DOI: 10.22059/ijswr.2018.224661.667609 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۸ (ص ۲۴-۱۳)

Evaluation of DRAINMOD by a Physical Model to Simulate the Performance of Subsurface Drainage at the Mid and End Season in Paddy Fields

ZAHRA MOMEN NEJAD[1], MARYAM NAVABIAN[2*], MEHDI ESMAEILI VARAKI[3]

1. M.Sc Student of Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
2. Assistant Prof. of Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran
3. Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran

(Received: Jan. 8, 2017- Revised: May. 31, 2018- Accepted: June. 17, 2018)

ABSTRACT

The complexity of drainage process in paddy fields and time consumption of field tests make simulation models to be used inevitably for assessing subsurface drainage systems performance. The objective of this study was to evaluate DRAINMOD model and the effects of drainage management of paddy fields on the salinity of drainage water. In this regard, a physical model with 3m in length, o.6m width and 1m height was constructed and equipped with controlled drainage. The corrugated drainage pipe, covered with geotextile was laid at a depth of 70 cm in the box. The tank was filled with silty loam soil with the same density and layering as in the paddy fields. After rice cultivation and during the experiment, the soil solutions were collected from the depths of 40, 50 and 70 cm and their TDS were measured in the laboratory. In order to evaluate the accuracy of DRIANMOD model for simulation of qualitative and quatitive subsurface drainage water, the solute transport parameters including dispersivity, tortousity factor, molecular diffusion coefficient, precipitation limit and the hydraulic conductivity were obtained through minimizing differences between the observed and the estimated salt solusion and drainage volume using genetic algorithm optimization method. The results showed that the model could simulate the performace of drainage system very well at before and after the midseason (NRMSE < 20%) and excellent at the mid and end season (NRMSE < 10 %). The TDS and drainage volume were estimated by average RMSE of 63.27 mg/l and 0.0145 cm^3 respectively. The comparison of estimated and observed values showed a better performance for the model at the non-submerged conditions. The results of calibration and validation of model showed that the DRAINMOD-S model is capable to simulate the performance of subsurface drainage in paddy fields.

Key words: Rice, Drainage water salinity, Soil profiles salinity, Solute transport, Genetic algorithm.

*Corresponding Author and Emai: Navabian@guilan.ac.ir

ارزیابی مدل DRAINMOD با استفاده از مدل فیزیکی در شبیه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی میان‌فصل و پایان‌فصل اراضی شالیزاری

زهرا مومن‌نژاد[۱]، مریم نوابیان[۲*]، مهدی اسمعیلی ورکی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط‌زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، رشت، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط‌زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، رشت، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۹/ ۱۳۹۵/۱۰- تاریخ بازنگری: ۱۰/ ۱۳۹۷/۳- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۳/۲۷)

چکیده

پیچیدگی فرآیند زهکشی در اراضی شالیزاری در کنار زمان‌بر بودن آزمایش‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز برای ارزیابی سامانه‌های زهکشی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی مدل DRAINMOD و تأثیر مدیریت زهکشی اراضی شالیزاری بر شوری و حجم زه آب خروجی انجام شد. بنابراین مدل فیزیکی زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری به صورت مخزنی مکعبی به طول سه متر، عرض ۰/۶ و ارتفاع یک متر ساخته و لوله زهکش موج‌دار در عمق ۷۰ سانتی‌متر نصب شد. مخزن با تراکم و لایه‌بندی متداول خاک اراضی شالیزاری استان گیلان (لوم سیلتی) پر شد و پس از کشت برنج، در طول آزمایش از محلول خاک در عمق‌های ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام و غلظت کل املاح (TDS) اندازه‌گیری شد. به منظور ارزیابی دقت مدل DRAINMOD در شبیه‌سازی فرآیند زهکشی زیرزمینی و بررسی تأثیرپذیری انتقال املاح از زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل، پارامترهای انتقال املاح شامل ضریب انتشارپذیری، ضریب اعوجاج، ضریب پخشیدگی مولکولی، حد ترسیب نمک و هدایت هیدرولیکی خاک از طریق حداقل‌سازی اختلاف میان مقادیر غلظت املاح عصاره خاک مشاهداتی و حجم زه‌آب با مقادیر تخمینی آن‌ها به ترتیب با استفاده از بخش شوری و هیدرولوژی مدل و روش حل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل توانست شرایط قبل و بعد از زهکشی میان‌فصل را با کارکرد بسیار خوب (nRMSE کمتر از ۲۰ درصد) و زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل را با کارکرد عالی (nRMSE کمتر از ۱۰ درصد) شبیه‌سازی کند. غلظت کل املاح و حجم زه‌آب خروجی به ترتیب به طور متوسط با ریشه میانگین مجذور خطای ۶۳/۲۷ میلی‌گرم بر لیتر و ۰/۰۱۴۵ سانتی‌متر مکعب شبیه‌سازی شد. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی نشان از دقت بیش‌تر مدل در شبیه‌سازی شرایط غیرغرقاب نسبت به شرایط غرقاب داشت. نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل نشان داد DRAINMOD، می‌تواند مدلی قابل‌قبول در شبیه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی در شرایط اراضی شالیزاری باشد.

واژه‌های کلیدی: برنج، شوری زه‌آب، شوری نیمرخ خاک، انتقال املاح، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

برنج در میان محصولات زراعی بالاترین ارزش ناخالص را داراست و به دلیل درآمد بیش‌تر نسبت به سایر محصولات، کشت آن در مناطقی مانند استان گیلان که دارای شرایط اقلیمی و اکولوژیکی مناسب برای کشت برنج است، رواج بیش‌تری یافته است (Okhovat, 1997). مدیریت کمی آب آبیاری از طریق اعمال شیوه آبیاری غرقاب دائم یا متناوب و مدیریت کیفی آن با توجه به روند افزایشی شوری منابع آب، استفاده از زه‌آب برگشتی و تلفیق منابع آب سطحی و زیرزمینی در برخی اراضی (با توجه به حساسیت گیاه برنج به شوری)، نسبت به سایر نهاده‌های بخش کشاورزی (مانند کاربرد کود و سم و عملیات زراعی)، مهم‌ترین عملیات مدیریتی مؤثر بر شاخص‌های کمی و کیفی برنج محسوب می‌شود. از این‌رو در اراضی شالیزاری مدیریت آب از طریق زهکشی می‌تواند نقش تأثیرگذاری بر عملیات کشت برنج و در نتیجه عملکرد کمی و کیفی آن داشته باشد. زهکشی در اراضی شالیزاری در مراحل پنجه‌زنی (زهکشی میان‌فصل) و برداشت محصول (زهکشی پایان‌فصل) شرایط مناسبی را برای فعالیت ریشه در نتیجه تأثیر

* نویسنده مسئول: Navabian@guilan.ac.ir

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 (Alizadeh *et al*., 2016). کمبود منابع آب و شور شدن و کاهش کیفیت آن‌ها در ایران و به طور خاص در استان گیلان، لزوم مدیریت صحیح آبیاری و زهکشی را با هدف دستیابی به کشاورزی پایدار، تداوم کشت برنج به عنوان محصول استراتژیک کشور و کاهش سهم آلایندگی منابع آب از بخش کشاورزی بیش از پیش نمایان می‌کند.

زهکشی در اراضی شالیزاری شمال کشور به دلیل شرایط خاص این اراضی و غرقابی بودن آن دارای شرایط ویژه‌ای است که ارزیابی معیارهای طراحی و عملکرد سامانه به علت ناشناخته بودن واکنش آن ضروری است. سامانه‌های زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری ایران سابقه زیادی ندارد، ازاین‌رو مطالعه در خصوص رفتار و عملکرد زهکش زیرزمینی در شرایط اراضی شالیزاری و تعیین گزینه مناسب طراحی و مدیریت این سامانه‌ها دارای اهمیت بسزایی است. آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور تعیین و بررسی مناسب‌ترین گزینه مدیریت زهکشی به‌ویژه زهکشی کنترل‌شده مفید هستند، اما محدودیت‌های قابل‌توجهی نیز دارند. مهمترین محدودیت‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای به محدودیت در مکان، زمان و تکرار آن‌ها بر می‌گردد (Samipoor *et al*., 2011).

مدل‌های شبیه‌سازی ابزار توانایی در بررسی و تحلیل گزینه‌های مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب به‌خصوص در شرایط کمبود منابع آب هستند (Ines and Droogers, 2002). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی محدودیت‌های موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد (Skaggs, 1982). از میان مدل‌های شبیه‌سازی زهکشی، مدل DRAINMOD به‌منظور شبیه‌سازی هم‌زمان شوری نیمرخ خاک، سطح ایستابی و زه‌آب خروجی از زهکش‌ها در مناطقی که سطح ایستابی در عمق کم قرار گرفته، توسعه داده‌شده است. این مدل توسط Kandil *et al*. (1992) برای شبیه‌سازی حرکت نمک در خاک و Breve *et al*, (1997) برای شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن در خاک تکمیل شد که به ترتیب زیر مدل‌های DRAINMOD-S و DRAINMOD-N به مدل اصلی اضافه شد. شبیه‌سازی هیدرولوژی جریان در مدل DRAINMOD بر اساس بیلان آب و شبیه‌سازی شوری بر اساس حل معادله انتقال-انتشار و به روش بیلان جرم است. اطلاعات ورودی مدل شامل داده‌های هواشناسی، خصوصیات خاک، اطلاعات گیاه و پارامترهای طراحی و مدیریت سامانه زهکشی است.

Torkzaban (2000) قابلیت اطمینان مدل DRAINMOD-S را برای اراضی تحت آبیاری در آب و هوای نیمه‌خشک خوزستان با استفاده از داده‌های صحرایی مورد ارزیابی قرار داد. قسمت شوری مدل با مقایسه مقادیر شوری اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه واسنجی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد با توجه به قابل قبول بودن دقت مدل در شبیه‌سازی شوری خاک، DRAINMOD-S می‌تواند برای طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری اراضی خوزستان که منطقه گرم با سطح ایستابی کم‌عمق است، به کار گرفته شود.

Christen and Wahba (2006) مدل DRAINMOD-S را برای اراضی کشت گندم و ذرت جنوب شرقی استرالیا که بافت خاک لوم رسی و عمق زهکش‌های زیرزمینی ۰/۷ و ۱/۸ متر بود، مورد استفاده قرار دادند و نتایج رضایت‌بخشی در مورد شبیه‌سازی نوسان سطح ایستابی و زه‌آب خروجی گزارش نمودند. بر اساس نتایج سطح ایستابی برای زهکش عمق ۰/۷ متر با فاصله ۳/۶۵ متر در دو سال زراعی متوالی به ترتیب با میانگین انحراف معیار ۱۳ و ۱۲ سانتی‌متر و خطای استاندارد ۱۶ سانتی‌متر شبیه‌سازی شد. دقت شبیه‌سازی زه‌آب خروجی از این زهکش در دو سال زراعی به ترتیب با انحراف معیار ۲/۱ و ۱/۱ میلی‌متر و درصد خطای استاندارد ۱۸+ و ۲۴- درصد و بار کل نمک خروجی نیز با درصد خطای استاندار ۲۵+ و ۳۷- درصد و انحراف معیار ۶۵ و ۵۴ کیلوگرم در هکتار گزارش شد.

Nazari *et al*. (2008) در پژوهشی با استفاده از قابلیت‌های مدل DRAINMOD-S در شبیه‌سازی عملکرد سامانه زهکشی زیرزمینی، عملکرد نیشکر و بار نمک زه‌آب، اثر عمق زهکش (۱۰۰ سانتی‌متر تا ۲۱۰ سانتی‌متر به فواصل پنج سانتی‌متری) را بر کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی سامانه زهکشی در واحد امیرکبیر (از واحدهای کشت و صنعت نیشکر خوزستان) مورد بررسی قرار دادند. نتایج واسنجی مدل در عمق و فاصله زهکش ۲ و ۴۰ متر نشان داد تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده سطح ایستابی وجود دارد (میانگین انحراف مطلق و خطای استاندارد به ترتیب برابر ۲۲/۵ و ۲۹/۵ سانتی‌متر). همچنین، مقایسه خروجی مدل واسنجی‌شده در عمق نصب‌های مورد بررسی زهکش نشان داد که عمق نصب زهکش بر عملکرد گیاه نیشکر اثر متفاوتی دارد، بدین معنی که همواره افزایش عمق نصب زهکش موجب افزایش یکنواخت عملکرد گیاه نمی‌شود. بر اساس نتایج با افزایش عمق زهکش، نمک خروجی از زهکش‌ها افزایش یافت ولی روند افزایش خطی نبود. همچنین طبق نتایج مدل DRAINMOD-S، با افزایش عمق نصب زهکش‌ها از ۱۰۰ به

۲۱۰ سانتی‌متر، تخلیه سالانه نمک از زهکش‌ها را از ۶۷/۴ تن در هکتار به ۱۰۲/۵ تن در هکتار برآورد شد.

Ramezani *et al.* (2011) حساسیت مدل DRAINMOD-S را نسبت به پارامترهای ورودی هدایت هیدرولیکی، شعاع مؤثر، عمق لایه نفوذناپذیر، رطوبت نقطه پژمردگی و پارامتر انحنای مسیر (فاکتور اعوجاج) بر روی چهار پارامتر مهم خروجی شامل تعداد روزهای آمادگی زمین برای کار، متوسط شوری خاک، SEW30 (مجموع ماندابی) و دبی خروجی از زهکش‌ها بررسی نمودند. اطلاعات صحرایی اندازه‌گیری شده از یک پلات آزمایشی به وسعت ۳/۳ هکتار در منطقه شمال شرقی شهرستان بهشهر و در حاشیه جنوبی خلیج گرگان که دارای کشت گیاهان پائیزه گندم و جو و سامانه زهکشی با عمق و فاصله نصب ۱/۵ و ۷۵ متر بود، تهیه شد. بافت خاک در پلات مورد مطالعه سه لایه بود که لایه اول آن با ضخامت ۴۰ سانتی‌متری شنی لومی، لایه دوم به ضخامت ۶۰ سانتی‌متری با بافت لومی سیلتی و بافت لایه سوم خاک با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر از نوع رسی سیلتی بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد بیش‌ترین حساسیت مدل برای متوسط شوری خاک مربوط به SEW30 و دبی خروجی از زهکش‌ها بر روی هدایت هیدرولیکی لایه دوم خاک و برای تعداد روزهای آمادگی زمین جهت کار بر روی عمق لایه غیرقابل نفوذ بود. همچنین حساسیت مدل نسبت به پارامترهای شعاع مؤثر، رطوبت نقطه پژمردگی و پارامتر انحنای مسیر بر رو تمامی خروجی‌ها ناچیز بود.

Kale (2011) از مدل DRAINMOD-S برای شبیه‌سازی اثر مدیریت آب و معیارهای طراحی سامانه زهکشی برای حصول اطمینان از عملکرد بالای محصول گندم زمستانه و ذرت در سه سال زراعی ترکیه استفاده نمود و اعتبار مدل را مورد بررسی قرار داد. بافت خاک منطقه شامل رسی، رس لومی، شن لومی و لومی بود. نتایج رضایت‌بخشی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به دست آمده به‌طوری‌که قدرمطلق میانگین انحراف معیار برای پارامترهای سطح ایستابی، زه‌آب خروجی و شوری خاک به ترتیب در محدوده ۵۶/۹-۴۹/۹ میلی‌متر، ۱۱/۲-۱۰/۱ میلی‌متر، ۰/۹۶-۰/۵۱ دسی‌زیمنس بر متر و برای شوری زه‌آب خروجی ۰/۶۶ دسی‌زیمنس بر متر بود.

مدل DRAINMOD-S برای شبیه‌سازی پنج گزینه آبیاری در طی دوره‌ای ۲۰ ساله برای تناوب دو ساله گندم، ذرت، شبدر، پنبه در مصر مورد بررسی قرار گرفت. سناریوها شامل آب غیرشور (۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر)، زه‌آب با شوری‌های متفاوت (۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر)، آبیاری به‌صورت چرخشی با آب غیرشور و زه‌آب، کم آبیاری با زهکشی کنترل‌شده و چرخه بین فصلی آب غیرشور و زه‌آب (دو سال زه‌آب و دو سال آب غیرشور) بود. گزینه کم آبیاری در ترکیب با زهکش کنترل‌شده نتایج بهتری نسبت به سایر گزینه‌ها داشت. این گزینه بدون کاهش عملکرد محصول و یا افزایش شوری خاک توانست دو آبیاری را در طول دوره رشد گیاه ذخیره کند. همچنین اثر گزینه‌های مختلف بر شوری خاک نشان داد که گزینه آبیاری با آب غیرشور با زهکش کنترل‌شده نزدیک‌ترین نتایج را به گزینه اول (استفاده از آب غیرشور) داشت (Wahba, 2016).

Zare Abyaneh *et al.*, (2011) برای شبیه‌سازی و ارزیابی سطح ایستابی و انتقال نیترات از داده‌های یک مزرعه برنج مجهز به سامانه زهکش سطحی واقع در منطقه محمود آباد (مازندران) و مدل DRAINMOD-N استفاده نمودند. نتایج نشان داد تغییرات سطح ایستابی و غلظت نیترات در زیر منطقه توسعه ریشه در حداکثر مواقع به خوبی به وسیله مدل برآورد شد و از هماهنگی خوبی با شرایط مزرعه برخوردار بود. Noory *et al.* (2010) از مدل DRAINMOD-N برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در آب خروجی (رواناب و آب زهکش زیرزمینی) و آب زیرزمینی در عمق کم در یک زمین شالیزاری مجهز به زهکش کنترل شده استفاده کردند. عملکرد مدل با مقایسه عمق سطح ایستابی و غلظت نیترات مشاهده و شبیه‌سازی‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که DRAINMOD-N می‌تواند برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی خاک و غلظت نیترات در آب زیرزمینی کم‌عمق مورد استفاده قرار گیرد. Farmaha (2014) مدل‌های SWAP و ANIMO را برای برآورد رطوبت خاک و نیتروژن آبشویی شده مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش داده‌های رطوبت خاک در زمان کشت گندم برای واسنجی و از مقادیر نیترات و آمونیوم خاک در زمان کشت محصول برنج برای اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج نشان داد مدل‌ها قادر به برآورد نیتروژن آبشویی شده از مزرعه برنج و گندم در محیط‌های مورد آزمایش می‌باشند و بهبود عملکرد آن‌ها با داده‌های بیش‌تر امکان‌پذیر است.

از آنجا که مطالعات زیادی در خصوص مدل‌سازی زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری در ایران انجام نشده و با توجه به روند افزایش شوری آب رودخانه سفیدرود به عنوان 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. علاوه بر این زهکشی بر تخلیه پروفیل خاک و امکان برداشت مکانیزه برنج تأثیر دارد و طراحی و مدیریت زهکشی برای دستیابی به شرایط

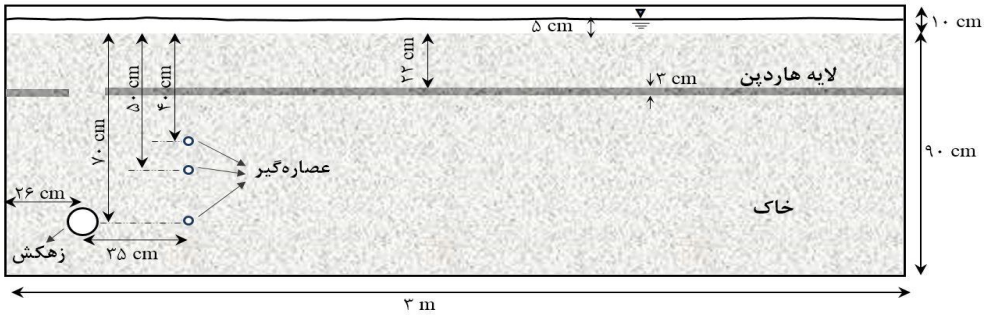
ایده‌ال اقتصادی و فنی زهکشی در اراضی شالیزاری نیازمند ارزیابی عملکرد زهکش در بخش هیدرولوژی مدل DRAINMOD است. بنابراین هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل DRAINMOD در شبیه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی (از نظر حجم زه‌آب خروجی و کنترل شوری نیمرخ خاک) در مقیاس مدل فیزیکی اراضی شالیزاری در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

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 در سال ۱۳۹۴ 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 با پوشش دور ژئوتکستایل PLM (بر اساس منحنی دانه‌بندی خاک و ژئوتکستایل‌های موجود در بازار ایران، PP 450 انتخاب شد) در عمق ۷۰ سانتی‌متر نصب شد. بدین ترتیب با توجه به طول مخزن، امکان بررسی سطح ایستابی تا فاصله ۲/۵ متر از زهکش (فاصله بین حد وسط زهکش تا زهکش در فاصله زهکشی پنج متر با توجه به محدودیت ابعاد مدل فیزیکی، ابعاد کرت‌های در طرح‌های تجهیز و یکپارچه‌سازی اراضی شالیزاری و یکی از فواصل قابل توصیه در اراضی شالیزاری (Yufu *et al.*, 2013) است) فراهم شد. به‌منظور اندازه‌گیری شوری محلول خاک، عصاره‌گیر خاک در اعماق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری خاک در فاصله ۳۵ سانتی‌متر از زهکش نصب شد. شمای کلی مدل فیزیکی و محل قرارگیری زهکش و عصاره‌گیرها در شکل (۱) نشان داده‌شده است.

مخزن به وسیله خاک هوا خشک کوبیده و عبور داده‌شده از الک پنج میلی‌متر که از اراضی شالیزاری تهیه شده بود، پر شد. لایه‌های خاک به ضخامت‌های مشابه شکل (۱) با تراکم عرف اراضی شالیزاری در استان گیلان (جرم مخصوص ظاهری ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در نظر گرفته شد. همچنین کفه سخت (Hardpan) با استفاده از ذرات خاک دارای قطر کوچک‌تر از دو میلی‌متر در عمق ۲۲ سانتی‌متری از سطح خاک به‌منظور ایجاد شرایط مشابه با اراضی شالیزاری ایجاد شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده در آزمایش نیز در جدول (۱) آمده است. مخزن در محیط فضای باز و بر روی سطح خاک قرار گرفت و برای کاهش جذب نور خورشید با رنگ روشن رنگ‌آمیزی شد. بعد از پر کردن مخزن تا ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر، خاک به مدت یک هفته در شرایط غرقاب نگه‌داری شد تا علاوه بر نشست، اشباع شده و مشابه شرایط اراضی شالیزاری برای کشت برنج آماده شود. کودهای ازته و فسفاته مطابق دستورالعمل منطقه‌ای در دو مرحله، قبل از کشت و در مرحله پنجه‌زنی مطابق عرف اراضی شالیزاری در استان گیلان به خاک اضافه شد (کود ازته ۹۰ کیلوگرم در هکتار و کود فسفاته ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار). در مرحله اول پیش از کاشت برنج دو سوم کود ازته و کود فسفاته در آب حل و به‌صورت یکنواخت روی سطح خاک پخش شد.

بر اساس عملیات زراعی عرف منطقه نشاکاری برنج (رقم هاشمی) در خزانه انجام شد و در تاریخ ۲۹ خرداد ماه به مدل فیزیکی منتقل شد. گیاه برنج به‌صورت ردیفی با فاصله ۲۵ سانتی‌متر در ۲۵ سانتی‌متر کشت شد. پس از استقرار برنج، عملیات آبیاری به‌صورت غرقاب دائم به‌طوری‌که همواره ارتفاع آب روی سطح خاک پنج سانتی‌متر باشد، به‌وسیله مخزن آب و شناور تثبیت سطح آب، انجام شد. زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل به ترتیب در تاریخ‌های اول مرداد و ۱۵ شهریور انجام شد. در زهکشی میان‌فصل پس از پنج روز، زهکش مجدداً بسته شد و شرایط غرقاب ایجاد شد.



شکل ۱- نمای جلو مدل فیزیکی، موقعیت زهکش و محل قرارگیری عصاره‌گیرها

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

بافت خاک/ آب آبیاری	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت اشباع (٪)	pH (-)	Na^+ (meq/L)	Ca^{+2} (meq/L)	Mg^{+2} (meq/L)	NO_3^- (mg/L)	Cl^- (meq/L)	HCO_3^- (mg/L)
لوم سیلتی	۱۹/۴۵	۶۳/۱۰	۱۷/۴۵	۱/۳۰	۴۷/۰۰	۷/۵۸	۲/۵۴	۵/۰۰	۷/۸۰	۱۰/۱۳	۲/۱۵	۱۸۰/۵۶
آب آبیاری	-	-	-	-	-	۸/۰۵	۱/۵۷	۱/۱۰	۴/۱۰	۱/۵۰	۱/۲۳	۱۹۳/۵۳

به‌منظور تعیین شوری نیمرخ خاک، در زمان‌های ۶، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۳، ۲۵، ۲۹، ۳۵، ۴۵، ۴۸، ۵۳، ۵۵، ۶۵، ۶۸، ۷۶ و ۸۰ روز پس از شروع کشت در مخزن، عصاره خاک به‌وسیله عصاره‌گیرها جمع‌آوری شد و مقادیر غلظت کل املاح (TDS) اندازه‌گیری شد. دبی خروجی از زهکش نیز در دو مرحله زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل به روش حجمی اندازه‌گیری شد. همچنین، شوری اولیه خاک در سه عمق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ در شروع آزمایش با نمونه‌برداری از خاک اندازه‌گیری شد که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۴۹۶، ۵۷۴ و ۵۳۷ میلی‌گرم بر لیتر بود. متوسط شوری آب آبیاری در طول آزمایش ۵۳۲ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد.

مهم‌ترین اطلاعات ورودی در بخش هیدرولوژی مدل DRAINMOD 6.1 شامل داده‌های هواشناسی، خاکشناسی، زهکشی و گیاهی و در DRAINMOD-S شوری خاک و آب آبیاری است. داده‌های هواشناسی شامل بارندگی (روزانه یا ساعتی)، حداکثر و حداقل دما و تبخیر- تعرق پتانسیل است. این اطلاعات از مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی استان گیلان تهیه شد. تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه با نرم‌افزار CROPWAT محاسبه و به‌صورت فایل آماده به مدل داده شد. اطلاعات موردنیاز برای سامانه زهکشی شامل عمق نصب زهکش، فاصله زهکش‌ها، شعاع مؤثر زهکش‌ها، عمق لایه غیرقابل نفوذ و عمق اولیه سطح ایستابی بوده که در جدول (۲) ارائه شده است. اطلاعات خاک شامل منحنی رطوبتی، ضرایب معادله نفوذ و رطوبت اشباع است که منحنی رطوبتی از ترکیب رطوبت اشباع و رطوبت‌های به‌دست‌آمده در فشارهای ۰/۳۳، ۱، ۲ و ۳ بار به‌وسیله دستگاه صفحه فشاری با استفاده از نرم‌افزار RETC به دست آمد. ضرایب معادله نفوذ نیز در بخش Utilities مدل با نقاط منحنی رطوبتی، ضخامت لایه خاک، هدایت هیدرولیکی و حداکثر عمق توسعه ریشه محاسبه و به مدل داده شد.

با توجه به این‌که مدت زمان زهکشی میان‌فصل و زمان اعمال آن (اواسط خرداد) در اراضی شالیزاری مطابق با مقیاس زمانی زهکش کنترل‌شده در مدل DRAINMOD نیست و مدل وضعیت غرقاب (Pounding) مورد نیاز اراضی شالیزاری در زمان‌های غیر از زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل را نمی‌تواند متغیر نسبت به زمان لحاظ کند تا بتوان در زمان زهکشی اثر آن را حذف نمود، 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.

جدول ۲- خلاصه‌ای از مقادیر پارامترهای سامانه مطابق با شرایط مدل فیزیکی

پارامتر	مقدار	واحد
عمق زهکش	۷۰/۰	سانتی‌متر
فاصله زهکش‌ها	۵۰۰/۰	سانتی‌متر
شعاع مؤثر زهکش‌ها	۰/۶	سانتی‌متر
عمق لایه غیرقابل نفوذ	۹۰/۰	سانتی‌متر
عمق اولیه سطح ایستابی (مرحله اول)	۴/۰	سانتی‌متر
عمق اولیه سطح ایستابی (مرحله دوم)	۰/۰	سانتی‌متر
عمق اولیه سطح ایستابی (مرحله سوم)	۷۰	سانتی‌متر
عمق اولیه سطح ایستابی (مرحله چهارم)	۰/۰	سانتی‌متر

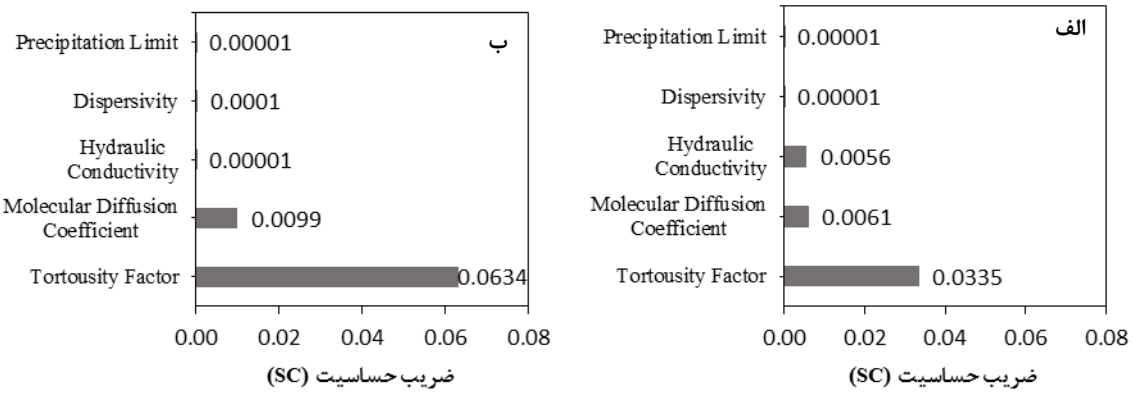
به‌منظور واسنجی مدل در مرحله اول و سوم به دلیل عدم زهکشی و بسته بودن خروجی زهکش و نداشتن مقادیر اندازه‌گیری حجم زه‌آب و سطح ایستابی ثابت تحت این شرایط، از مدل DRAINMOD-S و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت املاح در عصاره خاک استفاده شد. در مرحله دوم و چهارم با وقوع زهکشی میان فصل و پایان‌فصل به دلیل امکان اندازه‌گیری حجم زه‌آب و تفاوت نامحسوس کیفیت زه‌آب طی مدت تخلیه پروفیل خاک، از مدل DRAINMOD استفاده شد. در مرحله اول و سوم مقادیر پارامترهای حساس انتقال املاح شامل ضریب انتشارپذیری (Dispersivity)، ضریب اعوجاج (Tortousity Factor)، ضریب پخشیدگی مولکولی (Diffusion Molecular Coefficient)، حد ترسیب نمک (Precipitation Limit) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به عنوان ضرایب واسنجی انتخاب و تعیین شد انتخاب ضرایب واسنجی بر اساس تحلیل

حساسیت (رابطه ۱) مدل DRAINMOD صورت گرفت (شکل ۲). طبق نتایج تحلیل حساسیت اگرچه ضریب انتشارپذیری و حد ترسیب نمک حساسیت کمتری داشتند، اما به عدم اندازه‌گیری آن‌ها هم به عنوان ضرایب واسنجی در نظر گرفته شد. برای تعیین ضرایب واسنجی، از مدل بهینه‌سازی با تابع هدف حداقل‌سازی شاخص آماری nRMSE حاصل از مقایسه مقادیر تخمینی مدل و مشاهداتی در مدل فیزیکی استفاده شد. بنابراین از مدل DRAINMOD-S برای تخمین غلظت املاح محلول خاک مورد نیاز تابع هدف و از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل بهینه‌سازی استفاده شد. در مراحل دوم و چهارم یعنی زمان زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل، برای واسنجی بخش هیدرولوژی مدل DRAINMOD، از مدل بهینه‌سازی با تابع هدف حداقل‌سازی شاخص آماری nRMSE حاصل از مقایسه مقادیر تخمینی مدل و مشاهداتی حجم زه‌آب خروجی از زهکش در مدل فیزیکی) استفاده شد. در این دو مرحله پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به عنوان ضریب واسنجی (به دلیل حساسیت مدل (شکل ۳) و از بخش هیدرولوژی مدل DRAINMOD برای تخمین مقادیر حجم زه‌آب مورد نیاز در تابع هدف استفاده شد.

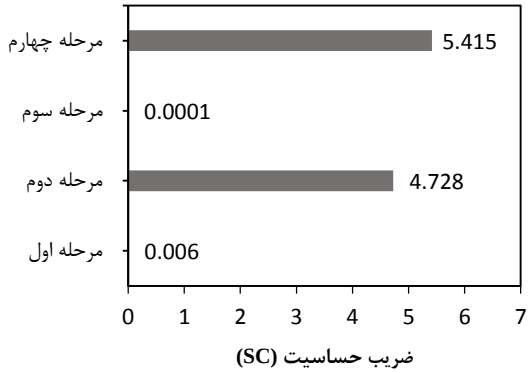
به‌منظور تعیین حساسیت مدل به پارامترهای ورودی، تحلیل حساسیت بر اساس رابطه (۱) انجام شد (Amin Salehi *et al.*, 2017).

$$SC = \frac{\frac{y(b+\Delta b)-y(b)}{y(b)}}{\frac{\Delta b}{b}} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن: y(b+Δb) و y(b) به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل در ازای مقدار b+Δb و b از پارامتر مورد حساسیت‌سنجی است. Δb برابر 0.1b (تغییرات ۱۰ درصدی در پارامترها) در نظر گرفته شد.



شکل ۲- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل در شبیه‌سازی شوری، الف) مرحله اول، ب) مرحله سوم شبیه‌سازی



شکل ۳-ضریب حساسیت هدایت هیدرولیکی در شبیه‌سازی حجم زه‌آب خروجی در مراحل شبیه‌سازی

برای ارزیابی مدل از شاخص‌های MAE، RMSE، GMER و nRMSE استفاده شد. روابط (۲) تا (۴) مربوط به هرکدام از شاخص‌ها را نشان می‌دهد (Caton *et al.*, 1999; Gauch *et al.*, 2003).

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{n} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2}{n}} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\overline{O}} \times 100$$ (رابطه ۴)

$$GMER = EXP(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Ln(\frac{P_i}{O_i}))$$ (رابطه ۵)

که در آن‌ها: P_i مقادیر تخمین زده‌شده، 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 هرچه این شاخص کمتر باشد نشانه شبیه‌سازی بهتر مدل است. مقدار بهینه ضریب کارایی مدل برای زمانی که مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده مساوی باشند برابر یک است. شاخص MAE انحراف از خطا را نشان می‌دهد. شاخص GMER بیش یا کم برآوردی را نشان می‌دهد و حد بالاتر و پایین‌تر از یک به ترتیب بیان‌گر بیش و کم‌برآوردی است.

Jamieson *et al.* (1991) از شاخص nRMSE برای ارزیابی کارایی مدل بهره گرفتند طبق این پژوهش مقادیر کمتر از ۱۰ درصد بیان‌کننده کارکرد عالی، محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان‌کننده کارکرد بسیار خوب و محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد بیانگر کارکرد متوسط و بیش‌تر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده ضعیف بودن کارکرد مدل است. Bannayan and Hoogenboom (2009) نیز این محدوده‌ها را تائید کرده‌اند.

نتایج و بحث

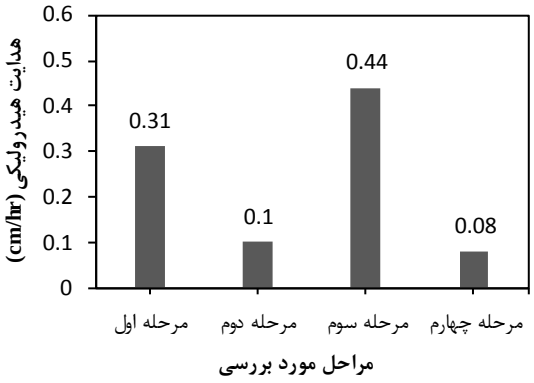
مقادیر بهینه پارامترهای ضریب انتشارپذیری، ضریب اعوجاج، ضریب پخشیدگی مولکولی و حد ترسیب نمک که از ترکیب الگوریتم ژنتیک و مدل DRAINMOD-S در مرحله واسنجی به‌دست‌آمده، در جدول (۳) ارائه شده است. مقایسه ضریب انتشارپذیری در مراحل اول و سوم نشان می‌دهد که با گذشت زمان و پس از اعمال زهکشی میان‌فصل این ضریب در 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 ترک در اثر زهکشی میان‌فصل (بیشینه عمق ترک ۹ سانتی‌متر و میانگین عرض ترک ۱/۲ سانتی‌متر) و درنتیجه آن بزرگ‌تر شدن خلل و فرج مؤثر در انتقال املاح، می‌تواند از دلایل افزایش ضریب Dispersivity در این مرحله نسبت به مرحله اول باشد. روند افزایش پارامتر Tortousity Factor که نشان‌دهنده اعوجاج، تغییر مسیر حرکت نمک و طولانی‌تر شدن مسیر جریان در خاک است، نتایج مربوط به افزایش ضریب انتشارپذیری را تائید 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 Precipitation Limit در محدوده ۳۱۹۷۹- ۲۹۴۱۶ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد که مطابقت مناسبی با نتایج پژوهش‌های پیشین دارد (Skaggs, 1980). تفاوت مقدار این پارامتر نشان از تفاوت خصوصیات شیمیایی خاک در مراحل مختلف زهکشی دارد که بر پتانسیل ترسیب املاح در نیمرخ خاک تأثیر می‌گذارد. میانگین مقادیر pH قبل و بعد از زهکشی میان‌فصل 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 درنتیجه کاهش Precipitation Limit در مرحله سوم نسبت به مرحله اول است.

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای انتقال املاح در الگوریتم ژنتیک در مراحل مختلف شبیه‌سازی زهکشی

شماره مرحله	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

شکل (۴) مقادیر هدایت هیدرولیکی خاک در چهار مرحله شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مقایسه هدایت هیدرولیکی در مراحل اول و سوم حاکی از افزایش ۴۲ درصدی است که این مسئله می‌تواند اثر زهکشی بر تغییر ساختمان و وضعیت خلل و فرج خاک را نشان دهد. کاهش هدایت هیدرولیکی از مرحله اول به دوم و به‌طور مشابه از مرحله سوم به چهارم نشان‌دهنده نقش تخریبی زه‌دار بودن خاک بر ساختمان آن و در نتیجه کاهش حجم منافذ خاک و هدایت هیدرولیکی است. همچنین با استفاده از درصد ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع خاک، هدایت هیدرولیکی در مدل ROSETTA برابر ۰/۴۵ سانتی‌متر بر ساعت برآورد شد که تطابق خوبی با مقادیر بهینه‌سازی‌شده طی فرآیند واسنجی مدل دارد.



شکل ۴- مقادیر بهینه‌سازی شده هدایت هیدرولیکی در مراحل مختلف شبیه‌سازی

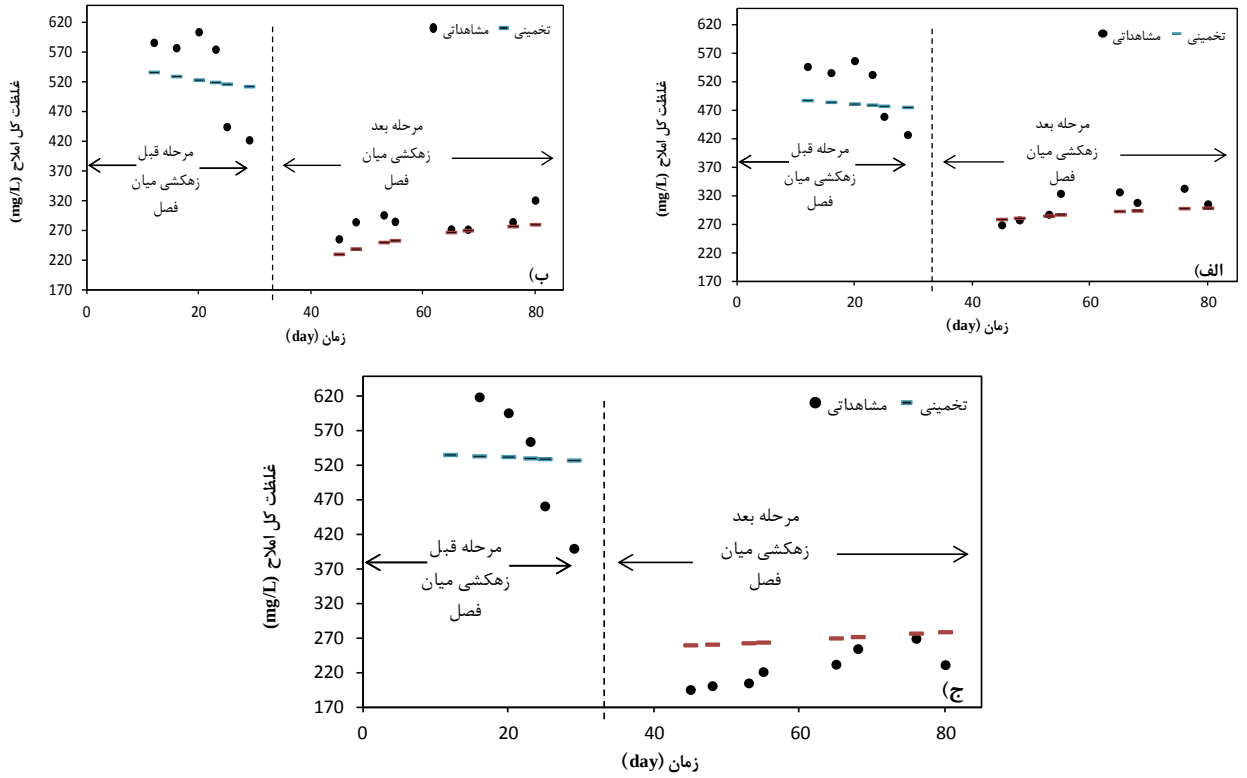
نتایج شاخص‌های آماری در مراحل مختلف شبیه‌سازی در جدول (۴) ارائه شده است. مقادیر شاخص nRMSE با توجه به شاخص‌های Jamieson و همکاران (1991) بیان‌کننده کارکرد بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی مراحل اول و سوم و همچنین کارکرد عالی آن در شبیه‌سازی مراحل دوم و چهارم است. مقایسه نتایج شاخص‌های آماری RMSE و MAE نشان از دقت بیش‌تر مدل در شبیه‌سازی مرحله سوم نسبت به مرحله اول دارد. بنا بر نتایج، مدل شرایط غیر غرقاب را با دقت مناسب‌تری نسبت به شرایط غرقاب شبیه‌سازی می‌کند. همچنین بر اساس مقادیر شاخص GMER، مدل در مرحله دوم و چهارم در شبیه‌سازی حجم زه‌آب دچار بیش‌برآورد شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷) به نظر می‌رسد مدل در تخلیه روزهای آخر دچار بیش‌برآوردی زیادتری شده که علت آن را می‌توان ثابت بودن هدایت هیدرولیکی خاک و سایر خصوصیات تأثیرگذار خاک مانند پارامترهای معلم- ونگنوختن (پارامترهای شکل منحنی رطوبتی شامل n و α) در طول دوره باز بودن زهکش دانست. این در حالی است که در زمان باز بودن زهکش به دلیل مقادیر بالای رس خاک، تغییرات محسوسی در خصوصیات هیدرولیکی و فیزیکی خاک روی می‌دهد. تأثیر نپذیرفتن نتایج شبیه‌سازی مراحل اول و سوم از این نوع تغییرات به دلیل غرقاب بودن این دو مرحله و عدم تغییرات محسوس خصوصیات هیدرولیکی خاک ناشی از تغییرات رطوبتی خاک است.

جدول۴ - نتایج شاخص‌های برآورد خطا در چهار مرحله شبیه‌سازی

شماره مرحله	nRMSE (%)	RMSE	MAE	GMER (-)
مرحله اول	۱۶/۵۷	۸۳/۶۸ (میلی‌گرم بر لیتر)	۷۴/۲۸ (میلی‌گرم بر لیتر)	۱/۰۳
مرحله دوم	۵/۸۹	۰/۰۱۶ (سانتی‌متر مکعب)	۰/۰۱۰۸ (سانتی‌متر مکعب)	۱/۴۴
مرحله سوم	۱۵/۰۶	۴۲/۸۷ (میلی‌گرم بر لیتر)	۳۴/۳۴ (میلی‌گرم بر لیتر)	۰/۹۷
مرحله چهارم	۶/۸۰	۰/۰۱۲ (سانتی‌متر مکعب)	۰/۰۱۰۵ (سانتی‌متر مکعب)	۲/۷۸

در شکل (۵)، روند تغییرات مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی غلظت کل املاح خاک نسبت به زمان در سه عمق ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 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 فرآیند 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 باشد به‌گونه‌ای 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. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی غلظت کل املاح در سه عمق مورد بررسی نشان می‌دهد که پس از گذشت ۱۶ روز غلظت کل املاح در عمق ۷۰ سانتی‌متر با غلظت کل املاح در عمق ۵۰ سانتی‌متر برابر شد. صرف زمان بیش‌تر از سه روز برای حرکت املاح از عمق ۵۰ به ۷۰ سانتی‌متر (با توجه به هدایت هیدرولیکی اشباع ۷/۴ سانتی‌متر بر روز) نشان‌دهنده اهمیت نقش فرآیند پخشیدگی مولکولی در انتقال املاح تحت شرایط غرقاب در مرحله قبل از زهکشی میان‌فصل است. این نتیجه به‌وسیله تحلیل حساسیت نیز تأییدشده است. مدت زمان برابری مقادیر مشاهده‌شده غلظت املاح در عمق‌های ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری، ۲۵ روز به‌دست آمد که بیشتر بودن مقدار آن نسبت به حالت شبیه‌سازی مدل، می‌تواند تحت تأثیر وضعیت کفه سخت باشد. علاوه‌براین محدودیت مدل در لحاظ نمودن تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای خاک و جریان‌های ترجیحی بر انتقال املاح می‌تواند دلیل تفاوت بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی مدل باشد.

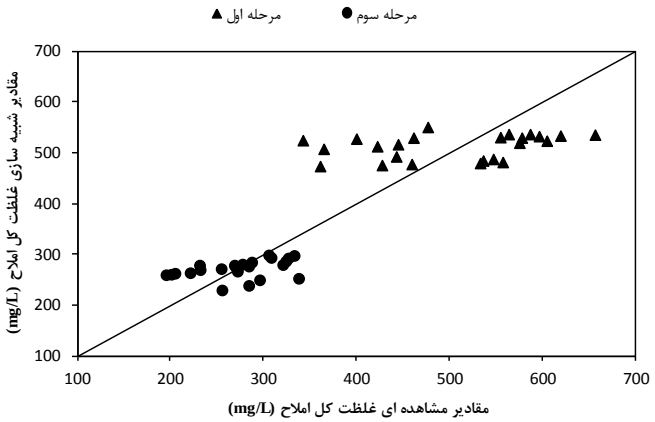
نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی در مرحله سوم پس از زهکشی میان‌فصل (بعد از روز ۴۰ام آزمایش) نشان داد که در ابتدای امر غلظت کل املاح در هر سه عمق نسبت به قبل از باز نمودن زهکش، کاهش داشت. نکته قابل‌توجه نزدیک شدن غلظت املاح در اعماق مختلف است که می‌توان دلیل آن را تأثیر زهکشی بر توزیع یکنواخت غلظت املاح در نیمرخ خاک دانست. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بعد از زهکشی میان‌فصل، با گذشت زمان و پر شدن 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 زهکش‌ها (حدود دو هفته اشباع مجدد پروفیل خاک به طول انجامید)، غلظت املاح حاصل از شبیه‌سازی مدل در دو عمق ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر با هم برابر شدند. این مدت زمان در مقادیر مشاهداتی غلظت کل املاح در عمق‌های ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر، ۲۸روز بود. طولانی‌تر بودن این مدت نسبت به مرحله اول می‌تواند 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 میان‌فصل باشد. افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در این مرحله (۱۰/۵۶ سانتی‌متر بر روز) نسبت به مرحله اول نیز نشان از تغییر در ابعاد خلل و فرج دارد. مدل توانست در مرحله بعد از زهکشی میان‌فصل تطابق بهتری با مقادیر مشاهداتی غلظت کل املاح ایجاد کند که دلیل آن را می‌توان در تأثیر گذشت زمان و تغییر خصوصیات بخش شکسته‌شده کفه سخت بالای زهکش و مشابه شدن آن با سایر قسمت‌های خاک این لایه دانست. نتایج نشان داد که پس از بستن زهکش غلظت کل املاح مشاهداتی به ترتیب ۱۳، ۲۵ و ۱۸ درصد در عمق‌های ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری نسبت به زمان افزایش نشان داد این افزایش در نتایج شبیه‌سازی مدل به ترتیب ۷، ۲۱ و ۸ درصد بود.



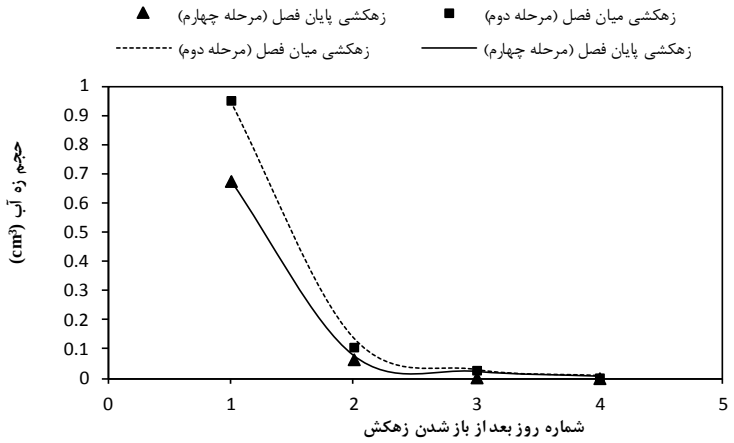
شکل ۵- روند مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای غلظت کل املاح نسبت به زمان در نیمرخ خاک در اعماق الف) ۴۰، ب) ۵۰ و ج) ۷۰ سانتی‌متری از سطح خاک

شکل (۶) مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای غلظت کل املاح در نیمرخ خاک در مراحل اول و سوم شبیه‌سازی فرآیند زهکشی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اگرچه در برخی مراحل شبیه‌سازی تفاوت میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد، اما مطابق با مقادیر شاخص‌های آماری، دقت شبیه‌سازی مدل برای فرآیند پیچیده زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل در اراضی شالیزاری قابل‌قبول است. همچنین مقایسه روند شبیه‌سازی و مقادیر مشاهده شده حجم زه‌آب خروجی در زهکشی میان فصل و پایان فصل (شکل ۷) نشان می‌دهد که مدل توانسته است به خوبی روند خروج زه‌آب را شبیه‌سازی

کند، هرچند بیش‌برآوردی در روزهای آخر به خصوص در مرحله چهار بیش‌تر از مرحله دو است که می‌تواند به خوبی تأثیرگذاری تغییرات خصوصیات هیدرولیکی خاک بر حرکت آب در خاک و تخلیه آن توسط زهکش نشان دهد.



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی غلظت کل املاح خاک (میلی‌گرم بر لیتر) در اعماق مختلف در مراحل اول و سوم شبیه‌سازی زهکشی



شکل ۷- مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی حجم زه‌آب خروجی در مراحل دوم و چهارم

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش از نقش مؤثر مدل در فهم فرآیند پیچیده زهکشی در اراضی شالیزاری حکایت دارد. نتایج نشان داد در شرایط باز و بسته شدن زهکش زیرزمینی در فصل رشد برنج (زهکشی میان‌فصل)، پارامترهای ضریب اعوجاج و پخشیدگی مولکولی عوامل اصلی حرکت املاح در خاک و حرکت به سمت زهکش هستند. افزایش هدایت هیدرولیکی نیز پس از زهکشی میان‌فصل نشان‌دهنده تأثیرگذار بودن زهکشی بر ساختمان خاک است. همچنین، تعیین پارامترهای انتقال املاح و هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از الگوریتم ژنتیک یا هر روش حل عمومی مدل بهینه‌سازی طی فرآیند حداقل‌سازی فاصله بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی مدل در افزایش واسنجی مدل توصیه می‌شود. نتایج شاخص‌های آماری نشان از قابلیت به ترتیب بخش شوری و هیدرولوژی مدل DRAINMOD در شبیه‌سازی شوری پروفیل خاک و حجم زه‌آب داشت. دقت شبیه‌سازی مدل در شبیه‌سازی شوری پروفیل خاک در مرحله سوم (بعد از زهکشی میان‌فصل) بیش‌تر از مرحله اول (قبل از زهکشی میان‌فصل) بود.

REFERENCES

Alizadeh, M. Afrasiab, P. Yazdani, M.R. Liaghat, A.M. and Delbari, M. (2016). The Effect of Depth and Space Subsurface Drainage on Paddy Field Drainage Intensity (Case Study: Fields of Rice Research Institute of Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(4), 219-233.

Amin Salehi, A. Navabian, M. Esmaeili Varaki, M. and Pirmoradian, N. (2017). Evaluation of HYDRUS-2D model to simulate the loss of nitrate in subsurface controlled drainage in a physical model scale of paddy fields. *Paddy and Water*

Environment, 15, 433–442.

Bannayan, M. and Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*, 111(3), 290-302.

Breve, M.A. Skaggs, R.W. Parsons, J.E. and Gilliam, J.W. (1997). DRAINMOD-N, A nitrogen model for artificially drained soils. *Transaction of the ASAE*, 40(4), 1067-1075.

Caton, B.P. Foin, T.C. and Hill, J.E. (1999). A plant growth model for integrated weed management in direct seeded rice. II. Validation testing of water-depth effects and monoculture growth. *Field Crop Research*, 62: 145–155.

Farmaha, B.S. (2014). Evaluating Animo model for predicting nitrogen leaching in rice and wheat. *Arid Land Research and Management*, 28, 25-35.

Gauch, H.G. Hwang, J.T.G. and Fick, G.W. (2003). Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agronomy Journal*, 95, 1442–1446.

Ines, A.V.M. and Droogers, P. (2002). Inverse modeling in estimating soil hydraulic functions a genetic algorithm approach. *Hydrology Earth System Science*, 6(1), 49-65.

Jamieson, P.D. Porter, J.R. and Wilson, D.R. (1991). A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zeland. *Field Crops Research*, 27(4), 337-350.

Kale, A. (2011). Field-evaluation of DRAINMOD-S for predicting soil and drainage water salinity under semi-arid conditions in Turkey. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 26-40.

Kandil, H.M. Skaggs, R.W. Abdel Dayem, S. Aiad, Y. and Gilliam, J.W. (1992). DRAINMOD-S: Water management model for irrigated arid lands. 1. Theories, and Tests, presented at the *ASAE international winter meeting*, Paper No. 922566.

Nazari, B. Liaghat, A. Parsinezhad, M. and Naseri, A. (2008). Optimizing subsurface drainage installation depth consideration economic and environmental. In: Proceedings of *5th Workshop on Drainage and Environmental Engineering*, 6 Nov., Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, Tehran, Iran, pp. 107-122. (In Farsi)

Noory, H. Abyane, H.Z. Noory, H. and Liaghat, A.M. (2010). Application of DRAINMOD-N model for predicting Nitrate-N in paddy rice fields under controlled drainage in a costal region of Iran. *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)*, June 13-17, Québec City, Canada.

Okhovat, M. (1997). Rice planting, management and harvest. Iran: *Farabi*. (In Farsi)

Ramezani, M., Jamali, B. and Asgharzade, M. A. (2011). Sensitivity analysis of Drainmod model of input parameters. In: Proceedings of 3rd Irrigation and Drainage Network Management National Conference, 20-21 Feb. Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, pp. 1-8. (In Farsi)

Samipoor, F. Mohammadi, K. Mahdian, M. and Naseri, A. (2011). Evaluating DRAINMOD and SWAP drainage models to determining optimal depth and spacing using crop yield performance and drainage effluent. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(3), 375-386. (In Farsi)

Skaggs, R.W. (1980). DRAINMOD reference report. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service.

Skaggs, R.W. (1982). Field evaluation of a water management simulation model, DRAINMOD. *Transactions of the ASAE*, 25(3), 666-674.

Torkzaban, S. (2000). Evaluation and calibration of DRAINMOD model under arid and semi-arid condition of Iran. *M.Sc. dissertation, University of Tehran*, Tehran. (In Farsi)

Wahba, M.A.S. and Christen, E. W. (2006). Modeling subsurface drainage for salt load management in southeastern Australia. *Irrigation and Drainage Systems*, 20(2), 267-283.

Wahba, M.A.S. (2016). Assessment of options for the sustainable use of agricultural drainage water for irrigation in Egypt by simulation modeling. *Irrigation and Drainage*, Online Version of Record published before inclusion in an issue, Wiley Online Library.

Yufu, T. Sen, D. Yuguang, Zh. Changyu, W. and Jinsong, W. (2013). Improvement effects of subsurface pipe with different spacing on sodic-alkali soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(12), 145-153.

Zare Abyaneh, H. Noori, H. Liaghat, A.M. Karimi, V. and Noori H. (2011). Calibration of nitrate leaching and water table fluctuation in paddy rice field by DRAINMOD-N software. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*,15(57), 49-60. (In Farsi)