

بررسی نوسانات غلظت املاح اراضی شالیزاری در شرایط زهکشی زیرزمینی و اعمال سناریوهای مدیریتی کاربردی با استفاده از مدل Drainmod-S

معین معصومی، مسعود پورغلام آمیجی و مسعود پارسی نژاد^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۳)

چکیده

در این پژوهش از مدل Drainmod-S برای تغییرات غلظت نمک در خاک و اثر زهکشی زیرزمینی بر میزان آبشویی در یک مدل فیزیکی (لایسیمتر بزرگ) استفاده شد. برای اندازه‌گیری شوری محلول خاک، عصاره‌گیر خاک در اعماق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری خاک در فاصله ۳۵ سانتی‌متر از زهکش نصب شد. در این مطالعه، سه سناریو شامل بررسی پروفیل شوری تحت شرایط متعارف (زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل)، بررسی پروفیل شوری خاک تحت شرایط مختلف زهکشی و اعمال سناریوی قبل با آب آبیاری شورتر اعمال شد که سناریوی دوم و سوم در چهار مرحله زهکشی بین نشاء و میان‌فصل (روز ۱۵ تا ۲۰)، زهکشی میان‌فصل (روز ۳۵ تا ۴۰)، زهکشی بین میان‌فصل و پایان‌فصل (روز ۵۵ تا ۶۰) و زهکشی پایان‌فصل (روز ۷۵ تا ۸۰) انجام شد. نتایج نشان داد که پس از شبیه‌سازی غلظت کل املاح نسبت به زمان در عمق ۴۰ سانتی‌متری و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار پارامتر ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۷۷ به دست آمد که حاکی از شبیه‌سازی قابل قبول مدل Drainmod-S است. این پارامتر برای شبیه‌سازی غلظت املاح در عمق ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر خاک نیز به ترتیب برابر با ۰/۷۶ و ۰/۷۵ به دست آمد. مقدار پارامتر میانگین خطای مطلق (MAE) نیز بسیار ناچیز بود.

واژه‌های کلیدی: آب نامتعارف، اراضی شالیزاری، اصلاح اراضی، محیط‌زیست، نوسانات شوری خاک، Drainmod-S

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Parsinejad@ut.ac.ir

مقدمه

با توجه به سیر صعودی افزایش جمعیت و افزایش نیاز به غذا و نظر به اینکه برنج به عنوان اولین منبع غذایی بیش از یک سوم جمعیت دنیا محسوب می شود، لازم است تولید برنج تا سال ۲۰۵۰ میلادی حدود ۵۰ درصد افزایش یابد (۱۸ و ۲۱). یکی از راهکارهای سازگاری با کم آبی، کمبود منابع آب برای آبیاری و افزایش بهره‌وری مصرف آب کشاورزی، استفاده از سطوح ایستابی کم عمق آب زیرزمینی برای آبیاری گیاه به خصوص در مناطق با آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین است (۱۷). در سال‌های اخیر، برای بهره‌برداری بهتر از منابع آب و خاک در هزاران هکتار از اراضی شالیزاری، طرح‌های تجهیز و نوسازی انجام شد. با وجود هزینه‌های کلان در این بخش، همچنان کاستی‌ها و مشکلات پابرجاست و به دلیل عدم قابلیت زهکش‌های سطحی در تخلیه سریع آب و یا حتی نبود آن، اهدافی چون ارتقای بهبود بهره‌وری، افزایش محصول برنج، جلوگیری از ماندابی شدن و امکان کشت دوم فراهم نشده است. با توجه به لزوم استفاده از حداکثر پتانسیل اراضی شالیزاری و بهبود بهره‌وری، می‌توان با احداث سامانه‌های زهکشی زیرزمینی، شرایط مناسب برای کشت برنج و محصولات دیگر را در فصول مرطوب فراهم کرد (۶، ۱۶، ۱۷، ۱۸، و ۲۶).

بر اساس آخرین آمارنامه کشاورزی در سال ۱۳۹۹، سطح انواع واریته‌های شلتوک در کشور، بالغ بر ۸۹۲۲۱۳ هکتار برآورد شده که استان مازندران با دارا بودن سهم ۲۷۲۱۶۱ هکتار از سطح برداشت برنج، مقام نخست کشور را به خود اختصاص داده است و استان گیلان نیز با سطح ۲۲۰۰۱۲ هکتار از اراضی شالیکاری کشور، در جایگاه دوم قرار گرفته است (۲). این دو استان در مجموع ۵۵ درصد از سطح برداشت انواع شلتوک در کشور را دارا هستند (۱۷). بنابراین، توجه ویژه به این دو استان ضروری است.

هدف اصلی از احداث زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری، بهبود شرایط تهویه برای رشد گیاه، جلوگیری از غرقابی شدن و شستشوی املاح اضافی منطقه ریشه است. در

مجموع، همه‌ی این اثرات می‌توانند باعث بهبود وضعیت اقتصادی و فواید اجتماعی برای کشاورزان شوند (۵ و ۱۱). نقش زهکشی زیرزمینی در این مناطق از هدف اصلی آن یعنی کنترل آب‌گرفتگی و یا شوری به یک ابزار اساسی مدیریت یکپارچه آب تحت سناریوهای چندگانه استفاده از زمین تغییر یافته است که می‌تواند سطوح آب را بهتر کنترل کند (۲۰). بررسی اثر شرایط مختلف زهکشی زیرزمینی و کنترل‌شده بر بهبود خاک شالیزار و افزایش محصول موضوع مهمی است که در اراضی شالیزاری ایران تاکنون توجه زیادی به آن نشده است. زهکشی در اراضی شالیزاری در مراحل پنجه‌زنی (زهکشی میان‌فصل) و برداشت محصول (زهکشی پایان‌فصل) شرایط مناسبی را برای فعالیت ریشه در نتیجه تأثیر بر عملکرد کمی و کیفی برنج و امکان برداشت مکانیزه در زمان برداشت محصول و در نتیجه کاهش هزینه تولید و تمایل برای توسعه برنج‌کاری را فراهم می‌آورد (۱، ۱۸ و ۱۹).

از مدل‌هایی که در رابطه با حرکت آب و املاح در خاک و پیش‌بینی تغییرات آن کاربرد زیادی پیدا کرده است، می‌توان مدل‌های Hydrus، Saltmed و Swap را نام برد. ضمن اینکه مدل Drainmod برای طیف وسیعی از خاک‌ها، گیاهان و شرایط آب و هوایی مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفته است (۱۳). در مقایسه با مدل‌هایی که مبتنی بر معادله یک‌بعدی ریچاردز است، نتایج حاصله نشان داده است که مدل Drainmod را می‌توان با پیش‌بینی قابل‌اعتمادی برای شبیه‌سازی آب و املاح و نوسانات سطح ایستابی مورد استفاده قرار داد (۲۴). در شمال کشور زهکشی در اراضی شالیزاری به دلیل شرایط خاص آن و غرقابی بودن شالیزارها دارای شرایط ویژه‌ای است که ارزیابی معیارهای طراحی و عملکرد سامانه به علت ناشناخته بودن واکنش آن ضروری است، اما به دلیل پیچیدگی فرایند زهکشی در اراضی شالیزاری در کنار زمان‌بر بودن آزمایش‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز برای ارزیابی سامانه‌های زهکشی را اجتناب ناپذیر می‌کند. مدل Drainmod یکی از آنهاست (۶، ۱۴ و ۱۹).

عمق سطح ایستابی و دبی زهکش‌ها به‌صورت روزانه و عملکرد گیاه کلزا به‌عنوان کشت دوم، (طی چهار سال بعد از نصب سامانه‌های زهکشی) از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ پایش شد. نتایج نشان داد که به مرور زمان و با انجام زهکشی، شرایط برای حرکت آب در خاک بهتر شده و عملکرد سامانه‌های زهکشی عمیق بهبود یافت و در سال چهارم، سامانه‌های زهکشی عمیق کم‌عمق داشتند. همچنین، عملکرد محصول کلزا به‌عنوان کشت دوم همراه با بهبود شرایط تهویه خاک و عملکرد سامانه‌های زهکشی از سال اول تا سال چهارم به میزان ۲۱۹۱ کیلوگرم در هکتار (۳۱۸ درصد) افزایش یافت که نشان از رابطه مستقیم بین بهبود عملکرد سیستم و افزایش میزان دانه محصول دارد. همچنین، فنگ و همکاران (۸) مدل Drainmod-S را برای منطقه لائو‌بای (Laizhou Bay) چین طی دو فصل کشت مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از شبیه‌سازی خوب مدل مذکور برای نوسانات سطح ایستابی و شوری خاک با ضریب تبیین (R^2) بالاتر از ۰/۷۵ و میانگین خطای نسبی (MSE) کمتر از ۱۰ درصد داشت. در پژوهشی، نظری و همکاران (۱۵) با استفاده از قابلیت‌های مدل Drainmod-S در شبیه‌سازی عملکرد سامانه زهکشی زیرزمینی، عملکرد نیشکر و بار نمک زهاب، اثر عمق زهکش (۱۰۰ سانتی‌متر تا ۲۱۰ سانتی‌متر به فواصل پنج سانتی‌متری) را بر کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه زهکشی در کشت و صنعت امیرکبیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج واسنجی مدل در عمق و فاصله زهکش ۲ و ۴۰ متر نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سطح ایستابی وجود دارد (میانگین انحراف مطلق و خطای استاندارد به ترتیب برابر ۲۲/۵ و ۲۹/۵ سانتی‌متر). طبق نتایج مدل Drainmod-S، با افزایش عمق نصب زهکش‌ها از ۱۰۰ به ۲۱۰ سانتی‌متر، تخلیه سالانه نمک از زهکش‌ها از ۶۷/۴ تن در هکتار به ۱۰۲/۵ تن در هکتار برآورد شد. اکبری و همکاران نیز (۳) به تخمین معکوس هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل Drainmod پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از نتایج

مدل Drainmod توسط اسکگز (۲۲) ارائه شده که توسط کندیل و همکاران (۱۲) برای شبیه‌سازی حرکت نمک در خاک و به‌وسیله بریو و همکاران (۴) برای شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن در خاک تکمیل شد که به ترتیب مدل‌های Drainmod-S و Drainmod-N به مدل اصلی اضافه شد. همچنین، به گفته بریو و همکاران، این یک مدل ریاضی شبیه‌سازی است که برای انواع خاک‌ها و محصولات در شرایط آب و هوایی متفاوت به‌صورت رضایت‌بخشی آزمایش شده است (۴). ابراهیمیان و لیاقت (۷) نیز مدل Drainmod را در اراضی ران شهرستان بهشهر مورد بررسی قرار دادند و عملکرد مدل Drainmod را قابل قبول ارزیابی کردند. در این تحقیق، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و مقدار CRM برای سطح ایستابی به ترتیب ۱۶/۷، ۰/۸۶ و ۰/۱ به دست آمده است. پورغلام آمیجی و همکاران (۱۹)، مدل Drainmod-S را برای شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی و غلظت نمک در نیمرخ خاک، در اراضی شالیزاری دارای سطح ایستابی کم‌عمق و شور مورد ارزیابی قرار دادند. پارامترهای NRMSE، RMSE، MBE، d و R^2 به منظور بررسی کارایی مدل برای تخمین تغییرات غلظت نمک در سه ناحیه از خاک به‌طور متوسط محاسبه شد. میانگین مقدار این پارامترها در عمق‌های مختلف خاک برای تیمار شاهد به ترتیب ۰/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۱ دسی‌زیمنس بر متر، ۴/۶۱ درصد، ۰/۹ و ۰/۸۷ به دست آمد. پارامترهای مذکور در تیمار آب زیرزمینی کم‌عمق با شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر نیز به ترتیب ۰/۰۷ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۲۴ دسی‌زیمنس بر متر، ۲/۷۸ درصد، ۰/۹۴ و ۰/۸۹ محاسبه شد. پورغلام آمیجی و همکاران (۱۷) در مطالعه دیگری چنین نتایج مشابهی را گزارش کردند. آقاجانی مازندرانی (۱) در مطالعه‌ای اثر سه نوع سیستم زهکشی زیرزمین با اعماق و فواصل مختلف و یک سیستم زهکشی زیرزمینی دو عمقی بر بهبود حرکت آب در خاک و تخلیه زهاب از اراضی شالیزاری، امکان کشت دوم و افزایش محصول در مزرعه آزمایشی شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری را بررسی کرد.

بودن دائم اراضی شالیزاری، یک جریان رو به پایین اتفاق خواهد افتاد که باعث جلوگیری از صعود آب زیرزمینی شور به سطح خاک شده و به نظر می‌رسد شوری را در یک حد مشخصی کنترل کند. از طرف دیگر در زراعت برنج لایه‌ای از خاک، در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر ایجاد محدودیت می‌کند. این لایه به دلیل شخم برای عملیات کشاورزی و گل‌خرابی در کشت برنج ایجاد می‌شود که به آن سخت‌لایه (Hardpan) می‌گویند و احتمال صعود آب زیرزمینی شور به اعماق بالاتر را کم می‌کند. بنابراین، اینکه مدل مذکور بتواند این موارد را در نظر بگیرد و شبیه‌سازی مناسبی در حالت زهکشی زیرزمینی داشته باشد، نیازمند مطالعه دقیق است. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی نوسانات غلظت املاح و کارایی آبشویی اراضی شالیزاری تحت شرایط زهکشی زیرزمینی و شبیه‌سازی عملکرد آن با مدل Drainmod-S با استفاده از تحلیل پروفیل‌های شوری نیم‌رخ خاک در سناریوهای مدیریتی کاربردی مختلف زهکشی و آبشویی خاک است.

مواد و روش‌ها

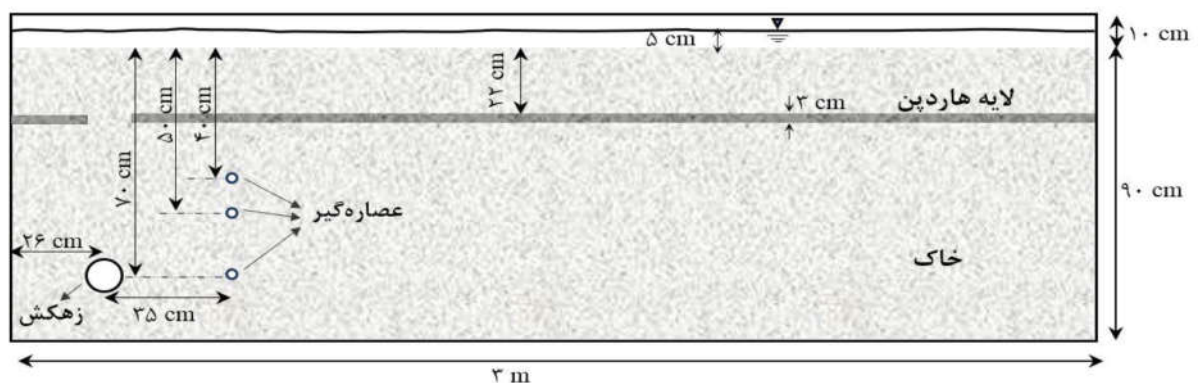
معرفی منطقه مورد مطالعه

به‌منظور ارزیابی و شبیه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی کنترل‌شده در اراضی شالیزاری، با توجه به پیچیدگی رفتار خاک‌های دارای رس زیاد و دشواری کنترل شرایط در مزرعه، آزمایشی در مقیاس مدل فیزیکی زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری توسط مؤمن‌نژاد و همکاران (۱۴) در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان انجام شد. مدل فیزیکی مخزنی مکعبی شکل به طول سه متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع یک متر بود. زهکش از جنس پلی‌اتیلن موج‌دار به قطر ۱۰ سانتی‌متر در عمق ۷۰ سانتی‌متر نصب شد. به‌منظور اندازه‌گیری شوری محلول خاک، عصاره گیر خاک در اعماق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری خاک در فاصله ۳۵ سانتی‌متر از مرکز زهکش نصب شد. شمای کلی مدل فیزیکی و محل قرارگیری زهکش و عصاره‌گیرها در شکل ۱ نشان داده شده است. لایه‌های خاک به ضخامت‌های

شبیه‌سازی عمق سطح ایستابی مدل در تخمین هدایت هیدرولیکی خطای قابل توجهی دارد. درحالی‌که شبیه‌سازی شدت تخلیه با دقت خوبی می‌تواند در تخمین آن مورد استفاده قرار گیرد. مقدار هدایت هیدرولیکی از روش زه‌آب خروجی (۲/۳ سانتی‌متر در ساعت) با مقدار تخمینی آن با استفاده از مقادیر شبیه‌سازی شده شدت تخلیه (۲/۵ سانتی‌متر در ساعت) اختلاف کمی داشت. بنابراین، در تخمین هدایت هیدرولیکی به روش حل معکوس با مدل Drainmod، مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شدت تخلیه زهکش‌ها می‌تواند ملاک خوبی برای تصمیم‌گیری باشد.

درزی نفت‌چالی و همکاران (۶) به ارزیابی مدل Drainmod برای پیش‌بینی عمق سطح ایستابی و دبی زهکش در اراضی شالیزاری مجهز به زهکش زیرزمینی پرداختند. بر اساس نتایج آنها، مدل Drainmod عملکرد یک سیستم زهکشی را برای یک دوره طولانی مدت شبیه‌سازی کرده و میزان عمق سطح ایستابی، زهکشی، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق، تلفات آب، نفوذ، تعداد روزهای مرطوب و خشک و غیره را پیش‌بینی می‌کند. پورغلام آمیجی و همکاران (۱۷) نیز اشاره کردند که مدل Drainmod قابلیت‌های بسیاری داشته و توانایی شبیه‌سازی وجود زهکش‌های زیرزمینی، بررسی پروفیل شوری خاک، اعمال زهکشی در فواصل مختلف دوره کشت، تعیین میزان آبشویی، تعیین بار و غلظت نمک در خاک، تعیین بیلان آب و املاح، شبیه‌سازی نیتروژن و شوری، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی سطح ایستابی، از مهم‌ترین کارایی‌های این مدل است.

از آنجا که مطالعات زیادی در خصوص مدل‌سازی زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری در گیلان انجام نشده و با توجه به روند افزایش شوری آب رودخانه سفیدرود به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب آبیاری در استان گیلان و لزوم استفاده از آب‌های نامتعارف در شرایط بحران کمبود آب، توانایی مدل Drainmod-S در شبیه‌سازی انتقال املاح در اراضی شالیزاری نیازمند بررسی‌های بیشتری است. از طرفی با توجه به غرقاب



شکل ۱. نمای روبروی مدل فیزیکی (لایسمتر)، موقعیت زهکش و محل قرارگیری عصاره‌گیرها

جدول ۱ آمده است. برای تعیین خصوصیات آب آبیاری، ابتدا نمونه‌ای از آب آبیاری برداشت و به آزمایشگاه کیفیت آب انتقال داده شد. در جدول ۲ خصوصیات شیمیایی آب آبیاری نشان داده شده است.

تشریح مدل

مدل Drainmod به منظور شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی و زهاب خروجی از زهکش‌ها در مناطقی که سطح ایستابی در عمق کم قرار گرفته است، به کار می‌رود. این مدل بر اساس محاسبه معادله بیلان آب عمل می‌کند (۲۲). بیلان آب در این مدل به دو بخش بیلان سطحی و زیرسطحی تقسیم می‌شود. مدل قادر است عملکرد سامانه‌های مختلف مدیریت آب مانند زهکشی آزاد، زهکشی کنترل‌شده، آبیاری زیرزمینی و ترکیبی از آنها را شبیه‌سازی کند. Drainmod-S از زیر مدل‌های Drainmod است که علاوه بر قابلیت‌های مدل اصلی، قابلیت شبیه‌سازی شوری خاک و زهاب را نیز دارا می‌باشد. اساس معادله Convection-Dispersion Equation (CDE)، به روش بیلان جرم است (۱۲). داده‌های ورودی مدل Drainmod-S شامل داده‌های اقلیمی، خصوصیات فیزیکی خاک، شرایط اولیه شوری خاک، پارامترهای سیستم زهکشی و اطلاعات گیاه است (۱۵، ۱۷، ۱۹). در این مطالعه از آخرین نسخه مدل Drainmod-S (Version 6.1) استفاده شد.

مشابه شکل با تراکم عرف اراضی شالیزاری در استان گیلان در نظر گرفته شد. همچنین کفه سخت با استفاده از ذرات خاک دارای قطر کوچک‌تر از دو میلی‌متر در عمق ۲۲ سانتی‌متری از سطح خاک به منظور ایجاد شرایط مشابه با اراضی شالیزاری ایجاد شد (۱۴).

منابع آب و خاک

برای شبیه‌سازی لایه‌بندی خاک، عمل گل‌خرابی بر روی لایه بالایی به عمقی در حدود ۲۰ سانتی‌متر از سطح خاک صورت گرفت. لایه بعدی سخت لایه به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر بوده و لایه زیرین به عمق ۴۰ سانتی‌متر که در زیر سخت‌لایه قرار داشت. لازم به ذکر است که خاک موجود در لایسمتر از اراضی شالیزاری شمال کشور تهیه شد. قبل از اینکه خاک دست‌خورده و انتقال داده شود، نمونه‌های خاک برای آزمایش گرفته و سپس به لایسمتر منتقل شد. برای اندازه‌گیری درصد رس، سیلت و شن و از روش هیدرومتری و برای طبقه‌بندی از روش USDA (United States Department of Agriculture) برای تعیین کلاس بافت خاک‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری ظرفیت مزرعه از دستگاه صفحات فشاری استفاده و برای تعیین چگالی ظاهری از روش استوانه فولادی یا حلقه استفاده شد. نوع خاک در لایه‌های مختلف عمدتاً سنگین بوده و این حالت برای کشت برنج در اراضی شالیزاری برای نگهداشت آب مناسب است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش در

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	رطوبت اشباع (%)	pH	سدیم (meq/l)	کلسیم (meq/l)	منیزیم (meq/l)	کلر (meq/l)	نترات (mg/l)	بی‌کربنات (mg/l)
لوم‌سیلتی	۱۷/۴۵	۶۳/۱۰	۱۹/۴۵	۴۷	۷/۵۸	۲/۵۴	۵	۷/۸۰	۲/۱۵	۱۰/۱۳	۱۸۰/۵۶

* جرم مخصوص ظاهری: ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

هدایت الکتریکی (dS/m)	pH	سدیم (meq/l)	کلسیم (meq/l)	منیزیم (meq/l)	کلر (meq/l)	نترات (mg/l)	بی‌کربنات (mg/l)
۰/۸۳	۸/۰۵	۱/۵۷	۱/۱۰	۴/۱۰	۱/۲۳	۱/۵۰	۱۹۳/۵۳

لایه غیرقابل نفوذ هستند. از پارامترهای موردنیاز برای مدیریت آبیاری می‌توان به عمق آبیاری، روز و ماه شروع آبیاری، دور آبیاری و عمق بارش احتمالی در طول دوره کشت اشاره کرد. ورودی‌های مربوط به گیاه شامل عمق ریشه، تاریخ کاشت و برداشت و اطلاعات مربوط به تنش‌های خشکی و ماندابی است (۶، ۱۰، ۱۷، ۱۹ و ۲۶).

اعمال تیمار

اطلاعات مربوط به هواشناسی از مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی استان گیلان تهیه شد. اطلاعات موردنیاز برای سامانه زهکشی شامل عمق نصب زهکش، فاصله زهکش‌ها، شعاع مؤثر زهکش‌ها، عمق لایه غیرقابل نفوذ و عمق اولیه سطح ایستابی به ترتیب ۷۰، ۵۰۰، ۰/۶، ۹۰ و ۵ سانتی‌متر بود. اطلاعات خاک شامل منحنی رطوبتی، ضرایب معادله نفوذ و رطوبت اشباع بود که منحنی رطوبتی از ترکیب رطوبت اشباع و رطوبت‌های به‌دست‌آمده در مکش‌های مختلف به وسیله دستگاه صفحه فشاری با استفاده از نسخه ۱/۱ نرم‌افزار RETC (RETention Curve) به‌دست‌آمد (جدول ۳). در بخش رطوبت اشباع، مدل مربوطه مقادیر کمتری را نسبت به مقدار واقعی نشان داده اما با توجه به اینکه در هر سه لایه کم‌برآورد یکسانی داشته بنابراین خطایی را در نتایج به‌وجود نخواهد آورد. ضرایب معادله نفوذ نیز با نقاط منحنی

در شبیه‌سازی و استفاده از مدل Drainmod داده‌های مختلفی استفاده می‌شود که مهم‌ترین آنها داده‌های هواشناسی، خاکشناسی، زهکشی، آبیاری و گیاهی هستند. داده‌های هواشناسی مورد استفاده در مدل شامل مقادیر باران ساعتی یا روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه (یا تبخیر-تعرق پتانسیل)، عرض جغرافیایی و نمایه حرارتی است. مقادیر بارندگی و دمای هوا برای کل دوره شبیه‌سازی موردنیاز است. از آنجایی که مدل، مقادیر باران ساعتی را مورد استفاده قرار می‌دهد، بنابراین داده‌های بارندگی روزانه موجود، با استفاده از برنامه ایجاد فایل داده‌های هواشناسی مدل باید به باران ساعتی تبدیل شود. در این مدل برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع از رابطه تورنت وایت (Thorntwaite) استفاده می‌شود. البته تبخیر-تعرق بالقوه را نیز می‌توان به‌طور مستقیم به مدل داد. پارامترهای موردنیاز این رابطه، دمای متوسط ماهانه (به‌صورت حداکثر و حداقل دمای روزانه)، عرض جغرافیایی برای محاسبه ضرایب اصلاحی معادله تورنت وایت و نمایه حرارتی هستند. از مهم‌ترین خصوصیات خاک مورد استفاده در مدل، منحنی مشخصه رطوبتی و ضرایب آبگذری لایه‌های مختلف خاک است. ورودی‌های موردنیاز برای پارامترهای سیستم زهکشی شامل عمق نصب زهکش، فاصله زهکش‌ها، حداکثر عمق ذخیره سطحی، ضریب زهکشی، شعاع مؤثر زهکشی و عمق

جدول ۳. پارامترهای محاسبه شده مربوط به خاک با استفاده از نرم افزار RETC

نام لایه خاک	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α (1/cm)	n	Ks (cm/day)
لایه رویین	۰/۰۹۴۴	۰/۴۶۹۶	۰/۰۰۳۵	۱/۶۲۲۹	۴۰/۳۲
سخت لایه	۰/۰۹۶۲	۰/۵۲۷۷	۰/۰۱۵۷	۱/۲۳۱	۲۵/۸۵
لایه زیرین	۰/۰۷۲۴	۰/۴۳۷۶	۰/۰۰۱۸	۱/۹۷۶۳	۱۸/۴۲

Ks, θ_r , α و n به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت در حد پژمردگی دائم، رطوبت اشباع و پارامترهای شکل هستند.

خاک به وسیله عصاره گیرها جمع آوری شد و مقادیر غلظت کل املاح محاسبه شد. شوری اولیه خاک در سه عمق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ نیز در شروع آزمایش با نمونه برداری از خاک اندازه گیری شد که مقادیر آنها به ترتیب برابر ۴۹۶، ۵۷۴ و ۵۳۷ میلی گرم بر لیتر بود. همچنین، متوسط شوری آب آبیاری نیز در طول آزمایش ۵۳۲ میلی گرم بر لیتر اندازه گیری شد.

در انجام این پژوهش، طبق مطالعه انجام شده توسط مؤمن نژاد و همکاران (۱۴) مقادیر داده های مشاهداتی غلظت کل املاح در سه عمق مختلف برای شرایط عادی زهکشی میان فصل و پایان فصل برداشت شد، نتایج این مطالعات برای واسنجی مدل Drainmod-S مورد استفاده قرار گرفت که سناریو اول، تعریف مدل برای همین شرایط و مقایسه نتایج با مقادیر واقعی است. پس از واسنجی مدل، از آن برای اعمال سناریوهای دوم و سوم استفاده شد. در واقع در این سناریوها، نتایج شبیه سازی مدل برای تخمین تغییرات غلظت املاح با چهار مرحله مختلف آبشویی و آب آبیاری شورتر مورد بررسی قرار گرفت.

اعمال سناریوها

سناریو اول: بررسی پروفیل شوری تحت شرایط متعارف (زهکشی میان فصل و پایان فصل)
 سناریو دوم: بررسی پروفیل شوری خاک تحت شرایط مختلف زهکشی

- زهکشی بین نشاء و میان فصل (روز ۱۵ تا ۲۰)
- زهکشی میان فصل (روز ۳۵ تا ۴۰).

رطوبتی، ضخامت لایه خاک، هدایت هیدرولیکی و حداکثر عمق توسعه ریشه محاسبه و به مدل داده شد. همچنین با داشتن درصد ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع خاک، هدایت هیدرولیکی خاک به مقدار ۰/۴۵ سانتی متر بر ساعت برآورد شد. همچنین، مخزن در محیط فضای باز و روی سطح خاک قرار گرفت و برای کاهش جذب نور خورشید با رنگ روشن رنگ آمیزی شد. بعد از پر کردن مخزن تا ارتفاع ۹۰ سانتی متر، خاک به مدت یک هفته در شرایط غرقاب نگه داری شد تا علاوه بر نشست، اشباع شده و مشابه شرایط اراضی شالیزاری برای کشت برنج آماده شود. کودهای ازته و فسفات ه مطابق دستورالعمل منطقه ای در دو مرحله، قبل از کشت و در مرحله پنجه زنی مطابق عرف اراضی شالیزاری در استان گیلان به خاک اضافه شد (کود ازته ۹۰ کیلوگرم در هکتار و کود فسفات ه ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار). در مرحله اول پیش از کاشت برنج، دو سوم کود ازته و کود فسفات ه در آب حل و به صورت یکنواخت روی سطح خاک پخش شد.

برنج از نوع هاشمی در تاریخ ۲۹ خرداد ۱۳۹۴ در لایسی متر کشت شد و پس از آن آبیاری به صورت غرقاب دائم اعمال شد؛ به طوری که ۵ سانتی متر آب ثابت بر روی سطح خاک باشد. زهکشی میان فصل و پایان فصل به ترتیب در تاریخ های اول مرداد و ۱۵ شهریور ۱۳۹۴ انجام شد. در زهکشی میان فصل پس از پنج روز، زهکش دوباره بسته شد و شرایط غرقاب ایجاد شد. به منظور تعیین شوری نیم رخ خاک، در زمان های ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۵، ۴۵، ۴۸، ۵۳، ۵۵، ۶۵، ۶۸ و ۷۶ روز پس از شروع کشت در مخزن، عصاره

- زهکشی بین میان‌فصل و پایان‌فصل (روز ۵۵ تا ۶۰).
 - زهکشی پایان‌فصل (روز ۷۵ تا ۸۰).
- سناریو سوم: اعمال سناریوی دوم با آب آبیاری شورتر.

واسنجی مدل

در مطالعه مؤمن‌نژاد و همکاران (۱۴) شبیه‌سازی فرآیند زهکشی در چهار مرحله انجام شد. چهار مرحله مورد بررسی شامل (۱) شروع آزمایش تا زمان پنجه‌زنی و انجام زهکشی میان‌فصل (۳۵ روز از زمان شروع کاشت در مخزن)، (۲) زهکشی میان‌فصل به مدت پنج روز، (۳) بستن مجدد زهکش تا زمان زهکشی پایان‌فصل و (۴) زهکشی پایان‌فصل به مدت چهار روز بودند. به‌منظور واسنجی مدل در مرحله اول و سوم به دلیل عدم زهکشی و بسته‌بودن خروجی زهکش و نداشتن مقادیر اندازه‌گیری حجم زه‌آب و سطح ایستابی ثابت تحت این شرایط، از مدل Drainmod-S و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت املاح در عصاره خاک استفاده شد. در مرحله دوم و چهارم با وقوع زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل به دلیل امکان اندازه‌گیری حجم زه‌آب و تفاوت نامحسوس کیفیت زه‌آب طی مدت تخلیه پروفیل خاک، از مدل Drainmod استفاده شد. به‌منظور واسنجی مدل در هر کدام از چهار مرحله شبیه‌سازی، در مرحله اول و سوم پارامترهای حساس انتقال املاح شامل ضریب انتشارپذیری، فاکتور اعوجاج، ضریب پخشیدگی مولکولی، حد ترسیب نمک و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بهینه‌سازی با تابع هدف حداقل‌سازی شاخص آماری nRMSE، با استفاده از مقادیر تخمینی شوری پروفیل خاک در مدل و داده‌های مشاهداتی با استفاده از ترکیب الگوریتم ژنتیک و مدل Drainmod تعیین شدند. اگرچه نتایج حساسیت‌سنجی تأثیر کم ضریب انتشارپذیری و حد ترسیب نمک را نشان داد اما با توجه به دشواری اندازه‌گیری این پارامترها در فرآیند بهینه‌سازی هر دو ضریب انتشارپذیری و حد ترسیب نمک نیز در نظر گرفته شدند. به همین ترتیب، در مراحل دوم و چهارم یعنی زمان زهکشی میان‌فصل و

پایان‌فصل، واسنجی مدل با تعیین پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بهینه‌سازی با تابع هدفی مشابه با مراحل اول و سوم با استفاده از مقادیر حجم زه‌آب تخمینی مدل و داده‌های مشاهداتی انجام شد.

مقادیر بهینه پارامترهای ضریب انتشارپذیری (Dispersivity)

، ضریب اعوجاج (Tortuosity Factor)، ضریب پخشیدگی مولکولی (Molecular Diffusion Coefficient) و حد ترسیب نمک (Salt Precipitation Limit) که از ترکیب در مرحله واسنجی الگوریتم ژنتیک و مدل Drainmod-S به‌دست‌آمده، در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه ضریب انتشارپذیری در مراحل اول و سوم نشان می‌دهد که با گذشت زمان و پس از اعمال زهکشی میان‌فصل این ضریب در خاک افزایش یافت. از آنجاکه در ابتدای مرحله سوم فرآیند اشباع مجدد خاک صورت گرفته است، می‌توان بیان کرد که افزایش سرعت حرکت آب به دلیل اختلاف پتانسیل آب در مرز بالادست سطح خاک و زهکش در ابتدای این مرحله بود. علاوه بر این، ایجاد درز و شکاف‌ها در اثر زهکشی میان‌فصل و در نتیجه آن بزرگ‌تر شدن خلل و فرج مؤثر در انتقال املاح، می‌تواند از دلایل افزایش ضریب انتشارپذیری در این مرحله نسبت به مرحله اول باشد. روند افزایش پارامتر ضریب اعوجاج که نشان‌دهنده اعوجاج، تغییر مسیر حرکت نمک و طولانی‌تر شدن مسیر جریان در خاک است، نتایج مربوط به افزایش ضریب انتشارپذیری را تأیید می‌کند. در مرحله سوم ضریب پخشیدگی نیز افزایش پیدا کرده است که این افزایش را می‌توان ناشی از اختلاف غلظتی دانست که در ابتدای مرحله سوم به دلیل شروع مجدد حرکت آب در خاک به وجود آمده است. پارامتر حد ترسیب نمک در محدوده ۳۱۹۷۹-۲۹۴۱۶ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد که مطابقت مناسبی با نتایج پژوهش‌های پیشین دارد (۲۳). تفاوت مقدار این پارامتر نشان از تفاوت خصوصیات شیمیایی خاک در مراحل مختلف زهکشی دارد که بر پتانسیل ترسیب املاح در پروفیل خاک تأثیر

جدول ۴. مقادیر بهینه پارامترهای انتقال املاح در الگوریتم ژنتیک در مراحل مختلف شبیه‌سازی زهکشی

شماره	ضریب انتشارپذیری (cm)	ضریب اعوجاج (-)	ضریب پخشیدگی مولکولی (cm ² /day)	حد ترسیب نمک (mg/l)	هدایت هیدرولیکی (cm/hr)
مرحله اول	۲۰/۸۱	۰/۹۴	۵/۲۱	۳۱۹۷۹	۰/۳۱
مرحله سوم	۳۶/۰۹	۰/۹۵	۶/۱۰	۲۹۴۱۶	۰/۴۴

میان فصل (۳۵ روز از زمان شروع کاشت در مخزن) و دوم (زهکشی میان فصل به مدت پنج روز) برابر با ۷۴/۲۸ و ۳۴/۳۴ میلی گرم بر لیتر محاسبه شد.

نتایج و بحث

سناریو اول

مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در نیمرخ خاک در سه عمق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی متر در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، در ۳۵ روز اول شبیه‌سازی، غلظت کل املاح نسبت به زمان کاهش و نسبت به عمق روند افزایشی داشت که علت این مسئله را می‌توان در کاهش فرایند پخشیدگی املاح و آبشویی املاح به سمت لایه‌های پایین خاک دانست. این روند در مقادیر مشاهداتی هم مشاهده می‌شود اما شدت بیشتر تغییر غلظت املاح نسبت به مقادیر شبیه‌سازی می‌تواند ناشی از عدم امکان در نظر گرفتن شکستگی کفه سخت بالای محل نصب زهکش زیرزمینی در مدل Drainmod-S باشد به گونه‌ای که در وضعیت مشاهداتی هدایت بیشتر آب و املاح از سمت شکستگی کفه سخت انجام شده و به دلیل نزدیکی نقاط عصاره‌گیرها به زهکش، غلظت کل املاح در آن نقاط بیشتر تحت تأثیر این شرایط قرار گرفته است. اما در مجموع روند مشابهی بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل Drainmod-S و اندازه‌گیری شده برقرار بوده و ضریب تبیین ۰/۷۷ نیز همین موضوع را نشان می‌دهد (شکل ۲).

مقایسه مقادیر شبیه‌سازی غلظت کل املاح در سه عمق مورد بررسی نشان می‌دهد که پس از گذشت چند روز، غلظت کل

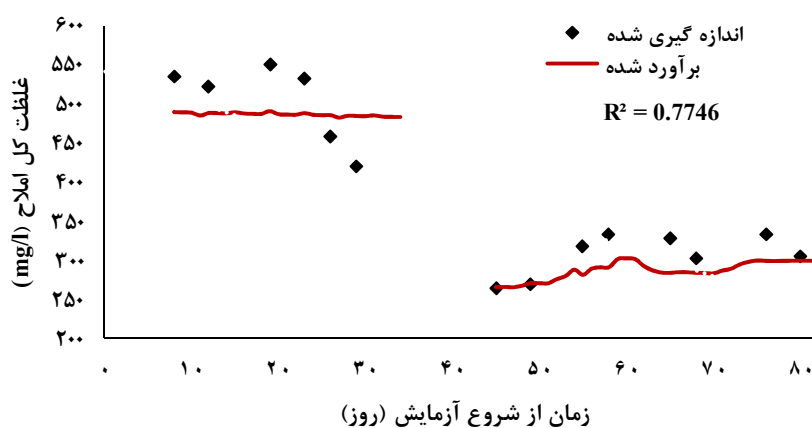
می‌گذارد. میانگین مقادیر pH قبل و بعد از زهکشی میان فصل به ترتیب ۶/۳۱ و ۶/۵۶ اندازه‌گیری شد که این افزایش در راستای ایجاد شرایط محیطی متفاوت و تمایل برای ترسیب املاح در خاک و در نتیجه کاهش حد ترسیب نمک در مرحله سوم نسبت به مرحله اول است. مقایسه میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک قبل و بعد از زهکشی میان فصل نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع در مرحله سوم به میزان ۴۲ درصد افزایش داشت. این افزایش را می‌توان از آثار زهکشی بر خلل و فرج خاک، نقش آن در بهبود ساختمان خاک و افزایش سهولت حرکت آب و انتقال املاح در اثر زهکشی دانست. همچنین، با استفاده از درصد ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع خاک، هدایت هیدرولیکی در نرم‌افزار Rosetta برابر ۰/۴۵ سانتی متر بر ساعت برآورد شد که تطابق خوبی با مقادیر بهینه‌سازی شده دارد.

ارزیابی مدل

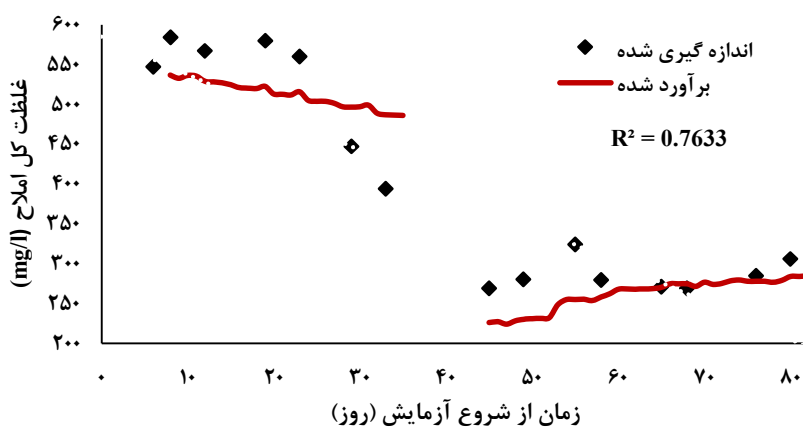
به منظور ارزیابی مدل در شبیه‌سازی املاح در خاک از شاخص آماری میانگین خطای مطلق (MAE (Mean Absolute Error استفاده شد که میانگین قدر مطلق خطا را نشان می‌دهد و رابطه آن به صورت زیر است (۸):

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{n} \quad (1)$$

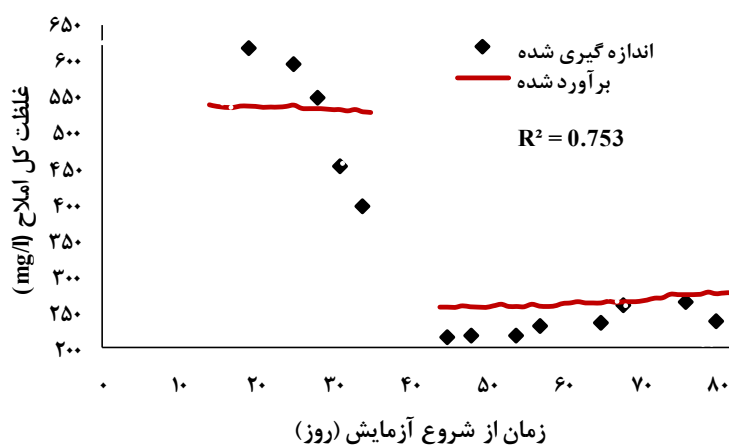
در رابطه فوق؛ O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است. این شاخص برای مشخص کردن قدرت پیش‌بینی مدل و تعیین مقادیر خطای برآوردشده، به کار برده می‌شود و در مطالعه حاضر در مرحله اول (شروع آزمایش تا زمان پنجه‌زنی و انجام زهکشی



شکل ۲. مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در نیمرخ خاک (عمق ۴۰ سانتی متر)



شکل ۳. مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در نیمرخ خاک (عمق ۵۰ سانتی متر)



شکل ۴. مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در نیمرخ خاک (عمق ۷۰ سانتی متر)

۰/۷۵ در عمق ۷۰ سانتی متری، تأییدکننده این ادعاست. دلیل آن را می توان در تأثیر گذشت زمان و تغییر خصوصیات بخش شکسته شده کفه سخت بالای زهکش و مشابه شدن آن با سایر قسمت های خاک این لایه دانست.

کوچکی معیار خطا (MAE) برای مدل که برابر با ۷۴/۲۸ میلی گرم بر لیتر یا ۰/۱۱ دسی زیمنس بر متر در مرحله اول و ۳۴/۳۴ میلی گرم بر لیتر یا ۰/۰۵ دسی زیمنس در مرحله دوم به دست آمد، نسبت به مطالعات پیشین وضعیت بهتری را نشان داده (این پارامتر در مطالعه پورغلام آمیجی و همکاران (۱۷) برابر با ۰/۰۴ دسی زیمنس بر متر و در مطالعه وهبا و همکاران (۲۵) برابر با ۰/۲۲ دسی زیمنس بر متر محاسبه شد) و نشانگر این نکته است که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل Drainmod-S، به مقادیر واقعی نزدیک بوده و همچنین قدرت بالای مدل در امر پیش بینی را نشان می دهد.

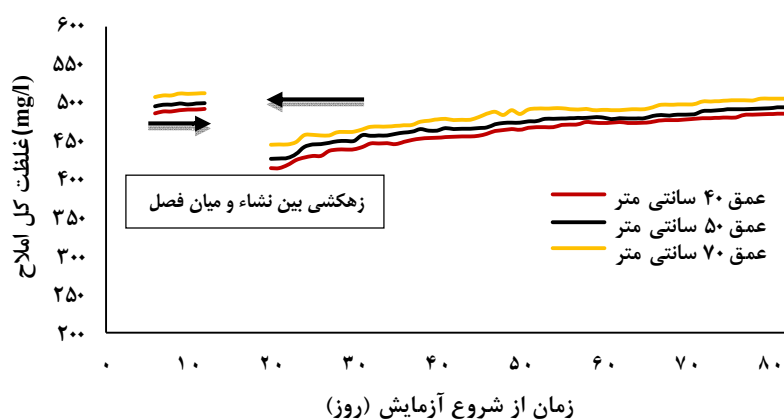
سناریو دوم

مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک در زهکش های مختلف در شکل ۵، ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. با مشاهده شکل های ۵ تا ۸ و افزایش دفعات آبیاری توسط هر بار زهکشی، درصد آبیاری خاک نسبت به زهکشی های قبل کاهش می یابد، زیرا املاح موجود در خاک شسته شده و به غلظت ثابتی می رسد. از طرفی در تمامی شکل ها در ابتدای دوره اختلاف بین غلظت املاح در عمق ها به صورت $70 < 50 < 40$ است، اما بعد از اعمال آبیاری ها و پایان دوره، غلظت املاح خاک به تعادل می رسد و در عمق های مربوطه تقریباً یکسان می شود.

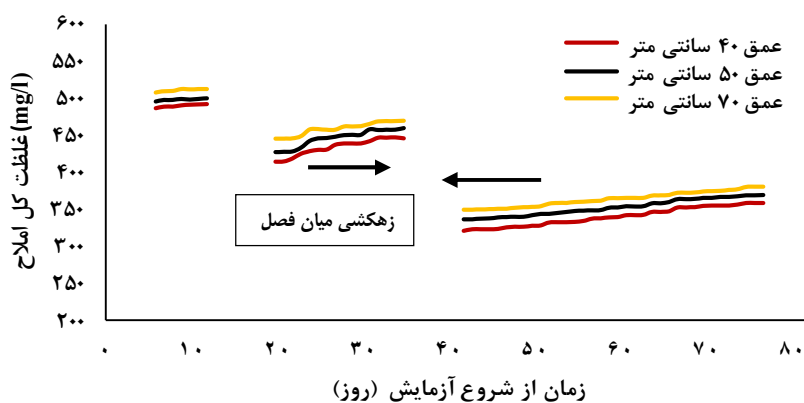
نکته قابل توجه اینکه پس از هر بار زهکشی و اعمال شستشوی املاح، غلظت املاح به صورت جزئی افزایش پیدا می کند و به مقدار اولیه خود نمی رسد. بیشترین میزان آبیاری در زهکشی اول اتفاق می افتد و در زهکشی های بعدی از میزان آبیاری کاسته می شود، ضمن اینکه زهکشی های متعاقب بیش از یک بار، باعث آبیاری بیشتر شده و تجمع املاح پس از

املاح در عمق ۷۰ سانتی متر با غلظت کل املاح در عمق ۵۰ سانتی متر برابر شد (شکل ۳ و ۴). صرف زمان بیشتر از سه روز برای حرکت املاح از عمق ۵۰ به ۷۰ سانتی متر (با توجه به هدایت هیدرولیکی اشباع ۰/۴۷ سانتی متر بر روز) نشان دهنده اهمیت نقش فرایند پخشیدگی مولکولی در انتقال املاح تحت شرایط غرقاب در مرحله قبل از زهکشی میان فصل است. علاوه بر این، محدودیت مدل در لحاظ کردن تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای خاک و جریان های ترجیحی بر انتقال املاح می تواند دلیل تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی مدل باشد. نتایج شبیه سازی و مشاهداتی در مرحله سوم پس از زهکشی میان فصل (بعد از روز ۴۰ ام آزمایش) نشان داد که در ابتدای امر غلظت کل املاح در هر سه عمق نسبت به قبل از بازکردن زهکش، کاهش داشت. نکته قابل توجه نزدیک شدن غلظت املاح در اعماق مختلف است که می توان دلیل آن را تأثیر زهکشی بر توزیع یکنواخت غلظت املاح در نیمرخ خاک دانست.

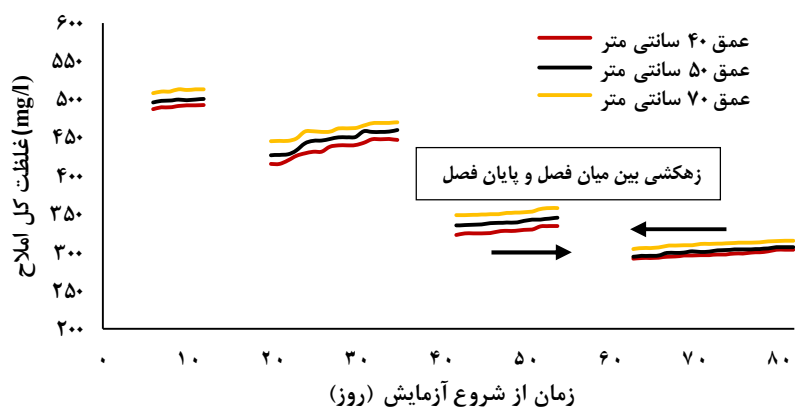
نتایج شبیه سازی نشان داد که بعد از زهکشی میان فصل، با گذشت زمان و پرشدن تدریجی خاک از آب و ورود املاح جدید به خاک، غلظت املاح مجدد در نیمرخ خاک افزایش یافت. در این مرحله نیز پس از گذشت زمان حدود ۲۵ روز پس از بستن زهکش ها (حدود دو هفته اشباع مجدد پروفیل خاک به طول انجامید)، غلظت املاح حاصل از شبیه سازی مدل در دو عمق ۵۰ و ۷۰ سانتی متر با هم برابر شدند (شکل ۳ و ۴). این مدت زمان در مقادیر مشاهداتی غلظت کل املاح در عمق های ۵۰ و ۷۰ سانتی متر، ۲۸ روز بود. طولانی تر بودن این مدت نسبت به مرحله اول می تواند ناشی از اثرگذاری عوامل ضریب اعوجاج و انتشارپذیری نسبت به ضریب پخشیدگی مولکولی در انتقال املاح به دلیل تغییر ابعاد خلل و فرج خاک و ایجاد درز و ترک بعد از زهکشی میان فصل باشد. افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به مرحله اول نیز نشان از تغییر در ابعاد خلل و فرج دارد. مدل Drainmod-S توانست در مرحله بعد از زهکشی میان فصل تطابق بهتری با مقادیر مشاهداتی غلظت کل املاح ایجاد کند که ضریب تبیین ۰/۷۶ در عمق ۵۰ سانتی متری و



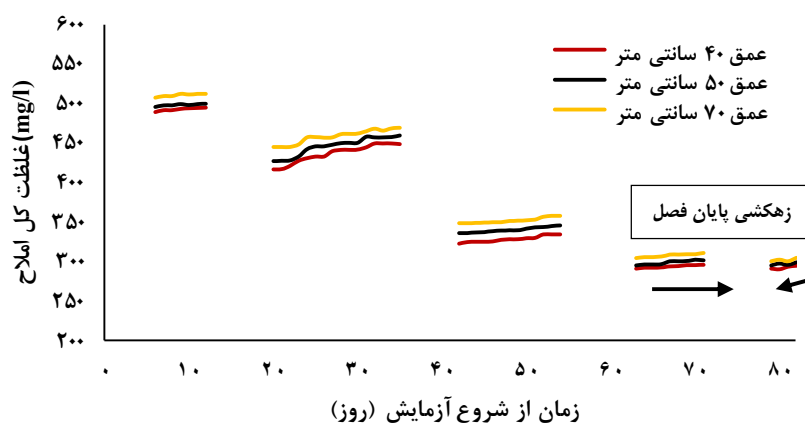
شکل ۵. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی بین نشاء و میان فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۶. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی میان فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی بین میان فصل و پایان فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



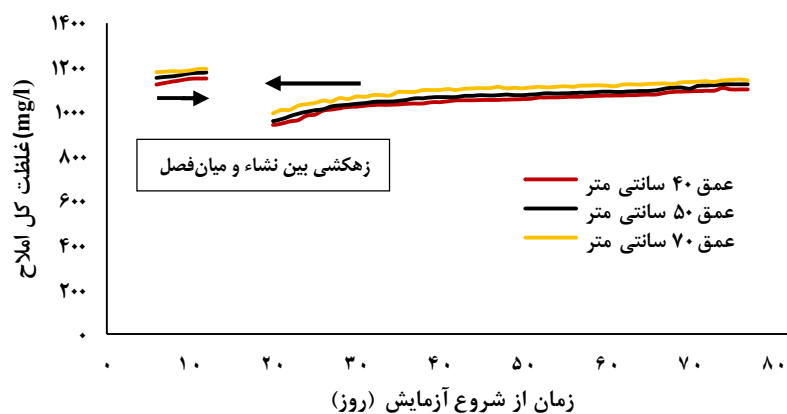
شکل ۸. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی پایان فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

اعمال تغییرات مدیریتی و کنترل املاح و آبشویی خاک، باید بر روی اعمال سناریوهای مختلف در هنگام دوره رشد گیاه که نیاز آبی و تحرک املاح در خاک قابل توجه است، متمرکز بود.

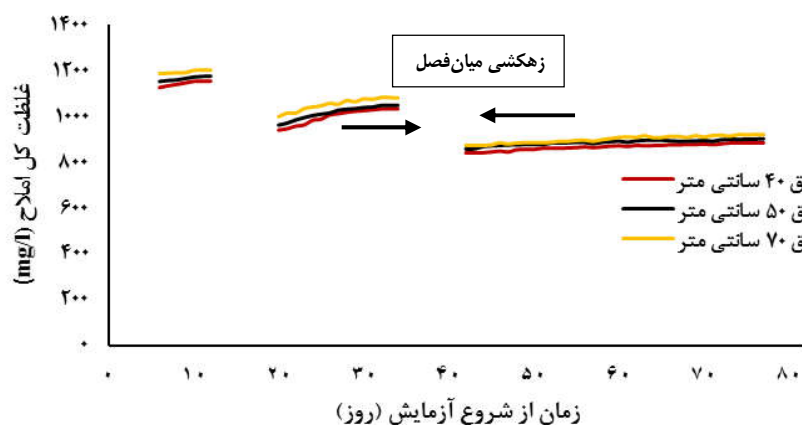
سناریو سوم

مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک در حالت‌های مختلف زهکشی با در نظر گرفتن آب شورتر در شکل‌های ۹ تا ۱۲ به نمایش در آمده است. با توجه به شکل‌های مذکور، مشخص شد که تمامی موارد گفته‌شده در سناریو دوم، در اینجا نیز صادق است. تنها تفاوت قابل توجه در این بخش این است که، میزان آبشویی املاح با مقادیر آبیاری مشابه نسبت به سناریو قبلی افزایش یافته است. در این باره باید گفت که با توجه به منابع مطالعاتی مختلف و بررسی‌های انجام‌شده، در اکثر مواقع درصد آبشویی بسته به زمان اعمال آن بین ۱۰ تا ۳۰ درصد غلظت نمک موجود در خاک بوده که در اینجا نیز کارایی مناسب آبشویی و کاهش غلظت املاح حتی در شرایط آب شورتر مشخص است. طبق تعریف، راندمان آبشویی برابر با نسبت تغییرات غلظت نمک به میزان زه‌آب که در هر بار زهکشی تخلیه شده، است. با مقایسه گرافیکی دو شکل ابتدایی از سناریو دوم و سوم

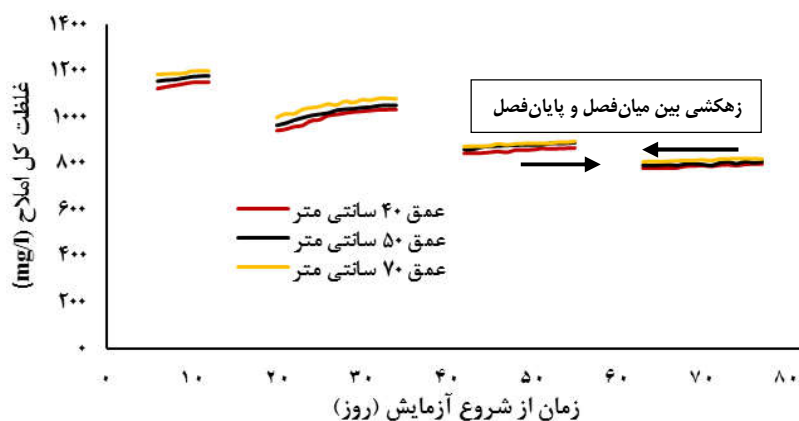
زهکشی دوم به سرعت بخش قبل نیست و در زهکشی‌های بعدی نمودار با شیب ملایم‌تری روند صعودی به خود می‌گیرد. در شکل ۷ که مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک و زهکشی بین میان‌فصل و پایان فصل را نشان می‌دهد، بعد از اعمال این زهکشی دیگر افزایش املاح قابل توجه نبوده و این به علت نزدیکی به پایان دوره رشد برنج می‌باشد. زیرا مقدار مصرف گیاه و بالطبع تبخیر و تعرق کاهش یافته و جریان رو به بالا و صعود موینگی کمتری رخ می‌دهد. به همین دلیل میزان املاح به حد ثابتی رسیده و سرعت افزایشی آن بسیار اندک است. در شکل ۸ که غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک و زهکشی پایان فصل را بازگو می‌کند، دو نکته حائز اهمیت است. ابتدا اینکه برای مدیریت زهکشی و اعمال سناریوهای کاربردی، نباید بر روی این مرحله حساب خاصی باز کرد. زیرا تغییرات میزان املاح در قبل و بعد از این مرحله از زهکشی، تفاوت چندانی ندارد. نکته بعدی این است که با به پایان رسیدن دوره رشد و هنگام برداشت برنج که بیش از ۸۰ روز به طول انجامید، فاصله بین غلظت املاح در عمق‌های مختلف بسیار کم شده و حتی با هم همپوشانی نیز دارد. این نشان می‌دهد که در پایان فصل، غلظت املاح در تمامی اعماق خاک به حد ثابتی رسیده و تفاوت چندانی ندارد. بنابراین، برای



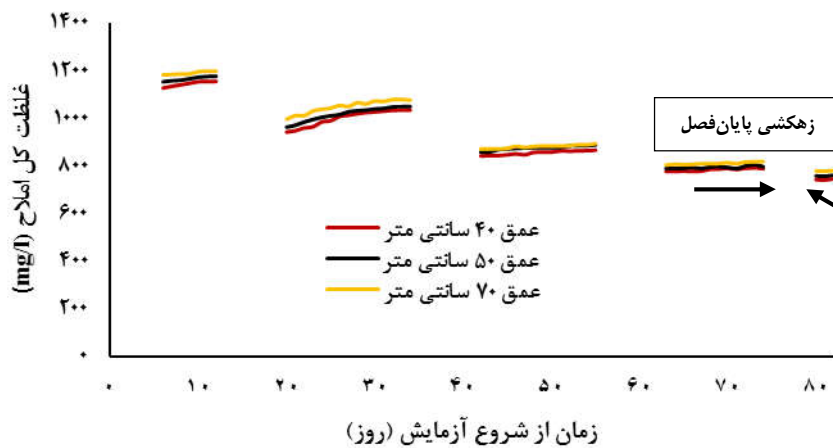
شکل ۹. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی بین نشاء و میان‌فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی میان‌فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۱. مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی بین میان‌فصل و پایان‌فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۲. مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده غلظت کل املاح نسبت به زمان در اعماق مختلف خاک (زهکشی پایان فصل) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

سناریوی دوم چنین حالتی نبود و در هر مرحله از زهکشی، کاهش غلظت املاح مشهود بود. بنابراین، این نکته را باید یادآور شد که آبخویی اول تأثیرگذارترین نقش را داشته و بعد از آن تغییرات غلظت املاح ناچیز است. بنابراین، در هنگام به‌کارگیری از آب شور در شرایط اراضی شالیزاری، باید بر زهکشی میان فصل متمرکز بود زیرا تغییرات غلظت املاح در قبل و بعد از این مرحله از زهکشی، بسیار قابل توجه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی نوسانات غلظت املاح و کارایی آبخویی اراضی شالیزاری تحت شرایط زهکشی زیرزمینی و شبیه‌سازی عملکرد آن با مدل Drainmod-S با استفاده از تحلیل پروفیل‌های شوری نیم‌رخ خاک در سناریوهای مختلف زهکشی و آبخویی خاک انجام شد. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی فرآیند زهکشی در این پژوهش، در چهار مرحله انجام شد. چهار مرحله مورد بررسی شامل شروع آزمایش تا زمان پنجه‌زنی و انجام زهکشی میان فصل، زهکشی میان فصل به مدت پنج روز، بستن مجدد زهکش تا زمان زهکشی پایان فصل و زهکشی پایان فصل به مدت چهار روز بود. همچنین، سه

(شکل‌های ۵، ۶، ۹ و ۱۰)، مشاهده شد که در حالت اول تغییرات غلظت تقریباً از ۵۳۰ به ۴۴۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده، اما برای حالت دوم این مقدار از ۱۲۰۰ به ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است، درحالی که زهکشی مشابه بوده است. به عبارتی، درصد آبخویی در هر دو سناریو تقریباً مشابه و به اندازه ۲۰ درصد بوده اما کارایی آبخویی در سناریو سوم بیشتر بود زیرا شوری آب و سپس خاک در سناریو سوم بیشتر بوده (بیش از دو برابر سناریوی دوم) و با اولین زهکشی، میزان کاهش املاح قابل توجه بود. این اختلاف راندمان آبخویی بین دو سناریو (شکل‌های ۷، ۸، ۱۱ و ۱۲) در زهکشی‌های بعدی کمتر می‌شود. نکته مهمی که در سناریو سوم وجود دارد، این است که با اعمال زهکشی از مرحله دوم به بعد، خطوط رنگی که اعماق مختلف خاک را نشان می‌دهد، به‌طور کامل بر روی هم مماس می‌شوند. این عمل نشان می‌دهد که بعد از اعمال اولین زهکشی، آبخویی کافی رخ داده و غلظت املاح در اعماق مختلف به حد یکسانی رسیده است اما به هر حال در هر بار اعمال زهکشی، کاهش غلظت املاح رخ می‌دهد. برای جمع‌بندی باید گفت که در این سناریو که آب شورتر به کار گرفته شد، تغییرات غلظت املاح زودتر به حد ثابتی می‌رسد اما در

شوری پروفیل خاک در مرحله دوم (بعد از زهکشی میان فصل) بیشتر از مرحله اول بود. در سناریو اول با استفاده از شاخص ارزیابی آماری دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر اندازه‌گیری شده، قابل قبول برآورد شد. در سناریو دوم و سوم نیز با مقایسه گرافیکی شکل‌ها به صورت کلی مشاهده شد که میزان آبشویی در دفعات اول زهکشی بیشتر بوده است. همچنین، راندمان آبشویی در حالت سوم بیشتر از حالت دوم بود که لزوم استفاده و کارایی زهکش زیرزمینی در خاک‌های با شوری بالا را نشان می‌دهد. به طور کلی، مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده شوری خاک نشان داد که می‌توان از مدل Drainmod-S به عنوان یک راهنمای کلی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی روند تغییرات املاح خاک و محاسبه آبشویی استفاده کرد.

سناریوی مدیریتی کاربردی نیز در نظر گرفته شد؛ بررسی پروفیل شوری تحت شرایط متعارف (سناریو اول)، بررسی پروفیل شوری خاک تحت شرایط مختلف زهکشی (سناریو دوم) و اعمال سناریوی دوم با آب آبیاری شورتر (سناریو سوم). نتایج این پژوهش از نقش مؤثر مدل در فهم فرایند پیچیده زهکشی در اراضی شالیزاری و شناخت سخت‌لایه و در نظر گرفتن اثرات آن حکایت دارد. نتایج پژوهش نشان داد که در شرایط باز و بسته شدن زهکش زیرزمینی در فصل رشد برنج (مراحل مختلف زهکشی)، با تغییر خصوصیات فیزیکی خاک مانند اعوجاج و ضریب پخشیدگی املاح، توزیع املاح در خاک بهبود یافته و این امر نشان‌دهنده تأثیرگذار بودن زهکشی بر ساختمان خاک است. در شرایط زهکشی متعارف اراضی شالیزاری (سناریوی اول)، دقت شبیه‌سازی مدل در برآورد

منابع مورد استفاده

1. Aghajani Mazandarani, Gh. 2017. The Effect of different subsurface drainage systems on improvement of water flow in paddy fields. *Water and Soil* 30(6): 1848-1859 (In Farsi).
2. Ahmadi, K., H. Ebadzadeh, F. Hatami, H. Abdolshah and A. Kazemian. 2021. Agricultural statistics crop year 2019-2020: Crop production. Ministry of Agriculture-Jihad, Program and Budget Deputy, Directorate General of Statistics and Information, First Edition, Tehran, Iran (In Farsi).
3. Akbari, M., B. Nazari, M. Parsinezhad and H. Ebrahimian. 2013. Inverse estimation of soil hydraulic conductivity using DRAINMOD model. *Journal of Water and Soil Science* 16(62): 85-92. (In Farsi).
4. Brevé, M. A., R.W. Skaggs, J. W. Gilliam, J. E. Parsons, A. T. Mohammad, G. M. Chescheir and R. O. Evans. 1997. Field testing of Drainmod-N. *Transactions of the ASAE* 40(4): 1077-1085.
5. Chartzoulakis, K. and M. Bertaki. 2015. Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4: 88-98.
6. Darzi-Naftchali, A., S. Mirlatifi, A. Shahnazari, F. Ejlali, and M. Mahdian. 2015. Evaluation of DRAINMOD model for predicting water table depth and drain discharge in subsurface-drained paddy fields. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 9(4): 583-593 (In Farsi).
7. Ebrahimian, H. and A. Laiaghat. 2008. Evaluation of Drainmod for estimation of water table and drainage rate (case study: drainage system of Behshahr RAN company). Technical note, *Iranian Water Research Journal* 1(1): 67-71 (In Farsi).
8. Feng, G., Z. Zhang, P. Lu and A. Bakour. 2018. Simulation of farmland groundwater table depth and soil salinity under drainage systems in Tidal areas, Laizhou Bay of China. *Irrigation and Drainage* 67: 105-118.
9. Gauch, H. G., J. T. Hwang, and G. W. Fick. 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agronomy Journal* 95(6): 1442-1446.
10. Hasanpoor, B., M. Parsinejad, F. Salahshour Dalivand, and H. Kowsari. 2010. Estimation of Water Table Fluctuations in Paddy Fields by Using Drainmod Model (case study: Rasht). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(2): 167-174 (In Farsi).
11. Jouni, H. J., A. Liaghat, A. Hassanoghli and R. Henk. 2018. Managing controlled drainage in irrigated farmers' fields: A case study in the Moghan plain, Iran. *Agricultural Water Management* 208: 393-405.
12. Kandil, M. H. 1992. Drainmod-S: A Water management model for irrigated arid lands. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh.
13. Lisenbee, W., J. Hathaway, L. Negm, M. Youssef and R. Winston. 2020. Enhanced bioretention cell modeling with DRAINMOD-Urban: Moving from water balances to hydrograph production. *Journal of Hydrology* 582: 124491.

14. Momennejad, Z., M. Navabian and M. Esmaeili Varaki. 2019. Evaluation of DRAINMOD by a Physical Model to Simulate the Performance of Subsurface Drainage at the Mid and End Season in Paddy Fields. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(1): 13-24 (In Farsi).
15. Nazari, B., A. Liaghat, M. Parsinezhad and A. Naseri. 2008. Optimizing subsurface drainage installation depth consideration economic and environmental. *In: Fifth Technical Workshop on Drainage and Environment, Tehran, Iran, (In Farsi).*
16. Nozari, H., A. Poursadri, S. Azadi and A. Liaghat. 2018. Evaluation of DRAINMOD-S in Simulating Drainage Water Salinity of Subsurface Drains. *Journal of Water Research in Agriculture* 32.3(3): 459-471 (In Farsi).
17. Pourgholam-Amiji, M., A. Liaghat, A. N. Ghameshlou and M. Khoshravesh. 2021. The Evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with a saline and shallow water table. *Journal of Hydrology* 598:126259.
18. Pourgholam-Amiji, M., A. Liaghat, A. Ghameshlou, M. Khoshravesh and M. M. Waqas. 2020. Investigation of the yield and yield components of rice in shallow water table and saline. *Big Data in Agriculture (BDA)* 2(1): 36-40.
19. Pourgholam-Amiji, M., A. Liaghat, A. Nazi Ghameshlou and M. Khoshravesh. 2019. The Evaluation of Drainmod-S model for simulating the water table fluctuations and salt concentration in soil profiles in paddy fields areas with a saline and shallow water table. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 12(6): 1418-1534 (In Farsi).
20. Schultz, B., D. Zimmer and W. F. Vlotman. 2007. Drainage under increasing and changing requirements. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage* 56(S1): S3-S22.
21. Shokhmegar, Y., A. Darzi-Naftchali and S. Mousavi Toghani. 2019. Evaluation of irrigation regimes and seedling age effects on rice (*Oryza sativa* L.) yield and yield components in conventional and ecological systems. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 13(2): 389-399 (In Farsi).
22. Skaggs, R. W. 1978. A Water Management Model for Shallow Water Table Soils. North Carolina University. Water Resources Research Institute Report (USA). No. 134.
23. Skaggs, R. W. 1980. DRAINMOD Reference Report. Methods for Design and Evaluation of Drainage-Water Management Systems for Soils with High Water Tables. USDASCS, South National Technical Center, Fort Worth, Texas.
24. Wahba, M. A. S. 2017. Assessment of options for the sustainable use of agricultural drainage water for irrigation in Egypt by simulation modeling. *Irrigation and Drainage* 66(1): 118-128.
25. Wahba, M. A. S., M. El-Ganainy, M. S. Abdel-Dayem, H., Kandil, and A. T. E. F. Gobran. 2002. Evaluation of DRAINMOD-S for simulating water table management under semi-arid conditions. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage* 51(3): 213-226.
26. Zare Abyaneh, H., H. Noori, A. Liaghat, V. Karimi and H. Noori. 2011. Calibration of Nitrate Leaching and Water Table Fluctuation in Paddy Rice Field by DRAINMOD-N Software. *Journal of Water and Soil Science* 15(57): 49-60 (In Farsi).

Investigation of Salt Concentration Fluctuations of Paddy Fields in Underground Drainage Conditions and Application of Applied Management Scenarios Using Drainmod-S Model

M. Masoomi, M. Pourgholam-Amiji and M. Parsinejad^{1*}

(Received: April 25-2021; Accepted: July 25-2021)

Abstract

In this study, the Drainmod-S model was used to vary soil salt concentration and the effect of underground drainage on the amount of leaching in a physical model (large lysimeter). A soil extractor was installed at depths of 40, 50, and 70 cm at a distance of 35 cm from the drainage to measure the salinity of the soil solution. In this study, three scenarios were applied including salinity profiles under conventional conditions (mid-season and end-season drainage), soil salinity profiles under different drainage conditions, and prior scenarios with saline irrigation. The second and third scenarios were applied in four drainage stages, respectively. These stages include transplanting and mid-season drainage (days 15 to 20), mid-season drainage (days 35 to 40), mid-season and end-season drainage (days 55 to 60), and end-season drainage (days 75 to 80). The results showed that after simulating the total solute concentration overtime at a depth of 40 cm and comparing it with the measured values, the coefficient of determination (R^2) was 0.77 indicating an acceptable Drainmod-S model simulation. This parameter for simulating solute concentration at 50 and 70 cm depth was 0.76 and 0.75, respectively. The mean absolute error parameter (MAE) value was also negligible.

Keywords: Unconventional water, Paddy fields, Land reclamation, Environment, Soil salinity fluctuations, Drainmod-S

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*: Corresponding author, Email: Parsinejad@ut.ac.ir