

## شبیه‌سازی شوری زهاب و دبی زهکش زیرزمینی به روش تحلیل پویایی سیستم مطالعه موردی: اراضی توسعه کشت نیشکر امیرکبیر

سعید آزادی<sup>۱</sup>، حامد نوذری<sup>۲</sup>، صفر معروفی<sup>۳</sup>، بهزاد قنبریان<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

مقاله برگرفته از رساله دکتری می‌باشد

### چکیده

کمیت و کیفیت زهاب تولید شده در اراضی شور که نیاز به آبشویی اولیه دارند، از شروع بهره‌برداری از شبکه آبیاری و زهکشی تا پیش از رسیدن به شرایط کم و بیش پایدار، همواره در حال تغییر می‌باشد. در مناطق با آب زیرزمینی شور و کم عمق، زمان رسیدن به حالت تعادل ممکن است چندین سال به طول بیانجامد. در چنین شرایطی، آگاهی از کمیت و کیفیت زهاب تولید شده به منظور مدیریت و کنترل آن، امری ضروری می‌باشد. در این تحقیق به کمک روش تحلیل پویایی سیستم که یک روش شبیه‌سازی به صورت شی‌گرا و مبتنی بر روابط بازخورد می‌باشد، اراضی کشاورزی مربوط به یک شبکه آبیاری و زهکشی، شبیه‌سازی و دقت مدل در تعیین میزان شوری و دبی زهاب خروجی زهکش‌های زیرزمینی اراضی مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اعتباریابی نتایج مدل از داده‌های جمع‌آوری شده فروردین ماه سال ۱۳۸۳ تا بهمن ماه سال ۱۳۸۴ مربوط به مزارع ARC2، ARC4، ARC6 و ARC8 واقع در اراضی مرکز تحقیقات نیشکر (واحد توسعه کشت نیشکر و صنایع جانبی امیرکبیر، استان خوزستان) استفاده گردید. به منظور تجزیه و تحلیل آماری از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد. در این راستا، شاخص آماری RMSE برای دبی زهاب خروجی حاصل از مزارع ARC2، ARC4، ARC6 و ARC8 به ترتیب برابر با ۶۶۳۹، ۸۵۴۶، ۷۹۵۰ و ۸۲۰۷ مترمکعب بر روز بدست آمد. همچنین این شاخص برای شوری زه‌آب خروجی مزارع فوق به ترتیب برابر با ۲/۲۵، ۴/۸۶، ۲/۰۴ و ۷/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر برآورد گردید. نتایج نشان داد که مدل حاضر در شبیه‌سازی دبی زهاب خروجی از لوله‌های زهکش و شوری آن در منطقه‌ای با سطح ایستایی شور و کم عمق، توانمند می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شبکه آبیاری و زهکشی، کمیت زهاب، شوری زهاب، VENSIM

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

s\_azadi\_ir@yahoo.com ، ۰۹۱۸۹۰۳۹۷۹۰

<sup>۲</sup> دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. hanozari@yahoo.com (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ۰۹۱۸۳۱۴۳۶۸۶

marofisafar59@gmail.com

<sup>۴</sup> استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه کانزاس، منهتن، آمریکا. b.ghanbarian@gmail.com



## مقدمه

شوری خاک یکی از مسائل اساسی در مناطق مختلف به‌ویژه با سطح ایستابی کم عمق به شمار می‌رود. ایران نیز از نظر شرایط اقلیمی و موقعیت جغرافیایی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک به حساب می‌آید که حدود ۳۰ درصد از اراضی قابل کشت آن به دلیل جریان رو به بالا از سطح آب زیرزمینی کم عمق، شور شده است (نوذری و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین تنها راه بهره‌برداری مفید و مطلوب از این زمین‌ها تقویت و احداث سیستم‌های زهکشی زیرزمینی است. از این نظر طراحی و اجرای صحیح زهکش‌ها اهمیت بسیار بالایی دارد و از جمله فعالیت‌هایی است که از دیرباز و در راستای حفظ پایداری تولید محصول، بر ضرورت اجرای آن در اراضی کشاورزی ایران تاکید شده است (حسن‌اقلی و همکاران، ۱۳۹۴). سیستم‌های زهکشی امکان تولید زراعی در خاک‌های شور و مرطوب را فراهم می‌نمایند، اما با تخلیه آلاینده‌های موجود در خاک و آب زیرزمینی به آبهای سطحی، باعث تخریب زیست بوم‌های آبی می‌شوند. لذا پیش‌بینی کمیت و کیفیت زهاب‌های تولیدی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از طرفی با توجه به رشد فزاینده جمعیت، نیاز به افزایش تولید مواد غذایی و فشارهای وارده بر منابع آب تجدیدپذیر، بهره‌برداری از آب‌هایی با کیفیت پایین مانند زهاب، راهکاری ضروری و منطقی به نظر می‌رسد (نوذری و همکاران، ۱۳۹۷). یکی از راه‌حل‌ها برای توسعه کشاورزی، استفاده از شبکه‌های آبیاری و زهکشی مدرن می‌باشد به طوری که در این شبکه‌ها می‌توان از آب، انرژی، سطح زیر کشت و نیروی کارگری به طرز بهینه بهره برد که نهایتاً منجر به بهره‌وری بالاتر و سود اقتصادی بیشتری خواهد شد (نوذری و همکاران، ۲۰۱۴). مختاران و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی اثر عمق زهکش و لایه محدودکننده بر دبی و شوری زهاب در اراضی فاریاب کشت نیشکر جنوب خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که شوری زهاب علاوه بر شوری آب آبیاری، تحت تاثیر شوری آب زیرزمینی

بوده و تفاوت در عمق زهکشی و موقعیت لایه محدودکننده بر این شوری موثر است. با توجه به مشارکت آب زیرزمینی در خروجی زهاب زهکش‌ها، نشان دادند با کاهش عمق زهکشی، دبی زهاب به شدت کاهش می‌یابد. به‌منظور ارزیابی سیستم‌های مدیریت آب و ارتقای کارکرد آنها می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی استفاده نمود. در آزمایش‌های مزرعه‌ای، برای تعیین تاثیر عوامل مختلف بر روی سیستم، عمق بهینه و برنامه‌ریزی آبیاری لازم است که آزمایش‌هایی با کمیت و کیفیت‌های مختلف انجام شود. در این روش محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به هزینه بالا، عدم امکان اعمال سناریوهای زیاد و پیچیده مدیریت آبیاری، محدود بودن صحت و سقم نتایج به منطقه و شرایط آزمایش اشاره نمود. از این نظر مدل‌های شبیه‌سازی را می‌توان به عنوان روش توسعه یافته‌ای از آزمایش‌های صحرائی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده کرد (نوذری و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین، اگر این مدل‌ها به درستی واسنجی شوند، می‌توان بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه زیاد از آنها بهره برد (مصطفی‌زاده فرد و همکاران، ۲۰۰۹). علاوه بر آن، ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش در طول تحقیق نیز بسیار دشوار خواهد بود، از این رو توسعه مدل‌های رایانه‌ای مد نظر محققین مختلف قرار گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به مدل‌های DRAINMOD، SWAP و یا شبکه عصبی مصنوعی در مطالعات محققین مختلف اشاره نمود که به بررسی کیفیت و کمیت زهاب خروجی از زهکش‌ها در شرایط مختلف پرداخته‌اند (نوذری و همکاران، ۱۳۹۷؛ کروس و ون-دام، ۲۰۰۸؛ نوذری و آزادی، ۲۰۱۷).

یکی از روش‌های بسیار موثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش تحلیل پویایی سیستم می‌باشد که روشی قدرتمند و بصری برای شبیه‌سازی می‌باشد. این روش ابتدا توسط فاستر (۱۹۶۱) جهت درک بهتر مسائل استراتژیک در سیستم‌های پویای پیچیده ابداع

اضافه نمودن یک پارامتر و بررسی تأثیر آن بر کل سیستم، تصمیم به استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی شوری و دبی زهاب خروجی از زهکش‌های زیرزمینی گرفته شد. در این بررسی، با توجه به آبیاری متغیر و نامنظم اراضی و تغییر مساحت مزارع تحت آبیاری هر ARC در هر هفته، دبی و شوری زهاب خروجی مورد ارزیابی قرار گرفت. به عبارت دیگر با توجه به برنامه آبیاری مزارع هر هفته تعداد مزارع و پیرو آن مساحت تحت آبیاری در هر ARC متفاوت می‌باشد. لذا هدف از این تحقیق توسعه مدلی می‌باشد تا بتواند این تعداد مزارع را به نحو مطلوب شبیه‌سازی و یک تخمین عملی مقدار زهاب خروجی و شوری آن در نقطه خروجی را محاسبه کند.

#### مواد و روشها

##### - مدل‌سازی پویایی سیستم

در این تحقیق، از محیط برنامه نویسی VENSIM DSS32 نسخه 4.0a که ابزاری برای مدل‌سازی به زبان پویایی سیستم و به صورت شی‌گرا بر پایه بازخورد می‌باشد، استفاده شد. یکی از مراحل اصلی مدل‌سازی به روش پویایی سیستم، ترسیم نمودارهای علت و معلولی می‌باشد. این نمودارها ابزاری مناسب برای ترسیم ساختار بازخوردی سیستم-ها می‌باشند. این فرایندهای بازخوردی شامل حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی می‌باشد که روابط علت و معلولی یک سیستم را نشان می‌دهند و در واقع، ساختار اصلی یک سیستم می‌باشند. در صورتی- که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک جهت باشند رابطه علی مثبت خواهیم داشت و در صورتی- که تغییرات متغیر مستقل و وابسته عکس یکدیگر باشند رابطه علی منفی خواهیم داشت. پس از ترسیم نمودارهای علی و معلولی باید نمودارهای حالت و جریان را ترسیم کرد. این نمودارها همراه با بازخورد دو مفهوم اساسی تئوری تحلیل پویایی سیستم می-باشند. در واقع، حالت‌ها انباشتگی‌های سیستم می‌باشند و نشان‌دهنده وضعیت سیستم بوده و

گردید. مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرایندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیک سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند. زمینه‌های کاربردی این روش بسیار وسیع بوده و استفاده از آن در تحقیقات آب نیز صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به تحقیقات فلچر (۱۹۹۸) در استفاده از این روش در مدیریت کم آبی اشاره نمود. متین‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم به شبیه‌سازی حرکت پویای نیتروژن در سطح ایستایی کم‌عمق پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که دیدگاه تحلیل پویایی سیستم برای فهم رفتار غیرخطی در سیستم‌های پیچیده نسبت به زمان بسیار مناسب بوده و می‌توان از آن برای مدل‌سازی مدیریت کوددهی جهت جلوگیری از انتقال آلودگی به محیط زیست استفاده نمود. لو و همکاران (۲۰۰۹) از روش تحلیل پویایی سیستم برای توسعه نفوذ، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و صعود موئینگی، در کشت برنج واقع در پایین دست رودخانه زرد چین استفاده کردند. نتایج این مدل که از آنالیز و روابط باز خورد بین فرایندهای هیدرولوژی استفاده می‌کند، نشان داد که با سطح اطمینان ۹۵ درصد رابطه معنی‌داری بین پارامترهای شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد. سیسل و بارلس (۲۰۰۱) در تحقیقی مدل پویای شوری در زمین‌های آبیاری جنوب شرقی ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. این محققین با شبیه‌سازی محیط خاک در حضور سیستم‌های زهکشی زیرزمینی، نشان دادند که روش پویایی سیستم می‌تواند روش مناسبی برای شبیه-سازی این محیط باشد.

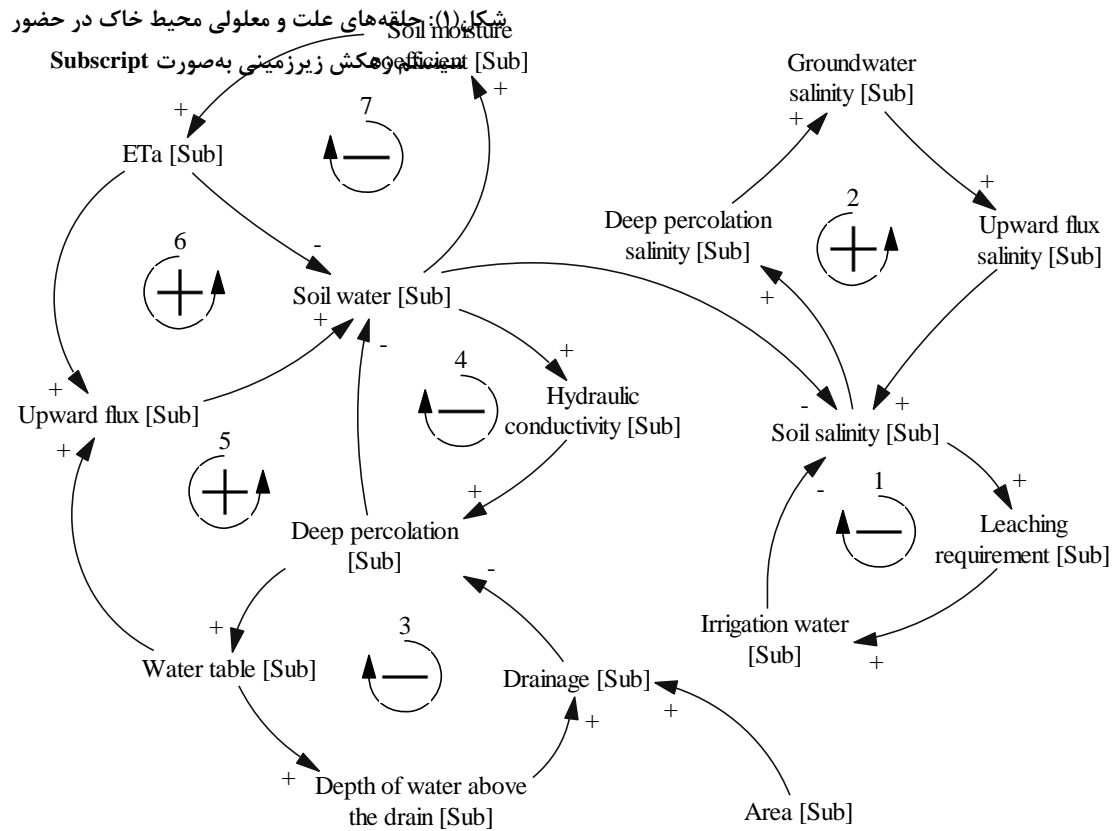
تحقیقات انجام شده همگی نشان از توانایی روش تحلیل پویایی سیستم در شبیه‌سازی تحت شرایط و سطوح مختلف را دارد. بنابراین با توجه به ضرورت وجود یک مدل تحلیلی منطبق با شرایط صحرا و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، از قبیل سرعت اجرای بالا و امکان دسترسی کاربر به خطوط برنامه و همچنین سادگی حذف یا

خاک می‌شود. در حلقه شماره ۶، با افزایش تبخیر و تعرق واقعی، میزان جریان رو به بالا از سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد که خود باعث افزایش رطوبت خاک شده و یک حلقه مثبت را تشکیل می‌دهد. از طرف دیگر، با افزایش تبخیر و تعرق واقعی، رطوبت خاک کاهش یافته و باعث کاهش ضریب رطوبتی خاک می‌شود. کاهش ضریب رطوبتی خاک نیز موجب کاهش تبخیر و تعرق واقعی می‌شود و یک حلقه منفی را تشکیل می‌دهد (حلقه هفتم). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مساحت آبیاری مزارع هر ARC، به عنوان یک پارامتر ورودی تاثیرگذار تعریف شده و یک حلقه را تشکیل نمی‌دهد. در واقع، مساحت تحت آبیاری در هر نوبت آبیاری، تأثیر مستقیم بر میزان زهاب خروجی از هر ARC داشته و با تغییر مساحت، میزان زهاب خروجی تغییر خواهد کرد.

لازم به ذکر است که در فرایند مدل‌سازی، سیستم آب و خاک و زهکش‌ها به کمک گزینه Subscript تعریف شد، بدین معنی که از نمایش هر یک از قطعات زراعی و پارامترهای وابسته به آن و همچنین نمایش توزیع مکانی آنها جلوگیری شده است و تمامی این لایه‌ها و روابط مربوط به آنها در درون نمودار حالت و جریان ساتر می‌باشد. در این راستا، پس از مدل‌سازی کامل سیستم، تمامی قطعات زراعی موسوم به ARC، در قالب یک Subscript تعریف شد، سپس شوری و دبی زهاب خروجی از زهکش‌ها نسبت به زمان به طور کامل توسط مدل شبیه‌سازی گردید.

تصمیمات و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها صورت می‌گیرد. جریان‌ها نیز نشان‌دهنده فرایندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت که در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت، تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن، تصمیمات اعمال می‌شوند.

شکل ۱ نمونه‌ای از نمودارهای علت و معلولی در این تحقیق را نشان می‌دهد که به وسیله سه حلقه مثبت و چهار حلقه منفی تعریف شده است. در حلقه شماره ۱، با افزایش شوری خاک، نیاز آبشویی افزایش یافته و جهت آبشویی منطقه ریشه، نیاز به آب آبیاری افزایش می‌یابد و در اثر افزایش آب آبیاری، شوری خاک در ناحیه ریشه کاهش می‌یابد و این حلقه به صورت یک حلقه منفی تعریف می‌شود. در حلقه شماره ۲، افزایش شوری آب زیرزمینی باعث افزایش شوری جریان رو به بالا می‌شود و در نهایت باعث افزایش شوری خاک می‌شود. در حلقه سوم، افزایش نفوذ عمقی باعث افزایش تراز سطح آب می‌شود و با افزایش تراز سطح آب، عمق آب روی زهکش و میزان زهاب خروجی افزایش می‌یابد. در حلقه شماره ۴، با توجه به اینکه هدایت هیدرولیکی خاک تابعی از رطوبت خاک است، با افزایش رطوبت خاک هدایت هیدرولیکی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش هدایت هیدرولیکی، نفوذ عمقی افزایش و رطوبت خاک در ناحیه ریشه کاهش می‌یابد. در حلقه پنجم، با افزایش نفوذ عمقی، تراز سطح آب افزایش یافته و با بالا آمدن تراز سطح آب، میزان جریان رو به بالا افزایش یافته و باعث افزایش رطوبت خاک و نهایتاً هدایت هیدرولیکی



### - معادلات حاکم

#### الف- بیلان آب در خاک

در این تحقیق از روش بیلان حجمی جهت شبیه-سازی محیط آب خاک استفاده شده است. بدین ترتیب که محیط آب خاک به دو لایه تقسیم و هر لایه به صورت یک متغیر حالت تعریف شده است. لایه اول شامل بخشی از سیستم آب و خاک است که از سطح خاک تا عمق نصب زهکش‌ها ادامه می‌یابد. لایه دوم از عمق نصب زهکش‌ها تا سنگ بستر و لایه نفوذ ناپذیر ادامه دارد. بنابراین محدوده این لایه‌ها با توجه به شرایط منطقه و عمق نصب زهکش، می‌تواند متفاوت باشد.

میزان جریان ورودی به لایه فوقانی شامل آب آبیاری، بارش، جریان رو به بالا از تراز سطح آب زیرزمینی و خروجی آن تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، رواناب و زهکشی از این لایه می‌باشد. ذخیره آب در خاک در پایان روز  $j$ ام برای لایه اول،  $S_{j,1}$ ، به صورت رابطه ۱

تعریف می‌شود. همچنین آب ورودی به لایه تحتانی شامل نفوذ عمقی از لایه فوقانی و آبی که از سفره زیرزمینی وارد سیستم می‌شود و خروجی آن میزان آبی که بصورت جریان رو به بالا به سمت لایه فوقانی حرکت می‌کند، مقدار زهکشی از این لایه و آبی که از سیستم به سفره زیرزمینی تخلیه می‌شود، برای لایه دوم، در رابطه ۲ نشان داده شده است (نوذری و لیاقت، ۲۰۱۴).

$$S_j = S_{j-1} + I_j + Pe_j + UF_j - ET_{aj} - P_j - R_j - d1_j \quad (1)$$

$$S_j = S_{j-1} + P_j + In_j + UF_j - d2_j - Out_j \quad (2)$$

که در آن،  $S_j$  ذخیره آب در خاک در پایان روز  $j$ ام،  $S_{j-1}$  ذخیره آب در خاک در پایان روز  $j-1$ ام،  $I_j$  آبیاری در روز  $j$ ام،  $Pe_j$  بارش در روز  $j$ ام،  $UF_j$  جریان رو به بالا که به عمق سطح ایستابی بستگی دارد در روز  $j$ ام،  $ET_{aj}$  تبخیر و تعرق واقعی در روز  $j$ ام،  $P_j$  نفوذ عمقی در روز  $j$ ام،  $R_j$  رواناب موجود

### ج- بیلان آب و نمک در خاک

به منظور برآورد میزان ذخیره آب و نمک در خاک از معادله بیلان جرمی استفاده شد. معادله‌ای که برای محاسبه بیلان جرمی نمک در اراضی تحت آبیاری به-کار برده شد به صورت زیر می‌باشد:

$$I.EC_I + P_e.EC_{P_e} + UF.EC_{UF} + In.EC_{In} \\ = P.EC_P + d.EC_d + Out.EC_{Out} + \Delta.EC \quad (6)$$

$EC$  هدایت الکتریکی و  $\Delta.EC$  تغییر مقدار نمک در محلول خاک ( $dS/m$ ) می‌باشد. در این معادله از مقدار نمکی که در خاک رسوب نموده یا توسط گیاه جذب می‌شود صرف نظر شده است.

همچنین، باید توجه داشت که در تعیین مقدار  $EC_P$ ، تمامی آبی که به صورت نفوذ عمقی از لایه اول می‌گذرد در شست‌وشوی نمک مؤثر نیست؛ زیرا مقداری از آب آبیاری بدون اینکه با آب خاک لایه سطحی مخلوط شود، از درز و شکاف‌ها و یا فضاهای درشت خاک، به صورت جریان ترجیحی، می‌گذرد. بنابراین با در نظر گرفتن راندمان آبشویی می‌توان تخمین بهتری از شوری منطقه ریشه و شوری نفوذ عمقی بدست آورد، از این رو می‌توان نوشت:

$$EC_P = f.EC_{FC} + (1-f).EC_{iw} \quad (7)$$

در این رابطه  $f$  راندمان آبشویی و  $EC_{FC}$  هدایت الکتریکی خاک در نقطه ظرفیت زراعی می‌باشد.

### - اعتبارسنجی مدل

پس از ایجاد مدل شبیه‌سازی، باید بتوان اعتبار آن را تایید کرد. در این قسمت به کمک آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده فروردین ماه سال ۱۳۸۳ تا بهمن ماه سال ۱۳۸۴ مربوط به قطعات ARC2، ARC4، ARC6 و ARC8 واقع در اراضی تحقیقاتی مرکز تحقیقات نیشکر واحد توسعه کشت نیشکر و صنایع جانبی امیرکبیر که یکی از واحدهای هفت‌گانه طرح توسعه نیشکر در استان خوزستان می‌باشد، استفاده شد. منطقه مورد نظر در ۴۵ کیلومتری جنوب اهواز و در غرب رودخانه کارون و شرق جاده اهواز به خرمشهر

در روز  $Z$  ام،  $d1_z$  زهکشی از لایه اول در روز  $Z$  ام،  $In_z$  میزان آب زیرزمینی ورودی به سیستم از مرزهای جانبی در روز  $Z$  ام،  $d2_z$  زهکشی از لایه دوم در روز  $Z$  ام و  $Out_z$  خروجی از مرزهای جانبی در روز  $Z$  ام که همگی پارامترها بر حسب  $mm/day$  می‌باشند. یکی از فرضیات این تحقیق این است که تا زمانی که لایه اول به حد ظرفیت مزرعه نرسیده است، آب به لایه پایینی نفوذ نکند.

### ب- زهکشی

سهم زهایی که از لایه اول و دوم وارد زهکش می‌شود را می‌توان به کمک رابطه هوخهات بدست آورد. هوخهات با صرف نظر از مقاومت مربوط به جریان عمودی رابطه‌ای را برای محاسبه فاصله زهکش‌ها پیشنهاد نموده است که در آن افت انرژی در اثر جریان افقی و شعاعی در نظر گرفته شده است (رابطه ۳).

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

در این رابطه  $q$  جریان ورودی به زهکش‌ها ( $mm/day$ )،  $h$  ارتفاع ستون آب در نقطه وسط بین دو زهکش ( $mm$ )،  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب ضرایب هدایت هیدرولیکی در قسمت فوقانی و تحتانی زهکش‌ها ( $mm/day$ )،  $L$  فاصله بین زهکش‌ها ( $mm$ ) و  $d_e$  عمق معادل لایه غیر قابل نفوذ ( $mm$ ) می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_e = \frac{L}{8 F} \quad (4)$$

$$F = \left[ \frac{1}{\pi} \ln \frac{h}{r_0 \sqrt{2}} + \frac{(1 - \sqrt{2} h/L)^2}{8h/L} \right] \quad (5)$$

در این رابطه  $r_0$  شعاع زهکش ( $mm$ ) می‌باشد. به کمک رابطه ۳، می‌توان سهم آبی که از لایه اول،  $\frac{4K_1 h^2}{L^2}$ ، و لایه دوم،  $\frac{8K_2 h.d_e}{L^2}$ ، وارد زهکش می‌شود را تعیین نمود.

حاشیه رودخانه کارون و در فاصله ۳ کیلومتری از اراضی کشت و صنعت می‌باشد. آب رودخانه کارون پس از پمپاژ، وارد کانال اصلی شده و به اراضی کشت و صنعت انتقال می‌یابد. مشخصات اراضی محدود مورد مطالعه که در سمت راست کانال قرار دارند، در جدول ۱ نشان داده شده است. هر مزرعه دارای طول ۱۰۰۰ متر و عرض ۲۵۰ متر می‌باشد و تعداد آنها در کل کشت و صنعت امیرکبیر تقریباً ۴۷۰ مزرعه است. قطعات زراعی موسوم به ARC، مجموعه‌ای از مزارع ۲۵ هکتاری می‌باشند. تنها منبع آب آبیاری اراضی منطقه، رودخانه کارون است که متوسط هدایت الکتریکی آن برای آبیاری اراضی منطقه، برابر با ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود.

و بین طول‌های جغرافیایی ۱۲' ۴۸° تا ۳۰' ۴۸° و عرض‌های ۱۵' ۳۱° تا ۴۰' ۳۱° قرار گرفته است. محدوده درجه حرارت ماهیانه منطقه، از ۴/۶ تا ۴۶/۳ درجه سانتیگراد برای سال زراعی ۱۳۸۳ و ۶/۶ تا ۴۵/۷ درجه سانتیگراد برای سال زراعی ۱۳۸۴ و میانگین رطوبت نسبی سالیانه آن نیز به ترتیب از ۱۹/۱ تا ۷۱/۵ درصد، و ۱۸/۷ تا ۷۵/۰ درصد متغیر بوده است. متوسط بارش سالیانه در سطح منطقه براساس داده‌های ایستگاه اصلی هواشناسی واحد امیرکبیر برای سال‌های مذکور، به ترتیب ۲۱۶/۰ و ۱۷۸/۸ میلی‌متر بوده است.

کشت و صنعت امیرکبیر به مساحت ۱۲۰۰۰ هکتار، دارای یک ایستگاه پمپاژ اصلی آبیاری واقع در

جدول (۱): مساحت مزارع مورد مطالعه در کشت و صنعت امیرکبیر

نام قطعه	ARC2	ARC4	ARC6	ARC8	جمع کل
مساحت زیر پوشش آبیاری (هکتار)	۴۷۹/۲	۵۴۰/۹	۶۰۷/۶	۸۵۳/۲	۲۴۸۰/۹
مساحت زیر پوشش زهکشی (هکتار)	۳۴۷/۲	۵۳۲/۹	۵۹۴/۵	۹۴۶/۷	۲۴۲۱/۳

ورودی‌های مورد نیاز مدل برای پارامترهای سیستم زهکشی در جدول ۲ نشان داده شده است. در طی دوره آبیاری نیشکر در سال زراعی مینا، پارامترهای دبی خروجی زهکش‌ها، شوری آب آبیاری و شوری زهاب به صورت هفتگی ثبت گردید (قنادان-زاده، ۱۳۸۵).

آبیاری قطعات زراعی موسوم به ARC، به گونه‌ای بود که در هر نوبت آبیاری یا آیشویی، تنها کسری از سطح قطعه آبخور آبیاری می‌شود. همچنین ممکن است قسمتی از قطعه آیشویی شود. از آنجا که در مدت زمان دوره آماری در نظر گرفته شده برای این تحقیق، برخی از قطعات ممکن است آبیاری یا آیشویی نشده باشند، لذا اندیشه استفاده از آمار مربوط به یک قطعه منفرد برای استفاده از اطلاعات آن و تهیه مدل بر مبنای آن امکان‌پذیر نبود. بنابراین در تهیه مدل حاضر، مساحت مزارع تحت آبیاری بصورت هفتگی و طبق اطلاعات ورودی متغیر در نظر گرفته شد، و تحت این شرایط اقدام به مدل‌سازی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم گردید، تا بتوان به یک بهره‌وری و تخمین عملی، در تعیین مقدار زهاب خروجی و شوری آن در نقطه خروجی از یک زهکش اصلی دست یافت. بنابراین به ناچار از میانگین اطلاعات مربوط به ARC های مورد بررسی استفاده گردید.

(RMSE)، خطای استاندارد (SE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده شد. شکل ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (۸)$$

$$SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_m - Y_p)^2}}{\bar{Y}_m} \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_p - \bar{Y}_p)]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_p - \bar{Y}_p)^2} \quad (۱۰)$$

مقادیر میانگین این پارامترها برای قطعات مذکور به- ترتیب برابر با ۷۸۳۶ مترمکعب بر روز، ۰/۳۳ و ۰/۷۵ می‌باشد. سینگ و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی که در آن به شبیه‌سازی سیستم‌های زهکشی زیرسطحی توسط مدل DRAINMOD پرداختند، شاخص بدون بعد SE در تخمین متوسط ضریب زهکشی را در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۲۸، ۰/۳۷ و ۰/۳۴ بدست آورده و نتایج مدل را خوب ارزیابی کردند. مطابق با جدول ۳ میزان شاخص SE بین ۰/۲۶ تا ۰/۴۱ متغیر است و با توجه به اینکه هر چقدر مقدار این پارامتر به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق خوب بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده می‌باشد. در نتیجه می‌توان انطباق بین نتایج شبیه- سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای در تحقیق حاضر را خوب ارزیابی کرد.

جدول (۲): خلاصه‌ای از ورودی‌های پارامترهای سیستم

#### زهکش

مقدار	پارامتر
۲	عمق متوسط زهکش (m)
۵۰	فاصله زهکش‌ها (m)
۰/۱	شیب کارگذاری (%)
۱/۲	ضریب زهکشی (cm/day)
۱/۵	شعاع موثر زهکش‌ها (cm)
۵	عمق لایه غیرقابل نفوذ (m)

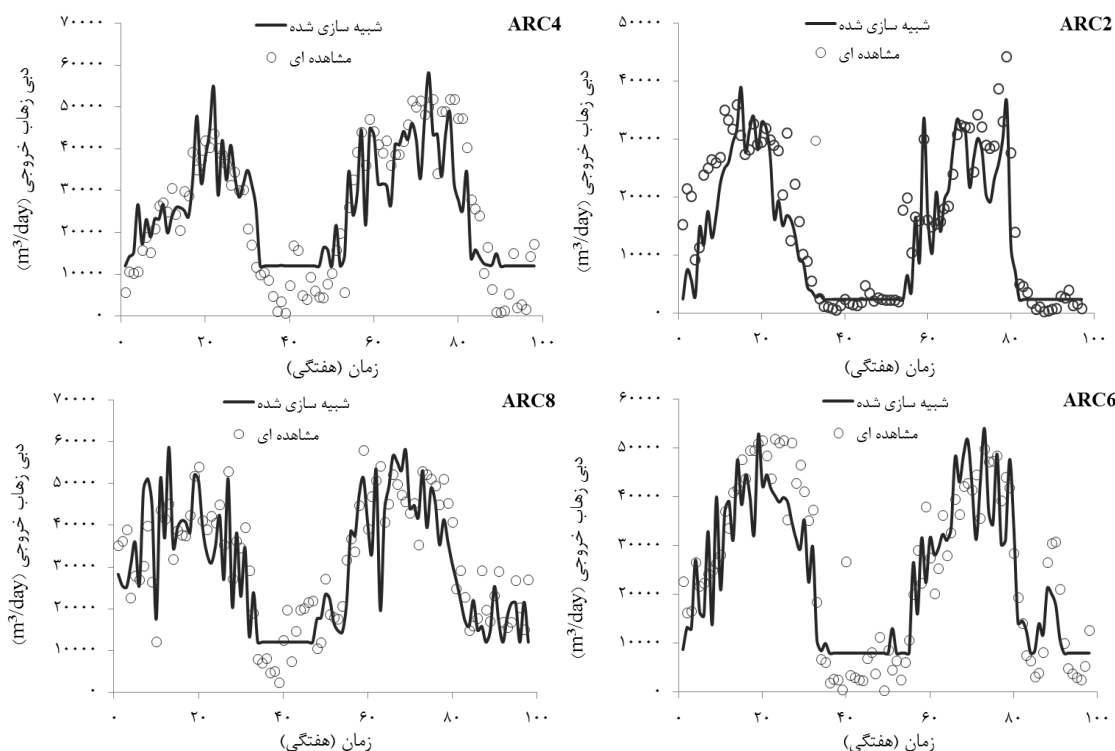
به‌منظور ارزیابی و اعتباریابی نتایج مدل، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا در این روابط  $n$  تعداد روزهای دوره مورد مطالعه،  $Y_m$  مقادیر اندازه‌گیری شده در هر روز،  $Y_p$  مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل،  $\bar{Y}_m$  میانگین داده- های اندازه‌گیری شده و  $\bar{Y}_p$  میانگین داده‌های پیش- بینی شده می‌باشد.

#### نتایج و بحث

##### - دبی خروجی زهکش

شکل ۲ دبی خروجی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده قطعات ARC2، ARC4، ARC6 و ARC8 در سال‌های زراعی ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مدل روند تغییرات دبی خروجی از زهکش‌ها را به‌درستی پیش‌بینی کرده است که نشان از توانایی آن در شبیه- سازی زهاب خروجی از زهکش‌ها دارد. مقادیر پارامترهای آماری RMSE، SE و  $R^2$  برای دبی خروجی شبیه‌سازی شده در جدول ۳ ارائه شده است.





شکل (۲): دبی زهاب خروجی از زهکش‌ها نسبت به زمان

جدول (۳): مقادیر شاخص‌های آماری دبی زهاب خروجی برای مدل شبیه‌سازی شده

مدل VENSIM				شاخص آماری
ARC8	ARC6	ARC4	ARC2	
۸۲۰۷	۷۹۵۰	۸۵۴۶	۶۶۳۹	RMSE (m <sup>3</sup> /day)
۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۴۱	SE
۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۷۸	R <sup>2</sup>

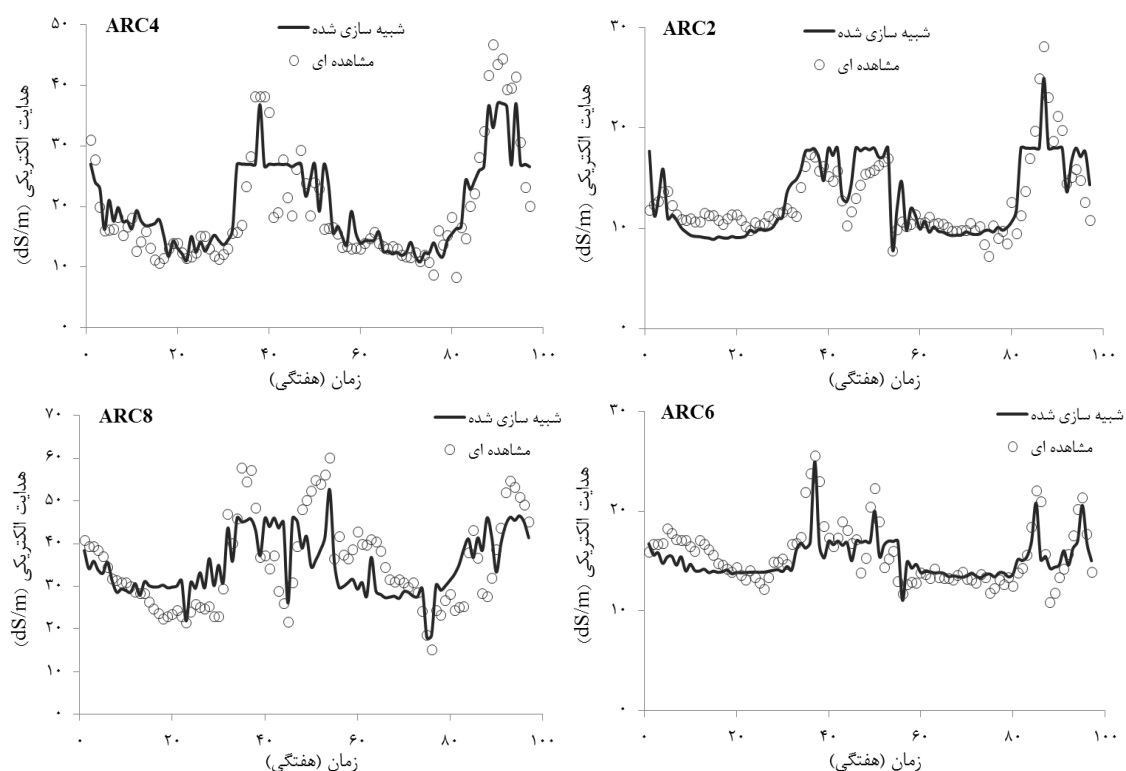
مساحت هر قطعه زراعی موسوم به ARC که شامل مجموعه‌ای از مزارع ۲۵ هکتاری می‌باشد ثابت می‌باشد، اما در هر هفته مساحت متفاوت و متغیری از مزارع آن آبیاری می‌شود. بنابراین، میزان دبی زهاب خروجی دارای نوسان بوده که با متغیر در نظر گرفتن مساحت‌ها در مدل شبیه‌سازی، نرم‌افزار VENSIM به خوبی این نوسانات را شبیه‌سازی کرده است.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است پس از پایان سال زراعی اول و متوقف شدن آبیاری مزارع، دبی خروجی از زهکش‌ها به میزان دبی پایه خود رسیده که ناشی از عمق کم آب زیرزمینی و مشارکت آن در خروجی زهاب زهکش‌ها دارد. پس از آن و با شروع مجدد آبیاری در فصل زراعی جدید، مجدداً میزان زهاب خروجی افزایش می‌یابد. از طرفی

### شوری زهاب خروجی -

شکل ۳ تغییرات شوری زهاب خروجی را با داده های جمع آوری شده در سال های زراعی ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ مقایسه می کند. مقادیر شاخص های آماری RMSE، SE و  $R^2$  برای شوری زهاب خروجی شبیه سازی شده در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر میانگین این پارامترها برای قطعات مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۴/۲۸ دسی زیمنس بر متر، ۰/۲۰ و

۰/۵۹ محاسبه گردید. از آنجایی که نوذری و همکاران (۱۳۹۷) به منظور شبیه سازی شوری زهاب خروجی توسط سایر مدل ها، شاخص آماری SE را ۰/۳۴ محاسبه کرده و نتایج را قابل قبول ارزیابی کرده اند، می توان انطباق بین نتایج شبیه سازی شده در این تحقیق را خوب ارزیابی کرد (نوذری و همکاران، ۱۳۹۷).



شکل (۳): شوری زهاب خروجی از زهکش ها نسبت به زمان

جدول (۴): مقادیر شاخص های آماری شوری زهاب برای مدل شبیه سازی شده

مدل VENSIM				شاخص آماری
ARC8	ARC6	ARC4	ARC2	
۷/۹۸	۲/۰۴	۴/۸۶	۲/۲۵	RMSE (dS/m)
۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۱۸	SE
۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۷۳	۰/۶۷	$R^2$

نوسانات شوری زهاب در شرایط واقعی به دلیل نوسانات سطح ایستابی و تاثیر آن بر عمق اختلاط (عمقی که جریانات شعاعی اتفاق می افتد) می باشد که

با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که تغییرات شوری اندازه گیری شده دارای روند نوسانی می باشد.

خروجی، ۲/۰۴ تا ۷/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۱۳ تا ۰/۲۵ و نهایتاً ۰/۷۳ تا ۰/۴۲ به‌دست آمد که دقت خوبی را نسبت به شرایط واقعی نشان می‌دهد. لذا می‌توان گفت روش تحلیل پویایی سیستم، در شبیه‌سازی کمیّت و کیفیت زهاب شور کشاورزی در منطقه خوزستان با سطح ایستابی شور و کم عمق، دارای دقت قابل قبولی بوده است.

با توجه به نتایج شاخص بدون بعد SE حاصل از جداول ۳ و ۴، مدل در شبیه‌سازی شوری زهاب از دقت بالاتری برخوردار بوده است. در ذکر دلیل آن باید به این نکته اشاره کرد که دامنه نوسانات شوری زهاب کمتر از دبی بوده و این باعث افزایش دقت آن شده است. این موضوع با مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ کاملاً مشهود می‌باشد. در تایید دلیل مذکور، می‌توان به شکل ۳ اشاره نمود. از آنجائیکه دامنه تغییرات ARC6 از بقیه کمتر می‌باشد، لذا کمترین خطای SE نیز متعلق به این مزرعه می‌باشد (SE=0.13).

از قابلیت مدل تهیه شده در این تحقیق علاوه بر نمایش تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به شبیه‌سازی مطابق با شرایط مزرعه، پذیرش آبیاری نامنظم در هر یک از مزارع و مساحت تحت آبیاری متغیر در زمان‌های مختلف، مدل‌سازی مزارع مختلف به‌صورت هم‌زمان با استفاده از توانایی Subscript و امکان دسترسی کاربر به خطوط برنامه و سادگی اصلاح ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم اشاره کرد.

در لایه‌های زیرین عمق لوله زهکش اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال شکیب و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند پس از آبیاری که سطح ایستابی بالا می‌آید، عمق اختلاط افزایش و در بین دو آبیاری که سطح ایستابی پایین می‌رود، عمق اختلاط کاهش می‌یابد. با توجه به غلظت نمک در لایه‌های زیرین عمق نصب زهکش، هرچه عمق اختلاط بیشتر باشد، شوری زهاب خروجی بیشتر و هرچه عمق اختلاط کمتر باشد شوری زهاب خروجی کمتر خواهد شد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق از روش تحلیل پویایی سیستم در شبیه‌سازی دبی و شوری زهاب خروجی، استفاده شد و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه مقایسه گردید. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی، از آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده از قطعات ARC2، ARC4، ARC6 و ARC8 واقع در اراضی تحقیقاتی مرکز تحقیقات نیشکر واحد توسعه کشت نیشکر و صنایع جانبی امیرکبیر در استان خوزستان استفاده گردید. میزان برآزش میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، با محاسبه شاخص‌های آماری RMSE، SE و R<sup>2</sup> محاسبه شد. در شبیه‌سازی دبی خروجی از زهکش‌ها بازه تغییرات این شاخص‌ها برای ۴ قطعه زراعی مذکور به‌ترتیب از ۶۶۳۹ تا ۸۵۴۶ مترمکعب بر روز، ۰/۲۶ تا ۰/۴۱ و ۰/۷۹ تا ۰/۷۱ نوسان داشت. همچنین تغییرات این پارامترها برای شوری زهاب

### منابع

- حسن‌اقلی، ع.، ع. اسمعیلی امینلویی و ح. سخایی‌راد. ۱۳۹۴. بررسی کمیّت و کیفیت زهاب زهکش‌های زیرزمینی بدون پوشش در مقایسه با پوشش معدنی در دشت شادگان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۹، شماره ۲، ۲۷۵-۲۶۳.
- قنادان‌زاده، م. ۱۳۸۵. بررسی شوری زهاب زمین‌های کشاورزی و ارائه مدل پیش‌بینی EC و ضریب زهکشی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: اراضی کشت و صنعت امیرکبیر). پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات اهواز.

شکیبا، م.، ع. م. لیاقت و ف. میرزایی. ۱۳۹۲. بررسی اثر عمق سطح ایستابی و دبی آب آبیاری بر عمق اختلاط و کیفیت زهاب زیرزمینی خروجی از مدل آزمایشگاهی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، جلد ۷، ۱۳۲-۱۲۲. مختاران، ر.، ع. ناصری، ح. کشکولی و س. برومند نسب. ۱۳۹۲. اثر عمق زهکش و لایه محدودکننده بر دبی و شوری زهاب در اراضی فاریاب جنوب خوزستان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ۳، شماره ۱، ۷۳-۶۱. نوذری، ح.، آ. پورصدری، س. آزادی و ع. م. لیاقت. ۱۳۹۷. ارزیابی نرم افزار DRAINMOD-S در شبیه سازی شوری زهاب زهکش های زیرزمینی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۳، شماره ۳، ۴۷۱-۴۵۹.

Fletcher, E. J. 1998. The use of system dynamics as a decision support tool for the management of surface water resources. Proc. 1st Int. Conf. on New Information Technolo. For Decision-Making in Civ. Engrg. University of Quebec. Montreal, Canada.

Forrester, J. W. 1961. Industrial dynamics. Productivity press, Portland Oreg.

Kroes, J. G and J. C. Van Dam. 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wageningen, Report. 1649, Availabel at: [www.alterra.nl/models/swap](http://www.alterra.nl/models/swap).

Luo, Y., S. Khan and Y. Cui. 2009. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. J. Paddy Water Environ, 7: 1-9.

Matinzadeh, M. M., J. Abedi Koupai, A. Sadeghi-Lari, H. Nozari and M. Shayannejad. 2017. Development of an innovative integrated model for the simulation of nitrogen dynamics in farmlands with drainage systems using the system dynamics approach. Journal of Ecological Modelling, 347: 11-28.

Mostafazadeh-fard, B., H. Mansouri, S. F. Mousavi and M. Feyzi. 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. Irrigation and Drainage Engineering. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(32):32-38.

Nozari, H. and S. Azadi. 2017. Experimental evaluation of artificial neural network for predicting drainage water and groundwater salinity at various drain depths and spacing. Natural Computing Applications J. DOI 10.1007/s00521-017-3155-9.

Nozari, H., S. Azadi and A. Zali. 2017. Experimental study of the temporal variation of drain water salinity at different drain depths and spacing in the presence of saline groundwater. Sustainable Water Resources Management. 10.1007/s40899-017-0182-8.

Nozari, H., M. Heydari and S. Azadi. 2014. Simulation of a right Abshar irrigation network and its cropping pattern using a system dynamics approach. Irrigation and Drainage Engineering, 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000777: 1-7.

Nozari, H. and A. M. Liaghat. 2014. Simulation of drainage water quantity and quality using system dynamics. Irrigation and Drainage Engineering, 140(11), 05014007.

Singh, R., M. J. Helmers and Q. i. Zhiming. 2006. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. J. Agricultural Water Management, 85: 221-232.

Saysel, A. and Y. Barlas. 2001. A dynamic model of salinization on irrigated lands. Ecological Modelling, 139: 177-199.



## Simulation of Drainage Water Salinity and Discharge of Subsurface Drain Using System Dynamics Approach; Case Study in Sugar Cane Research Center of Amir Kabir

Saeed Azadi<sup>1</sup>, Hamed Nozari<sup>2</sup>, Safar Marofi<sup>3</sup>, Behzad Ghanbarian<sup>4</sup>

### Abstract

Quality and quantity of drainage water in saline lands, which require primary leaching is continuously changing from the beginning of irrigation and drainage network operation before reaching a more or less equilibrium state. The time to reach a state of equilibrium in areas with saline groundwater may take several years. Therefore in this paper, the system dynamics technique that is one of the object oriented approach was used to simulate farms of irrigation and drainage network, and determine model performance to simulate the drainage water salinity and discharge of subsurface drains. To validate the results of the model, data collected in the 2004 and 2005 cropping years from ARC2, ARC4, ARC6 and ARC8 farms was used in the research area of Sugar Center Research Center (Amir Kabir Agro Industrial Development Unit of Sugarcane Development Company, Khuzestan Province). To statistical analysis and calculating, the root mean square error (RMSE), standard error (SE) and correlation coefficient ( $R^2$ ), were used. In this regard, the RMSE statistical index for drainage discharge of ARC2, ARC4, ARC6 and ARC8 farms were 6639, 8546, 7950 and 8207  $m^3/day$  respectively. Also, the RMSE for drainage water salinity of the farms were 2.25, 4.86, 2.04 and 7.98  $dS/m$  respectively. The results showed that the model is capable of simulating the drainage outflow and its salinity in saline and shallow water table region.

**Key Words:** Drainage water quantity; Drainage water salinity; Irrigation and drainage network; VENSIM

<sup>1</sup> Ph.D Student of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Dept. of Water science engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran. (Corresponding Author). E-mail: hanozari@yahoo.com

<sup>3</sup> Professor, Dept. of Water science engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.

<sup>4</sup> Assistant Professor, Dept. of Geology, Kansas State Univ., Manhattan KS, USA.