

شبیه‌سازی کیفیت و کمیت زه‌آب خروجی زهکش‌های زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم

جواد جعفری^{۱*}، امیر حسین ناظمی^۲، سید علی اشرف صدرالدینی^۳ و حامد نوذری^۴

چکیده

در بسیاری از مناطق آبیاری، سطح ایستابی کم عمق باعث ایجاد مشکلات ماندابی و شوری می‌شود که برای کنترل این وضعیت، از سامانه زهکش‌های زیرزمینی استفاده می‌گردد. در اکثر مواقع این زهکش‌ها مقدار زیادی از آب و نمک را به محیط تخلیه می‌کنند که برای جلوگیری از این حالت، لازم است زه‌آب‌ها را مدیریت کرد. پژوهش حاضر روی یک مدل فیزیکی و برای فاصله‌های ۱/۴، ۱ و ۰/۶ متر و عمق‌های ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ متری لوله‌های زهکشی انجام گرفت. اندازه‌گیری از دبی خروجی، شوری زه‌آب، شوری آب زیرزمینی و تراز سطح ایستابی نسبت به زمان انجام شد. سپس با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم که یک روش شبیه‌سازی به صورت شی‌گرا و مبتنی بر روابط بازخورد است، کیفیت و کمیت زه‌آب خروجی، کیفیت آب زیرزمینی و تراز سطح ایستابی نسبت به زمان شبیه‌سازی شد. اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد و ضریب همبستگی برای دبی خروجی، شوری زه‌آب، تراز سطح ایستابی و شوری آب زیرزمینی حالت آزمایشی (فاصله زهکش‌ها: ۱/۴ متر و عمق: ۰/۴ متر) به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۹۲، ۰/۹۸ و ۰/۹۷ به دست آمد. همچنین مقادیر شاخص آماری RMSE برای پارامترهای فوق به ترتیب برابر با ۰/۱۸۷۵ میلی‌متر بر دقیقه، ۰/۱۶۸۴ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۰۸۱ متر و ۰/۰۸۲۵ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد که این امر نشان می‌دهد نتایج شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردارند. بررسی تجمعی کمیت و کیفیت زه‌آب خروجی از زهکش‌ها نشان داد که با افزایش عمق و فاصله زهکش‌ها، حجم و مقدار نمک خروجی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پویایی سیستم، زهکشی زیرزمینی، کیفیت و کمیت زه‌آب، مدل، شبیه‌سازی.

ارجاع: جعفری ج. ناظمی ا. ح. اشرف صدرالدینی س. ع. و نوذری ح. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی کیفیت و کمیت زه‌آب خروجی زهکش‌های زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۱-۹.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

* نویسنده مسئول: jafari88@ms.tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۶

مقدمه

زهکشی اراضی، از اقداماتی است که علاوه بر افزایش عملکرد، استفاده پایدار اراضی را تضمین می‌کند. نگرش سنتی حاکم بر طراحی سیستم‌های زهکشی، هدف زهکشی را منحصر به افزایش عملکرد گیاه و بهبود شرایط محیط رشد کرده است و آثار زیست‌محیطی طرح‌های زهکشی را بررسی نمی‌کند. امروزه این نگرش جایگاه خود را از دست داده است و در نگرش جدید، علاوه بر اهداف کشاورزی و تولیدی، اهداف زیست‌محیطی نیز در طرح‌های زهکشی بررسی می‌شوند. دفع مناسب زه‌آب‌های حاصل از زهکشی اراضی کشاورزی که معمولاً کیفیت نامطلوبی دارند، بسیار مشکل است. دشواری و حساسیت موضوع با وجود دو هدف هم‌زمان افزایش عملکرد و حفظ محیط‌زیست دو چندان می‌شود (ماگنورا و گارسیا، ۱۹۹۷). برای کنترل سطح ایستابی و شوری در اراضی فاریاب، زهکش زیرزمینی به کار گرفته می‌شود و کیفیت زه‌آب خروجی از این زهکش‌ها به کیفیت آب آبیاری، نهاده‌های کشاورزی (کود، سم و آفت‌کش‌ها) و کیفیت آب زیرزمینی بستگی دارد. عمق و فاصله زهکش نیز به مقدار و کیفیت زه‌آب تولید شده مؤثر هستند؛ به گونه‌ای که زه‌آب زهکش‌های عمیق‌تر نسبت به زهکش‌های کم‌عمق از کمیت بیشتر و کیفیت پایین‌تری برخوردار است (آیاز و همکاران، ۲۰۰۶). پژوهش‌گران با بهره‌گیری از مدل DRAINMOD-S تأثیر دو برابر کردن فاصله زهکش‌ها با بستن یک در میان زهکش‌ها و تغییر عمق زهکش با نصب سازه‌های کنترل را بررسی کردند که نتایج حاکی از کاهش حجم زه‌آب و نیاز آبی بدون کاهش محصول بود (وهبا و همکاران، ۲۰۰۵). در شرایط تغذیه ماندگار و غیرماندگار، شوری زه‌آب خروجی از زهکش‌ها با افزایش فاصله و عمق زهکش‌ها افزایش می‌یابد (گریسمر، ۱۹۹۳). پذیرا و همکاران (۲۰۱۰) کاهش عمق نصب زهکش را برای بهبود کیفیت زه‌آب خروجی از زهکش مؤثر دانستند. اصلانی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل آزمایشگاهی (عمق زهکش‌ها ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، و ۰/۴ متر از سطح خاک و فواصل ۰/۶، ۱ و ۱/۴ متری بین زهکش‌ها) و بر اساس کیفیت زه‌آب خروجی، عمق و فاصله مناسب زهکش‌های زیرزمینی را برآورد کردند و به این نتیجه رسیدند که عمق و فاصله زهکش‌ها، بر مقدار و کیفیت زه‌آب تولید شده مؤثر هستند و با افزایش عمق و فاصله زهکش‌ها، زه‌آب

شورتر و pH آن افزایش می‌یابد. محجوبی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی روی زهکش‌های کشت و صنعت امام خمینی استان خوزستان، گفتند با کنترل سطح ایستابی، ضریب زهکشی و حجم زه‌آب خروجی کاهش می‌یابد. برای اعمال مدیریت صحیح روی زه‌آب‌های تولید شده، باید کمیت و کیفیت آنها در حین انجام اعمال مدیریتی بررسی و تعیین شود. امروزه به دلیل آسانی و نیاز نداشتن به هزینه‌های کلان از روش‌های شبیه‌سازی و به کمک مدل‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، پویایی سیستم^۱ است که از قدرتمندترین و بصری‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی است. این روش را ابتدا فارستر در سال ۱۹۶۱ برای درک بهتر مسایل استراتژی در سیستم‌های دینامیکی پیچیده ابداع کرد. مرجع مدل‌های که با این روش ساخته می‌شوند، با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار پویایی سیستم‌ها در طول زمان رهنمون می‌کنند. محدوده‌های کاربردی این روش بسیار وسیع است و به ویژه بر کاربردهای آن در مسایل اجتماعی و اقتصادی تأکید بسیار می‌شود. در سال‌های اخیر با افزایش تمایل به مدل نمودن سیستم‌ها در پژوهش‌های مهندسی آب از این روش به‌عنوان یک روش تحلیل تصمیم در مدیریت کم آبی استفاده شده است (فلچر، ۱۹۹۸). برای نمونه با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، مدیریت سیلاب در مخزن شلموس کانادا مدل‌سازی شده است (احمد و سیمونویچ، ۲۰۰۰). همچنین کارهای متعدد دیگری در زمینه استفاده از این روش در مدل‌سازی جامع منابع آب انجام شده است (سیمونویچ، ۲۰۰۲). صادقی و همکاران (۱۳۸۳) با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، سیستم مخازن چاه‌نیمه (یکی از منابع آبی منطقه) در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان را مدل کردند. نوذری و لیاقت (۲۰۱۴) با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم، عملکرد یک سیستم زهکشی در شرایط غیرماندگار را مطالعه و تأثیر هر یک از عوامل مؤثر بر مدیریت تراز سطح ایستابی، مقدار خروجی زه‌آب، شوری زه‌آب و شوری آب زیرزمینی را به‌صورت روزانه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که از قابلیت‌های مدل فوق علاوه بر ارائه تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به

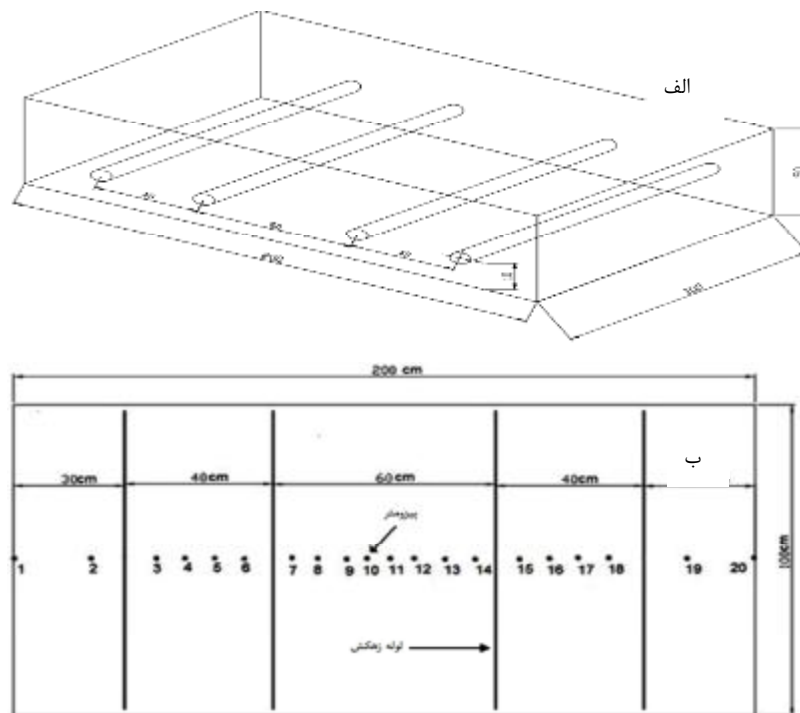
استفاده شد. مدل فیزیکی محفظه‌ای مکعب مستطیلی شکل فلزی- شیشه‌ای با ابعاد، طول ۲ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۵ متر است. برای تعیین موقعیت سطح ایستابی در خاک بیست عدد پیژومتر در کف مدل قرار داده شده بود. چهار لوله فلزی مشبک با قطر ۲ سانتی‌متر و به طول ۸۰ سانتی‌متر به‌عنوان لوله‌های زهکش در مدل تعبیه شد. در انجام آزمایش‌ها برای ایجاد تقارن و یکسانی فاصله زهکش‌ها، دو عدد از این لوله‌ها توسط شیر فلکه‌های تعبیه شده در مدل بسته می‌شد. موقعیت قرارگیری لوله‌ها و پیژومترها در شکل ۱ آورده شده است.

افزایش سرعت ایجاد یک مدل، سادگی اصلاح مدل در واکنش به تغییرات سیستم و امکان توسعه گروهی مدل‌ها اشاره کرد. در این پژوهش کمیت و کیفیت زه‌آب خروجی از زهکش‌ها نسبت به زمان با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم شبیه‌سازی شده و با داده‌های مدل آزمایشگاهی مقایسه و همچنین تأثیر تغییر عمق نصب لوله‌های زهکش و فواصل بین زهکش‌ها در حجم زه‌آب و مقدار نمک خروجی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی

برای انجام آزمایش‌ها، در این پژوهش از مدل فیزیکی آزمایشگاه منابع آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز



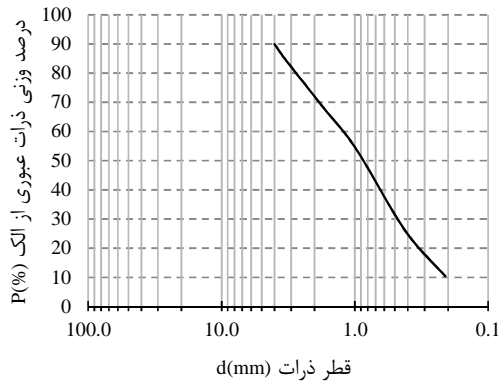
شکل ۱- شماتیک مدل فیزیکی (ابعاد بر حسب سانتی‌متر) (الف) لوله‌های مدل فیزیکی (ب) پلان مدل فیزیکی

بررسی تغییرات سطح ایستابی و جریان آب به سمت زهکش‌ها، از خاک با بافت شن درشت که دارای هدایت هیدرولیکی بالایی بود، استفاده شد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات خاک مورد استفاده شده در آزمایش به‌ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ آورده شده است.

برای برداشت داده‌های مورد نیاز ابتدا لوله‌های زهکش در ارتفاع ۰/۱ متری از کف مدل فیزیکی قرار داده و سپس خاک با تراکم یکنواختی تا عمق ۰/۵ متر در مدل ریخته

آزمایش‌ها برای سه عمق ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲ متری از سطح خاک و برای سه فاصله ۱/۴، ۱ و ۰/۶ متری بین زهکش‌ها انجام شد. در قسمت فوقانی مدل، یک سیستم آبیاری بارانی شامل چهار لایترال و هشت آبیاز اسپریر در ارتفاع ۰/۶ متری از سطح خاک قرار داده شده بود که از آن‌ها برای تولید بارش و انجام عمل آبیاری استفاده گردید؛ به طوری که متوسط دبی آب آبیاری ۲۰۰ لیتر در ساعت با شوری ۰/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. برای

که به وسیله جریان‌های شعاعی و از زیر زهکش وارد آن می‌شود که به ترتیب دو ناحیه غیراشباع و اشباع به وجود می‌آید که هر کدام معادلات خاص خود را دارند (نوذری و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول ۱- مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

مقدار	پارامتر
۲۵/۶	رطوبت جرمی (درصد)
۳۴/۵	رطوبت حجمی (درصد)
۱/۳۴۷	چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
۲/۰۵	چگالی حقیقی خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
۳۴/۵	تخلخل (درصد)
۶/۶	ظرفیت زراعی (θ_{fc})
۳/۵۴	نقطه پژمردگی دائم (θ_{pwp})

ناحیه بالای تراز اولیه آب زیرزمینی

برای بررسی تغییرات ذخیره آب در ناحیه غیراشباع از روش بیلان آبی استفاده می‌شود. با توجه به این که در ناحیه بالای تراز اولیه سطح آب زیرزمینی بخشی از لایه مذکور غیراشباع است؛ لذا از معادله (۱) استفاده می‌شود (نوذری و همکاران، ۱۳۸۸):

$$S_i = S_{i-1} + I_i + R_i + CR_i - ET_{ai} - P_i \quad (1)$$

در این معادله i گام زمانی مورد بررسی و $i-1$ گام زمانی پیشین آن است، S حجم آب ذخیره شده در هر لایه، I آبیاری، R میزان بارش، CR میزان جریان رو به بالا از تراز سطح آب، ET_a مقدار تبخیر و تعرق و P میزان نفوذ عمقی است. برای شبیه‌سازی نمک در ناحیه غیراشباع از روش بیلان جرمی (معادله (۲)) استفاده می‌شود (نوذری و همکاران، ۱۳۸۸):

$$D_{iw} \cdot EC_{iw} + P \cdot EC_p + D_g \cdot EC_g = d_p \cdot EC_p + \Delta EC \quad (2)$$

شد، برای ایجاد سطح ایستابی اولیه آب زیرزمینی با متوسط شوری $1/7$ دسی‌زیمنس بر متر، از مخازن جانبی با ابعاد $100 \times 20 \times 50$ سانتی‌متر که هر کدام دارای سه سطح تغذیه بودند، استفاده گردید. این سطوح تغذیه به وسیله توری‌های فلزی برای جلوگیری از عبور خاک پوشانده شده بودند. در داخل این مخازن دو لوله به ارتفاع $0/5$ متر از کف مدل قرار داده شده بود که یکی از آن‌ها نقش تغذیه و دیگری نقش تخلیه آب از مخزن را بر عهده داشت. با تنظیم ارتفاع لوله تخلیه، سطح ایستابی زیرزمینی دلخواه، ایجاد می‌شد. برای هر دو مخزن آب زیرزمینی و آب آبیاری، دو پمپ و دو دبی‌سنج مجزا وجود داشت. برای ایجاد اختلاف قابل توجه بین کیفیت آب آبیاری و آب زیرزمینی به مخزن آب زیرزمینی آن قدر $NaCl$ اضافه شد تا متوسط $1/7$ دسی‌زیمنس بر متر (محدوده قابل اندازه‌گیری با دستگاه EC متر) به دست آمد. برای ایجاد فواصل دلخواه، در هر بار آزمایش از چهار لوله زهکش تنها دو لوله فعال بود و خروجی دو لوله دیگر بسته می‌شد. سطح ایستابی اولیه در تراز لوله‌های زهکش قرار داشت و زهکشی هم‌زمان با عمل آبیاری انجام می‌شد. تراز سطح ایستابی، دبی خروجی و شوری زه‌آب در فواصل زمانی ۵ دقیقه ثبت شدند. همچنین در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه آب داخل پیژومترهای نزدیک به لوله‌های زهکش را در ظرف نمونه‌برداری ریخته، شوری آن‌ها اندازه‌گیری و به‌عنوان شوری آب زیرزمینی ثبت شد. با اتمام آزمایش برای عمق $0/4$ متری زهکش‌ها از سطح خاک، آزمایش‌ها برای دو عمق $0/3$ و $0/2$ متری با حفر ترانشه و تغییر عمق لوله زهکش تکرار شدند.

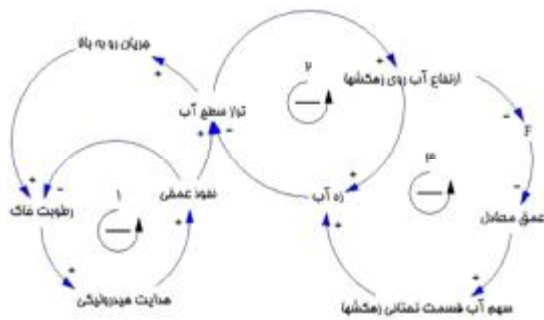
معادلات حاکم

زه‌آب تولید شده ناشی از دو دسته جریان ورودی به زهکش است که این دو دسته عبارتند از: (۱) جریان‌های عمودی و افقی ناشی از تلفات نفوذ عمقی آب آبیاری به طرف زهکش‌ها و (۲) جریان‌های شعاعی زیرزمینی به طرف زهکش‌ها که این مورد نیز ناشی از ورود تلفات آب آبیاری به آب‌های زیرزمینی است. بنابراین نمک‌های ورودی به زهکش نیز از دو منبع هستند: (۱) نمک‌های موجود در آب آبیاری و خاک قسمت فوقانی زهکش که به وسیله جریان‌های عمودی و افقی ناشی از تلفات نفوذ وارد زهکش می‌شود و (۲) نمک‌های موجود در آب زیرزمینی

Vensim که از محیط‌های مناسب برای ارزیابی دینامیکی سیستم‌ها است. این نرم‌افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود رفتار سیستم را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد (پایمزد و همکاران، ۱۳۸۹).

حلقه‌های علت و معلولی

برای نمایش تعاملات و بازخوردهای میان اجزا از ابزاری مرسوم به حلقه‌های علت و معلولی استفاده می‌شود. این حلقه‌ها با به تصویر کشیدن روابط بین متغیرها و ساختار درونی سیستم، به مدیر در فهم ساختار مسأله و نیز برقراری ارتباط با آن کمک می‌کند. شکل ۳ حلقه علی و معلولی زهکشی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- حلقه‌های علی و معلولی مربوط به زهکشی

دید می‌شود که در حلقه شماره یک با افزایش زه‌آب، تراز سطح آب و جریان رو به بالا کاهش می‌یابد که این امر باعث کم شدن رطوبت ناحیه غیراشباع می‌شود، هدایت هیدرولیکی این ناحیه کاهش می‌یابد و به دنبال آن، نفوذ عمقی کم می‌شود و عمق آب روی زهکش کاهش می‌یابد؛ در نتیجه باعث کاهش زه‌آب می‌شود و یک حلقه تعادلی تشکیل می‌دهد. در حلقه شماره دو، افزایش زه‌آب، تراز سطح ایستایی و ارتفاع آب روی زهکش‌ها را کم می‌کند و به کاهش زه‌آب منتهی می‌شود. از طرفی کاهش در ارتفاع آب بالای زهکش‌ها، ضریب عمق معادل را افزایش و عمق معادل را کاهش می‌دهد که این موضوع باعث کم شدن سهم آب شرکت‌کننده از قسمت تحتانی زهکش‌ها می‌شود و دوباره زه‌آب کاهش می‌یابد. بعد از رسم نمودارهای علی و معلولی و برای اجرای مدل، لازم است نمودارهای حالت و جریان توسعه داده شوند. می‌توان گفت در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن تصمیم‌ها اعمال می‌شود.

در این معادله، D_g ، D_p ، D_{iw} و d_p به ترتیب مقدار آب آبیاری، آب حاصل از بارندگی، آبی که از سفره زیرزمینی وارد منطقه ریشه می‌شود و مقدار نفوذ عمقی و خارج شده از منطقه ریشه و EC_p ، EC_g ، EC_{iw} و EC_{dp} به ترتیب غلظت نمک در آب آبیاری، بارندگی، آب زیرزمینی و نفوذ عمقی از ناحیه ریشه و ΔEC تغییر مقدار نمک در محلول خاک در منطقه ریشه است.

ناحیه اشباع

در این قسمت می‌توان سهم زه‌آب قسمت فوقانی و تحتانی ورودی به زهکش را با استفاده از فرمول هوخهات (معادله (۳)) به دست آورد (علیزاده، ۱۳۸۴):

$$q = \frac{8K_2 h \cdot d_e}{L^2} + \frac{4K_1 h^2}{L^2} \quad (3)$$

در این معادله q شدت جریان ورودی به زهکش‌ها در واحد سطح یا ضریب زهکشی (میلی‌متر در روز)، h با آبی بین دو زهکش، K_1 و K_2 به ترتیب ضرایب هدایت هیدرولیکی در لایه فوقانی و تحتانی تراز زهکش‌ها (متر بر روز)، L فاصله بین زهکش‌ها (متر) و d_e عمق معادل (متر) لایه کم نفوذ است. برای بررسی انتقال نمک در ناحیه اشباع از معادله انتقال توده‌ای- پخشیدگی استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -q_y \frac{\partial C}{\partial y} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (4)$$

در این معادله C غلظت نمک‌ها، q_y میانگین شدت جریان در جهت y و D ضریب پخشیدگی نمک است.

مدل شبیه‌سازی

اساس روش پویایی سیستم، بر پایه فرضیه فرآیندهای بازخوردی که متأثر از رفتار گذشته خود است و از نتایج آن در آینده استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر برای تبدیل کردن شرایط موجود در یک پدیده به شرایط مطلوب، تصمیمی گرفته می‌شود و با اجرا کردن آن تصمیم، شرایط قبلی تغییر می‌یابد و باید تصمیم جدیدی نسبت به شرایط جدید گرفته شود که این حالت، بازخورد تصمیم قبلی است. در هر سیستمی دو نوع ساختار بازخوردی بنیادی وجود دارد: بازخوردهای مثبت و منفی. بازخوردهای مثبت منجر به تقویت هر آن‌چه در سیستم رخ می‌دهد، می‌شود و بازخوردهای منفی در جهت تعادل اتفاقات داخلی سیستم رفتار می‌کند (وینز و همکاران، ۲۰۰۹).

در این پژوهش ابزار مدل‌سازی، محیط برنامه‌نویسی

ارزیابی مدل

برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، از دو آماره ضریب همبستگی (R^2) و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. عوامل ذکر شده در معادلات زیر آورده شده است (رضایی، ۱۳۸۶):

$$R^2 = \frac{[\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})]^2}{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2} \quad (۵)$$

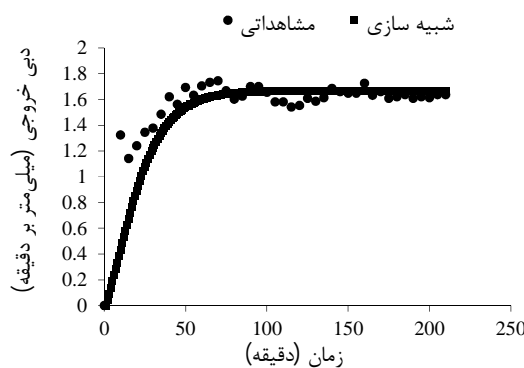
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(X - Y)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{\sum|X - Y|}{n} \quad (۷)$$

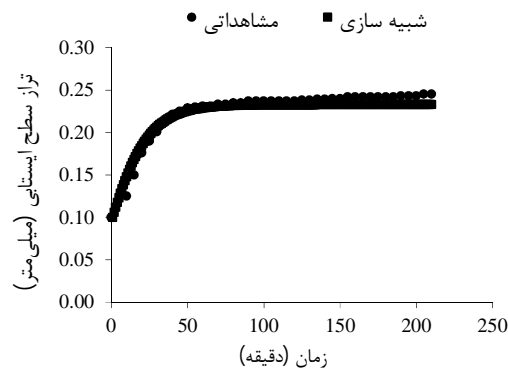
در معادلات بالا X مقدار شبیه‌سازی شده با مدل، Y مقدار مشاهداتی در مدل آزمایشگاهی، \bar{X} و \bar{Y} به ترتیب میانگین مقادیر فوق و n تعداد داده‌ها است.

نتایج و بحث

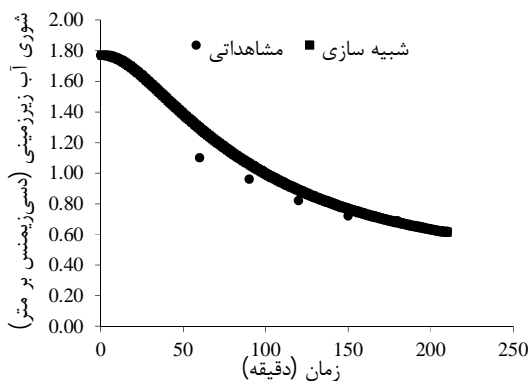
برای بررسی عملکرد زهکشی، آزمایش‌ها روی سطح ایستابی، دبی خروجی، شوری زه‌آب و شوری آب زیرزمینی انجام شد. نتایج مربوط به استقرار لوله‌های زهکش در عمق ۰/۴ متری از سطح خاک و فاصله ۱/۴ متری بین زهکش‌ها که یکی از حالت‌های آزمایش بود، به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۴ تا ۷ آورده شده است.



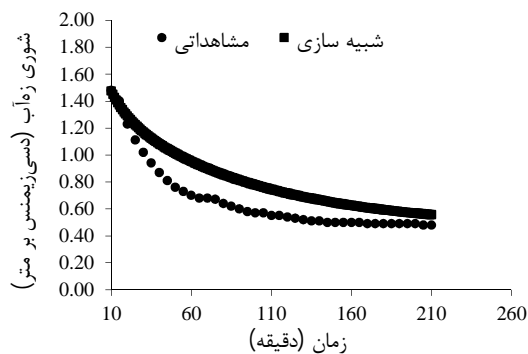
شکل ۵- تغییرات دبی زه‌آب نسبت به زمان برای زهکش‌های با فاصله ۱/۴ متر و عمق ۰/۴ متر



شکل ۶- تغییرات تراز سطح ایستابی نسبت به زمان برای زهکش‌های با فاصله ۱/۴ متر و عمق ۰/۴ متر



شکل ۷- تغییرات شوری آب زیرزمینی نسبت به زمان برای زهکش‌های با فاصله ۱/۴ متر و عمق ۰/۴ متر



شکل ۸- تغییرات شوری زه‌آب نسبت به زمان برای زهکش‌های با فاصله ۱/۴ متر و عمق ۰/۴ متر

نسبت به زمان افزایش دارد و با ماندگار شدن سطح ایستابی و یا کاهش نوسانات آن، به حالت ماندگار می‌رسد. شوری زه‌آب و شوری آب زیرزمینی در طول آزمایش کاهش می‌یابد و به مقدار شوری آب آبیاری (۰/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر) نزدیک می‌شوند. دلیل این امر

با توجه به شکل‌های ۴ تا ۷ دیده می‌شود که روند شبیه‌سازی نیز مشابه روند داده‌های آزمایشگاهی است و تطابق خوبی بین نتایج مدل و داده‌های مشاهده‌ای وجود دارد. تراز سطح ایستابی نسبت به زمان افزایش می‌یابد و در حالت ماندگار ثابت می‌ماند. دبی خروجی از زهکش‌ها

زه‌آب نسبت به سایر نتایج، دقت پایینی دارد. بالا بودن مقدار RMSE در شوری زه‌آب به دلیل برآورد کم جریان شعاعی است که از عوامل اصلی ایجاد زه‌آب شور در مواقع وجود آب زیرزمینی شور محسوب می‌شود و دلیل بالا بودن این پارامتر در دبی خروجی، نامتقارنی جریان آب و نمک در مدل آزمایشگاهی است، به این صورت که مدل آزمایشگاهی اجازه ایجاد فواصل منظم را نمی‌داد و با انتخاب این سه فاصله، تقارن جریان در دو طرف لوله‌های زهکش به هم می‌خورد.

اختلاط آب آبیاری با شوری کم با آب زیرزمینی است که شوری بالاتری دارد. شوری زه‌آب خروجی نیز به دنبال کاهش شوری آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد، برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی از سه شاخص آماری ضریب همبستگی، میانگین مجذور مربعات خطا و میانگین خطای مطلق استفاده شد که مقادیر مربوط به حالت استقرار (۰/۴) متر عمق زهکش از سطح خاک و فاصله بین زهکش (۱/۴ متر) در جدول ۲ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج مربوط به دبی خروجی و شوری

جدول ۲- مقایسه نتایج آماری مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی

پارامترهای ارزیابی	دبی خروجی (میلی‌متر بر دقیقه)*	شوری زه‌آب (دسی‌زیمنس بر متر)	تراز سطح ایستابی (متر)	شوری آب زیرزمینی (دسی‌زیمنس بر متر)
R ²	۰/۷۵	۰/۹۲	۰/۹۸	۰/۹۷
RMSE	۰/۱۸۷۵	۰/۱۶۸۴	۰/۰۰۸۱	۰/۰۸۲۵
MAE	۰/۱۰۷۳	۰/۱۵۴۶	۰/۰۰۶۸	۰/۰۵۳۷

* واحدهای ذکر شده در جدول برای میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) می‌باشد.

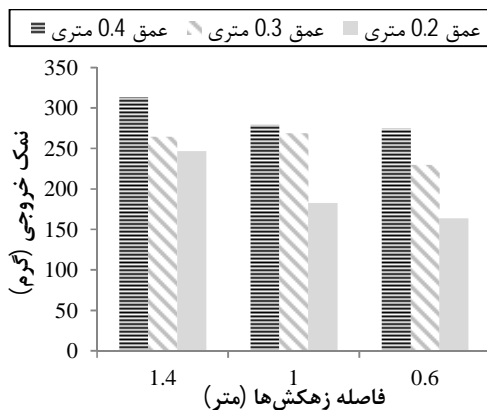
شده است. گفتنی است که برای تبدیل EC به مقدار نمک از معادله (۸) استفاده شده است.

$$TDS = 640 \times EC \quad (8)$$

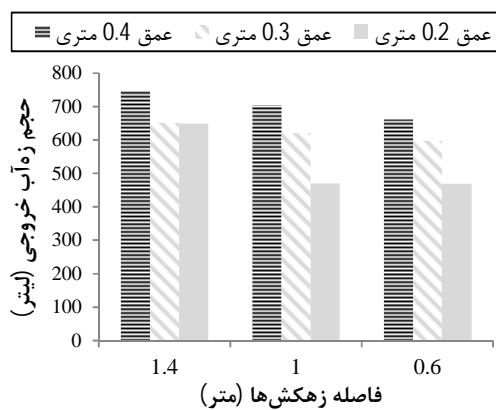
که در آن EC هدایت الکتریکی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و TDS باقی‌مانده خشک بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است.

حجم زه‌آب و مقدار نمک خروجی

همان‌گونه که گفته شد، آزمایش‌ها در سه عمق ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ متری از سطح خاک و در سه فاصله ۰/۶، ۱ و ۱/۴ متری بین زهکش‌ها انجام شد. حجم زه‌آب و مقدار EC زه‌آب خروجی برای بررسی تأثیر تغییر عمق و فاصله لوله‌های زهکشی بر کمیت و کیفیت زه‌آب، در هر کدام از استقرارها اندازه‌گیری شد که در شکل ۷ و ۸ نشان داده



شکل ۹- مقدار نمک خروجی در اسقرارهای مختلف زهکش‌ها



شکل ۸- حجم زه‌آب خروجی در اسقرارهای مختلف زهکش‌ها

و سهم آب زیرزمینی مشارکت‌کننده در زه‌آب خروجی افزایش می‌یابد که این امر باعث بالا رفتن شوری خروجی

با افزایش عمق و فاصله لوله‌های زهکش، طول و عمق مسیر خطوط جریان آب به سمت لوله‌های زهکش افزایش

- زاینده رود اصفهان). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱(۴): ۴۴-۵۲.
۳. رضایی ع. ۱۳۸۶. مفاهیم آمار و احتمالات. نشر مشهد. ۴۴۴ ص.
۴. صادقی ن. ابریشم‌چی ا. و تجریشی م. ۱۳۸۳. مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن به منظور کنترل سیلاب با استفاده از روش تحلیل دینامیک سیستم. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، ۲۲-۲۳ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
۵. علیزاده ا. ۱۳۸۴. زهکشی جدید. نشر دانشگاه امام رضا (ع). ۴۹۶ ص.
۶. محجوبی آ. هوشمند ع. ناصری ع. و جعفری س. ۱۳۹۲. اثر زهکشی کنترل شده بر روی کاهش ضریب زهکشی و حجم زه‌آب خروجی در مزارع نیشکر کشت و صنعت امام خمینی. نشریه آب و خاک. ۶(۲۷): ۱۱۳۳-۱۱۴۴.
۷. نوذری ح. لیاقت ع. و خیاط خلقی م. ۱۳۸۸. شبیه‌سازی حرکت آب و نمک‌ها در سامانه زهکشی زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۳): ۲۸-۳۹.

8. Ahmed S. and Simonovic S. P. 2000. System dynamics modelling of reservoir operations for flood management. J. Comp. Engrg. ASCE. 14(3): 190-198.
9. Ayars J. E. Christen E. W. Soppe R. W. and Meyer W. 2006. Resource potential of shallow ground for crop water use a review. Irrigation Science. 24: 147-160.
10. Fletcher E. 1998. The use of system dynamics as a decision water support tool for the management of scarce resources, First International Conference on New Information Technologies for Decision Making in Civil Engineering. October 11-13.
11. Forrester J. W. 1961. Industrial Dynamics. Cambridge, MA: MIT Press.
12. Grismer M. E. 1993. Subsurface drainage system design and drain water quality. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 119: 537-543.
13. Manguerra H. B. and Garcia L. A. 1997. Modeling flow and transport in drainage areas with shallow ground water. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 123(3): 185-193.
14. Nozari H. and Liaghat A. 2014. Simulation of Drainage Water Quantity and Quality

می‌شود. این افزایش در عمق و فاصله همچنین حجم ذخیره خاک روی لوله‌های زهکش را افزایش می‌دهد و باعث افزایش دبی زه‌آب می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت افزایش فاصله و عمق زهکش‌ها، به صورت تجمعی حجم و مقدار نمک خروجی را افزایش می‌دهند.

نتیجه‌گیری

نتایج مربوط به شبیه‌سازی دبی خروجی، شوری زه‌آب، نوسانات سطح ایستابی و شوری آب زیرزمینی نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی، از انطباق خوبی برخوردارند. تحلیل آماری بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی برای استقرار لوله‌های زهکشی در عمق ۰/۴ متری از سطح خاک و فاصله ۱/۴ متری بین زهکش‌ها با استفاده از ضریب همبستگی و میانگین مجذور مربعات خطا انجام شد که در آن ضریب تبیین دبی خروجی، شوری زه‌آب، تراز سطح ایستابی و شوری آب زیرزمینی به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۹۲، ۰/۹۸ و ۰/۹۷ به دست آمد که دقت خوبی را نشان می‌دهند. مقادیر مربوط به آمار میانگین مجذور مربعات خطا برای دبی خروجی، شوری زه‌آب، تراز سطح ایستابی و شوری آب زیرزمینی به ترتیب برابر با ۰/۱۸۷۵ میلی‌متر بر دقیقه، ۰/۱۶۸۴ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۰۰۸۱ متر، ۰/۰۸۲۵ دسی‌زیمنس بر متر و همچنین مقادیر میانگین خطای مطلق به ترتیب ۰/۱۰۷۳ میلی‌متر بر دقیقه، ۰/۱۵۴۶ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۰۰۶۸ متر و ۰/۰۵۳۷ دسی‌زیمنس بر دقیقه به دست آمدند که از دقت بالایی برخوردارند. بررسی تجمعی حجم زه‌آب و مقدار نمک خروجی از لوله‌های زهکش نشان داد که افزایش فاصله و عمق زهکش‌ها، حجم و مقدار نمک خروجی را افزایش می‌دهند.

منابع

۱. اصلانی ف. ناظمی ا. ح. صدرالدینی ع. ا. فاخری فرد ا. و قربانی م. ع. ۱۳۸۹. برآورد عمق و فاصله مناسب زهکش‌های زیرزمینی بر اساس کیفیت زه‌آب. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۱(۲): ۱۳۹-۱۴۶.
۲. پایمزد ش. مرید س. و مقدسی م. ۱۳۸۹. برنامه‌ریزی غیرخطی و سیستم‌های پویا در تخصیص آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه

- Using System Dynamics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 140(11): 5014007.
15. Pazira E. and Homae M. 2010. Salt leaching efficiency of subsurface drainage system at presence of diffusing saline water table boundary, 17th World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), June 2010, Quebec City, Canada.
16. Simonovic S. P. 2002. World water dynamics: global modeling of water resources. *Journal Environ Manage*. 66(3): 249-267.
17. Wahba M. A. S. Christen E. W. and Amer M. H. 2005. Irrigation water saving by management of existing subsurface drainage in Egypt. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 54: 1-11.
1. Winz I. Brierley G. and Trowsdale S. 2009. The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Management*. 23: 1301-1323.

