میزان رطوبت و غلظت املاح خاک برداشت شده در بیش از ۴ ماه در طول دوره رشد نیشکر، پرداخته شد. با مدل‌سازی معکوس، پارامترهای هیدرولیکی خاک تخمین زده شد و با استفاده از آنها، پارامترهای انتقال املاح برآورد گردید.

منابع مورد استفاده

۱. اژدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۴): ۲۸-۱۴.
۲. بشارت، س.، ا. ح.، ناظمی، ع. ا. صدرالدینی و ص. شه‌مراد. ۱۳۹۰. استفاده از نرم‌افزار HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت و جذب آب در خاک و ارائه نرم‌افزار SWMRUM. نشریه دانش آب و خاک ۲۱(۴): ۱۳۷-۱۲۳.
۳. پوریزدان‌خواه، ه. و م. ر. خالدیان. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی جبهه رطوبتی خاک با مدل HYDRUS-2D در دو نوع کشت با خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی. پژوهش آب در کشاورزی ۲۷(۲): ۱۷۰-۱۵۹.
۴. ترابی، م و ح. صدرقاین. ۱۳۸۲. ارزیابی یک مدل نیمه‌تجربی برای تخمین فاصله قطره‌چکان‌ها. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی ۱۷(۴): ۵۵-۴۱.
۵. عباسی، ف. ۱۳۹۲. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ دوم. دانشگاه تهران: موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
۶. عباسی، ف. و ف. تاجیک. ۱۳۸۶. برآورد هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۱): ۱۲۲-۱۱۱.
۷. عصاره، ع. ز. درخشان‌نژاد، ا. سلطانی محمدی و م. گوشه. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رطوبت خاک با مدل HYDRUS-1D در شرایط کشت گندم. علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی) ۳۷(۱): ۱۲-۱.
8. Assouline. S. 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. J. Sci. 66.
10. Cook, F. J., P. Fitch, P. J. Thorburn, P. B. Charlesworth and K. L. Bristow. 2006. Modeling trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. PP. 1353-1359. In: Environ. Modeling & Software.
12. Gardenas, A., JW. Hopmans, BR. Hanson and J. Simunek. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. J. Awm. 74: 219-42.
13. Kandelous, M., M. A. Liaghat and F. Abbasi. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. J. As. 39(2): 371-378.
14. Kandelous, M. M. and J. Simunek. 2010a. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface J. Dis. 28: 435-444.
15. Kandelous, M. M. and J. Simunek. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. j. Awm. 97: 070-1076.
16. Lazarovitch, N., AW. Warrick, A. Furman and J. Simunek. 2007. Subsurface water distributions from drip irrigation described by moment analysis. J. Vz. 6:116-123.
17. Meshkat, M. RC. Warner and SR. Workman. 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. J. Ide. 125(6):315-323.
18. Patel, N. and T. B. S. Rajput. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. J. Awm. 95(12): 1335-1349.
19. Revol, P., B. E. Clothier, J. C. Mailhol, G. Vachaud and M. Vaucklin. 1997. Infiltration from a source point source and drip irrigation 2. An approximate time-dependent solution for wet-front position. J. Wrr. 33(8): 1869-1874.
21. Simunek, J., M. Sejna and M. Th. van. Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0." U. S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, Calif.
22. Siyal A. A. and TH. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. J. Awm. 96:893-904.
23. Skaggs, T. H. Trout, T. J. Simunek, J. and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. J. Ide. 4: 304-310.
24. Skaggs, TH., J. Trout, J. Simunek and K. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations J. Ide. 130:304-310.
26. Wang, FX., Y. Kang and SP. Liu. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in north China Plain. J. Awm. 79:248-264.

27. Zerihun, D., C. A. Sanchez, A. Furman and A. W. Warrick. 2005. Coupled surface-subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. II: Model evaluation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131(5): 407-419.