

شبیه‌سازی روند کیفی کانال آبیاری نهر شعبان با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم

حامد نوذری^۱، سعید آزادی^۲، ندا مازوجی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۴

چکیده

به منظور روندیابی کیفی رودخانه‌ها و بررسی چگونگی تغییرات آلودگی در آن‌ها، استفاده از مدل‌های کامپیوتری ضروری می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش به کمک روش تحلیل پویایی سیستم مدل کامپیوتری در محیط برنامه‌نویسی VENSIM بسط داده شد که بتواند روند تغییر کیفیت آب را در یک مسافت ۴۶۸/۸ متری از منبع تزریق ماده ردیاب شبیه‌سازی نماید. به منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل از داده‌های جمع‌آوری شده یکی از کانال‌های آبیاری درجه ۳ شهرستان نهاوند (نهر شعبان) واقع در استان همدان استفاده گردید. پس از تجزیه و تحلیل آماری و محاسبه شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) میزان برازش میان مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده محاسبه شد. در کانال آبیاری تزریق ماده کلرید سدیم با هدایت الکتریکی ۰/۷۴۶ میلی‌موس بر سانتی‌متر به مدت ۲۰ دقیقه صورت گرفت و در ۳ ایستگاه با فواصل معین نمونه‌برداری انجام پذیرفت. براساس نتایج بدست آمده، بهترین انطباق نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌ای در فاصله‌ی ۱۶/۵ متری از منبع تزریق و در ایستگاه اول، و کمترین انطباق در ایستگاه نمونه‌برداری دوم در فاصله‌ی ۲۲۸ متری از منبع تزریق بود. مقادیر شاخص‌های آماری MAE، SE، RMSE و R^2 در ایستگاه اول به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۲۴، ۰/۱۳، ۰/۱۸، ۰/۱۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر و ۰/۹۰ و در ایستگاه دوم ۰/۴۷، ۰/۲۴، ۰/۲۲ میلی‌موس بر سانتی‌متر و ۰/۸۱ برآورد گردید. نتایج نشان داد مدل حاضر در شبیه‌سازی روند کیفی آب از دقت خوبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، شبیه‌سازی، کلرید سدیم، نرم‌افزار VENSIM

^۱ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ، hanozari@yahoo.com (نویسنده مسئول)

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ۰۹۱۸۹۰۳۹۷۹۰ s_azadi_ir@yahoo.com

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ۰۹۳۷۱۳۱۱۵۵۳ mohandesmazoji@yahoo.com

مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع اصلی تامین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت مطرح می‌باشند. با توجه به اهمیت این منابع، حفظ آنها یکی از دغدغه‌های اصلی و اساسی به‌شمار می‌رود. از طرفی این منابع به‌عنوان محل تخلیه فاضلاب‌ها، پساب‌های صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی قرار گرفته‌اند. با توجه به این نکته که هر رودخانه ظرفیت معینی برای پذیرش این آلاینده‌ها را دارا می‌باشد، بنابراین بررسی کیفی و زیست‌محیطی آنها مطرح می‌شود. اگر بتوان این منابع را از نظر پارامترهای کیفی آب مورد بررسی قرار داد، یافتن راهکار مناسب برای رفع مشکلات مطرح شده آسان‌تر خواهد شد (مفتاح هلقی، ۱۳۸۸).

برای تعیین میزان آلودگی آب رودخانه و همچنین توزیع آلودگی در طول آن می‌توان از ابزارهای موجود جهت پیش‌بینی عکس‌العمل و تعیین وضعیت سیستم طبیعی در مقابل ورودی‌های مفروض و معلوم به سیستم استفاده کرد. یکی از ابزارهایی که می‌توان در این مورد به کار برد، مدل‌سازی کیفی آب می‌باشد. مدل‌های فیزیکی نمونه‌ای از طرح واقعی ولی در ابعاد کوچک می‌باشند، به طوری که رفتارهای هیدرولیکی - دینامیکی با اصل آن منطبق است. از آنجایی که مدل فیزیکی از نظر هیدرولیکی به اصل آن شباهت بیشتری دارد و به راحتی جریان‌های سه بعدی با آن مدل‌سازی می‌شود در علم هیدرولیک کاربرد وسیعی دارند. به‌عنوان نمونه Zheng et al. (2004) با استفاده از یک مدل فیزیکی - هیدرولیکی سه بعدی و مدل WASP پارامترهای کیفی دهانه رودخانه ساتیلا واقع در جورجیا را شبیه‌سازی کردند.

آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های فیزیکی دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به هزینه بالا، زمان‌بر بودن انجام آزمایش، عدم امکان انجام سناریوهای زیاد و پیچیده، محدود بودن صحت و سقم نتایج به منطقه و شرایط آزمایش اشاره نمود (Nozari et al., 2017). لذا از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به عنوان طرح توسعه‌یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده

کرد (Mostafazadeh-fard et al., 2009). لازم به ذکر است، علاوه بر هزینه بالا و صرف زمان زیاد در بررسی‌های آزمایشگاهی، ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش در طول تحقیق نیز بسیار دشوار است. از این‌رو تلاش‌های بسیاری به‌منظور توسعه مدل‌های کامپیوتری در بخش مذکور صورت گرفته است. به عنوان نمونه Gomez and Pelletier (2009) با مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه ماکاکو در منطقه ریودوژانیرو بوسیله مدل QUAL2K کاهش شدید کیفیت آب این رودخانه را در سال‌های آتی پیش‌بینی کردند.

Lai et al. (2013) به توسعه مدل WASP جهت برآورد مواد معلق و شاخص آلودگی رودخانه کائوپینگ در تایوان پرداختند و نشان دادند که بین نرخ جریان رودخانه، کیفیت آب و شاخص آلودگی ارتباط خطی وجود دارد.

اگرچه نرم‌افزارهایی نظیر QUAL2K، QUAL2E، WASP، و HEC-5Q توانایی شبیه‌سازی همه جانبه روند آلودگی آب در رودخانه را دارا می‌باشند، اما این مدل‌ها نیازمند پارامترهای ورودی زیادی هستند که دسترسی به آنها مشکل بوده و یا اندازه‌گیری آنها نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد. از طرفی عموماً داده‌های موجود برای این مدل‌ها کافی و مناسب نیست (ابریشم‌چی، ۱۳۸۳). از جمله محدودیت‌های دیگر این مدل‌ها می‌توان به عدم توانایی و دشواری شبیه‌سازی منابع آلودگی غیرماندگار اشاره نمود (Gonçalves and Giorgetti, 2013). لذا زمانی که یک بار آلودگی به صورت ناگهانی وارد رودخانه می‌شود و یا در مسیر روندیابی ایستگاه پمپاژی قرار گرفته باشد، اینگونه مدل‌ها عملکرد مناسبی نخواهند داشت.

یکی از روش‌های بسیار موثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها، روش پویایی سیستم است که از روش‌های قدرتمند و بصری شبیه‌سازی می‌باشد (نوذری و همکاران، ۱۳۹۲). این روش اولین بار توسط فاستر جهت درک بهتر مسائل استراتژی در سیستم‌های پویای پیچیده و همچنین عدم قطعیت در مدیریت سیستم‌ها ابداع گردید (Forrester 1961). مدل‌هایی که با این روش نوشته می‌شوند، با بینش فرآیندهای بازخورد،

متعددی از جمله DO, BOD, pH, نیترات، نیتريت، دما، و سایر پارامترهای کیفی پرداختند و در نهایت بیان داشتند که استفاده از VENSIM PLE به عنوان یک ابزار بنیادی در توسعه مدل‌های زیست محیطی راه حل بسیار مناسبی می‌باشد.

Ahmadi et al. (2014) توسط روش تحلیل پویایی سیستم و با بهره‌گیری از مدل برنامه نویسی VENSIM، به بررسی عملکرد سد ذخیره‌ای کوثر برای جمع‌آوری سیلاب و برآورد نیازهای موجود در طول دوره آماری سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲ پرداختند. نتایج نشان داد که روش تحلیل پویایی سیستم جایگزین خوبی برای سیستم‌های شبیه‌سازی معمولی بوده و دارای مزیت‌هایی از جمله افزایش سرعت توسعه مدل، سهولت اصلاح ساختار آن، توانایی انجام آنالیز حساسیت و ارتباط مؤثر بین اجزا می‌باشد.

Sadeghi khalegh abadi et al. (2014) به تجزیه و تحلیل و توسعه پایدار منابع آب در حوضه آبریز کرخه با استفاده از نرم‌افزار VENSIM پرداختند و یک مدل جامع پویایی را برای این حوضه بسط دادند که شامل زیر بخش‌های جمعیت، فعالیت‌های اقتصادی، تقاضای آب و منابع آب می‌باشد. Nozari et al. (2014) از روش تحلیل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی الگوی کشت و عملکرد محصول در شبکه آبیاری سمت راست آبشار اصفهان استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که این روش در شبیه‌سازی شبکه آبیاری، الگوی کشت و تعریف سناریوهای دیگر عملکرد قابل قبولی را دارد.

آگاهی از کیفیت منابع آب سطحی یکی از نیازمندی‌های مهم در برنامه‌ریزی و توسعه منابع آب و حفاظت و کنترل آنها می‌باشد. برای آگاهی از کیفیت آب سطحی باید پس از تخلیه آلودگی، روندیابی کیفی صورت پذیرد. با روندیابی کیفی آب می‌توان کیفیت مناسب منابع آب را برای کاربری‌های مختلف تضمین نمود. بنابراین روندیابی کیفیت آب رودخانه‌ها اولین و مهمترین مرحله در مدیریت کیفی آب می‌باشد، زیرا نگرش تحلیل‌گر را نسبت به روند و چگونگی تغییرات آلودگی نسبت به زمان، مکان و شرایط خاص روشن

کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند. زمینه‌های کاربردی این روش بسیار وسیع بوده و استفاده از آن در تحقیقات آب نیز صورت گرفته که می‌توان به تحقیقات (Mirch et al. (2012) اشاره نمود. این محققین از روش مذکور به منظور برنامه‌ریزی و خط مشی کلی مسائل منابع آب استفاده نمودند.

Smedt et al. (2005) در تحقیقی در رودخانه چیلان شیلی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم و در محیط برنامه نویسی VENSIM اقدام به شبیه‌سازی روند کیفیت آب این رودخانه در مسافت طولانی نمودند. آنها با تزریق ماده ردیاب رودامین ۲۰ درصد به صورت پالس به رودخانه نشان دادند که این ماده با الگوی زمانی خاصی غلظت آن در محیط افزایش می‌یابد و با اتمام مدت زمان بارگذاری در اثر پدیده پخشیدگی نمودار غلظت یکنواخت‌تر می‌شود. به عبارت دیگر هر چه زمان جلوتر می‌رود پروفیل غلظت در رودخانه بیشتر پخش شده و پروفیل غلظت به سمت حالت ماندگار حرکت می‌کند. آنها نشان دادند که روش پویایی سیستم کارایی مناسبی جهت روندیابی کیفیت آب در مسافت‌های طولانی دارا می‌باشد.

Wei et al. (2012) در تحقیقی برای ارزیابی اثرات اجتماعی و اقتصادی در سطوح مختلف تخصیص جریان زیست محیطی در حوضه رودخانه ویه در چین از روش پویایی سیستم استفاده کردند. آنها از چهار الگو برای رشد اجتماعی و اقتصادی و چهار الگو برای تخصیص آب زیست محیطی بهره بردند و نشان دادند که مدل توسعه یافته پویایی سیستم عملکرد مناسبی در انعکاس رفتار دینامیکی سیستم در منطقه مورد مطالعه دارد. همچنین یک الگوی بهینه رشد شرایط اجتماعی و اقتصادی در منطقه همراه با تخصیص آب زیست محیطی با مقایسه بین سناریوهای مختلف به دست آوردند.

Gonçalves and Giorgetti (2013) به شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در شرایط ماندگار و غیرماندگار با استفاده از نرم‌افزار VENSIM PLE پرداختند. این محققین به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی

پارامترهای مؤثر بر مکانیزم انتقال و صحت‌سنجی آن دشوار می‌باشد (Batu, 2005). راه‌های تحلیلی بر اساس مفاهیم ریاضی و فیزیکی استخراج شده و فارغ از خطاهای موجود در روشهای عددی (خطاهای ناشی از ایجاد مقدار انتشار که اغلب در شبیه‌سازی عددی اتفاق می‌افتد) می‌باشد (Park and Zhan, 2001). به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشات روندیابی، حل تحلیلی در برنامه‌نویسی مدل VENSIM ارایه و اجرا شده و حل تئوری آن نیز در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$C(x,t) = \begin{cases} C_i + (C_0 - C_i).A(x,t) & 0 \leq t \leq t_0 \\ C_i + (C_0 - C_i).A(x,t) - C_0.A(x,t-t_0) & t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$A(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-ut}{\sqrt{4.D_x.t}}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{ut}{D_x}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{x+ut}{\sqrt{4.D_x.t}}\right) \quad (2)$$

در این روابط C غلظت ماده حل شده در آب ($M.L$)، x فاصله طولی نقطه‌ای در پایین دست از محل ورود آلاینده (L)، t زمان (T)، C_i غلظت اولیه ($M.L^{-3}$)، C_0 غلظت تزریق ($M.L^{-3}$)، A سطح مقطع (L^2)، t_0 مدت زمان تزریق (T)، u سرعت جریان ($L.T^{-1}$) و D_x ضریب پخشیدگی طولی ($L^2.T^{-1}$) می‌باشد.

محیط برنامه‌نویسی

در این تحقیق، از محیط برنامه‌نویسی VENSIM DSS32 نسخه 4.0a که ابزاری برای مدل‌سازی به زبان پویایی سیستم و به صورت شی‌گرا بر پایه بازخورد می‌باشد، استفاده می‌شود. این ابزار مدل‌سازی، امکان ایجاد مدل‌های پیچیده را با سهولت بیشتری نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم بوجود می‌آورد.

یکی از مراحل اصلی مدل‌سازی به روش پویایی سیستم ترسیم نمودارهای علی و معلولی است. این نمودارها ابزاری مناسب برای ترسیم ساختار بازخوردی سیستم‌ها که متأثر از رفتار گذشته خود بوده و از نتایج آن در رفتار آینده استفاده می‌نماید، می‌باشند. رابطه علی با دو علامت مثبت و منفی نشان داده می‌شود. در صورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک جهت باشند رابطه علی مثبت و در صورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته عکس یکدیگر باشند رابطه علی منفی خواهیم داشت. پس از ترسیم نمودارهای علی و معلولی

می‌سازد. از طرفی مدل‌های فیزیکی نمونه‌ای از طرح واقعی در ابعاد کوچک می‌باشند، و به‌راحتی می‌توان رفتارهای هیدرولیکی - دینامیکی را با رودخانه‌ها منطبق کرد و جریان‌های سه بعدی را با آن مدل‌سازی نمود.

در تحقیقات انجام گرفته، بررسی روند کیفیت آب رودخانه به روش پویایی سیستم کمتر مورد توجه محققین بوده است. لذا با توجه به مطالعات صورت گرفته و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، در این تحقیق تصمیم به استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم برای شبیه‌سازی روند تغییرات کیفی آب گرفته شد. از طرفی جهت صحت‌سنجی نتایج مدل، یک کانال فرعی آبیاری واقع در شهرستان نهاوند، که شرایط آن کاملاً تحت کنترل بود، انتخاب گردید تا به‌عنوان یک مدل فیزیکی، نماینده‌ای از شرایط واقعی در رودخانه باشد.

مواد و روش‌ها

معادله حاکم بر پدیده انتشار آلودگی

معادله حاکم بر انتقال آلودگی در محیط‌های آبی اعم از رودخانه‌ها و جریان‌های زیرسطحی، در حالات یک، دو و سه بعدی، معادله انتقال می‌باشد. بنابراین حل تحلیلی و یا عددی آن می‌تواند در تفسیر نحوه توزیع غلظت ماده آلوده‌کننده و رفتار آن در یک محیط باز مانند هوا، رودخانه و محیط متخلخل مؤثر واقع شود. به‌منظور پیش‌بینی نحوه توزیع زمانی و مکانی غلظت مواد آلاینده در رودخانه‌ها، باید معادلات دیفرانسیل جریان و انتقال حل شوند. حل این معادلات تحت شرایطی که فرضیات ساده‌کننده در معادلات اعمال شوند، به صورت تحلیلی امکان‌پذیر خواهد بود. اما به دلیل پیچیدگی رفتار واقعی یک سیستم در طبیعت و ورود پارامترهای بسیار زیادی که در حل مسأله دخیل هستند، ارائه یک راه حل تحلیلی بسیار پیچیده و دشوار می‌باشد. به‌منظور پیش‌بینی حرکت آلودگی و پایش آن و همچنین مدیریت کیفیت آب استفاده از راه‌های تحلیلی ارجحیت دارند. چرا که در روش‌های عددی بدلیل پیچیدگی سیستم‌های هیدرولوژیکی، تعیین

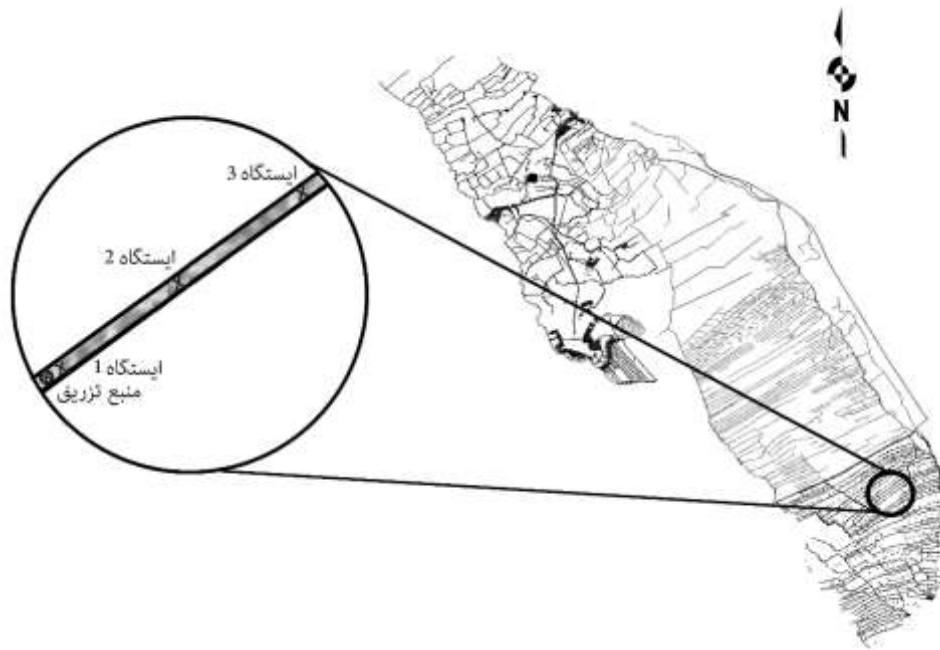
اعتبارسنجی مدل

پس از ایجاد مدل شبیه‌سازی، باید بتوان اعتبار آن را تایید کرد. در این قسمت به کمک آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده از یکی از کانال‌های فرعی آبیاری نهر شعبان شهرستان نهاوند واقع در استان همدان در سال ۱۳۹۵، اعتبار مدل کنترل می‌شود. در این تحقیق بازه مستقیم و بدون نقطه خروجی از کانال آبیاری درجه ۳ که دارای طولی حدود ۴۶۸/۸ متر بود انتخاب گردید. عرض بستر کانال آبیاری ۴۳ سانتی‌متر و سرعت متوسط آب در کانال ۲/۶ متر بر ثانیه بود. شیب متوسط کف کانال ۰/۷۶ درصد و جنس بستر کانال آبیاری از بتن می‌باشد (شکل ۱). همچنین موقعیت هر یک از ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است

باید نمودارهای حالت و جریان را ترسیم نمود. در واقع حالت‌ها انباشتگی‌های سیستم می‌باشند و نشان دهنده وضعیت سیستم بوده و تصمیمات و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها صورت می‌گیرد. جریان‌ها نیز نرخ‌های تغییر را نشان می‌دهند یعنی نشان دهنده فرآیندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن تصمیمات اعمال می‌شود. نمودارهای علی و معلولی همراه با بازخورد دو مفهوم اساسی تئوری تحلیل پویایی سیستم می‌باشند (Nozari et al., 2014).



شکل (۱): کانال فرعی آبیاری نهر شعبان



شکل (۲): موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

آب در هر ایستگاه (m)، g شتاب ثقل ($m.s^{-2}$) و نهایتاً S شیب کف کانال ($m.m^{-1}$) می‌باشد.

از ماده سدیم کلرید ($NaCl$) به عنوان ردیاب جهت بررسی مکانیسم انتشار آلودگی استفاده گردید. هدایت الکتریکی سدیم کلرید در لحظه تزریق $۰/۷۴۶$ میلی-موس بر سانتی‌متر بود که این ماده به صورت پیوسته و در مدت زمان ۲۰ دقیقه به کانال آبیاری تزریق شد و حدود ۳۰ دقیقه از ایستگاه‌های مورد نظر نمونه‌برداری صورت گرفت. سنجش ماده ردیاب در منطقه مورد مطالعه در سه ایستگاه نمونه‌برداری و هر یک دقیقه یکبار صورت گرفت. در جدول ۱ مشخصات سه ایستگاه نمونه‌برداری که شامل فاصله از نقطه تزریق ماده ردیاب (X)، شیب (S)، عمق آب (h) و سرعت متوسط آب (V) می‌باشد، ارائه شده است.

جهت اندازه‌گیری سرعت آب در عمق‌های مختلف، از دستگاه مولینه در هر یک از ایستگاه‌های نمونه‌برداری استفاده شد. همچنین عمق آب در هر ایستگاه به وسیله یک خط کش مدرج اندازه‌گیری شد. برای تعیین شیب کف کانال در هر ایستگاه از دوربین تراز یاب نیوو استفاده گردید.

برای تعیین ضریب پخشیدگی طولی (D_x) از رابطه تجربی (Kashefipour and Falconer (2002) استفاده گردید (رابطه ۳).

$$D_x = 10.612 \cdot \left(\frac{V}{V_*}\right) \cdot h \cdot V \quad (3)$$

$$V_* = (g \cdot h \cdot S)^{0.5} \quad (4)$$

در این روابط V سرعت متوسط آب در هر ایستگاه نمونه‌برداری ($m.s^{-1}$)، V_* سرعت برشی ($m.s^{-1}$)، h عمق

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

ایستگاه نمونه‌برداری	X (m)	S ($m.m^{-1}$)	h (m)	V ($m.s^{-1}$)	V_* ($m.s^{-1}$)	D_x ($m^2.s^{-1}$)
۱	۱۶/۵	بدون شیب	۰/۰۸	۲/۶	۰/۰۱۹۸	۷/۵۵۶
۲	۲۲۸	۰/۱۵۷	۰/۱	۲/۶	۱/۲۴	۵/۷۸۱
۳	۴۶۸/۸	۰/۶۰۵	۰/۰۶۵	۲/۶	۰/۷۵۹۵	۶/۱۳۹

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 داده‌های اندازه‌گیری شده و \bar{Y}_p میانگین داده‌های پیش‌بینی شده می‌باشد.

بحث و نتایج

پس از شبیه‌سازی روند کیفیت آب در کانال آبیاری، نتایج مدل به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده از کانال فرعی آبیاری نهر شعبان شهرستان نهاوند و در هر یک از سه ایستگاه نمونه‌برداری صحت‌سنجی شد. شکل‌های ۳ تا ۵ مقادیر روند تغییرات کیفیت آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را به ترتیب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری ۱ تا ۳ نشان می‌دهد. همچنین مقادیر شاخص‌های آماری $RMSE$ ، SE ، MAE و R^2 روندیابی کیفیت آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در کانال آبیاری، در جدول ۲ نشان داده شده است.

بعد از پایان سنجش، نمونه‌ها در شرایط استاندارد به آزمایشگاه منتقل و مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه‌گیری دمای آب و هدایت الکتریکی آن با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (EC متر) صورت پذیرفت.

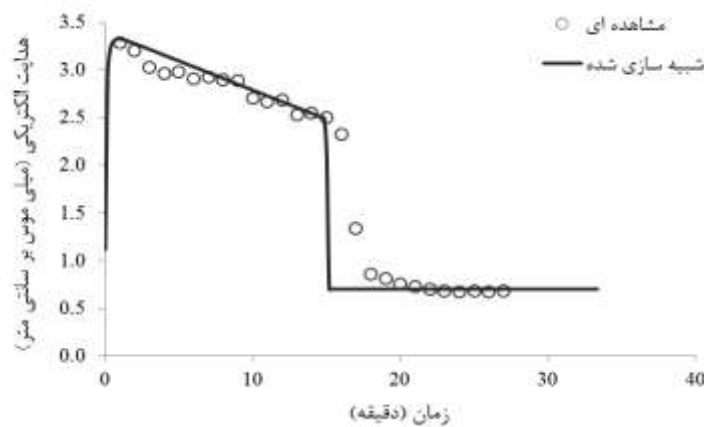
به‌منظور ارزیابی و اعتباریابی نتایج مدل نیز، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، خطای استاندارد (SE)، میانگین مربعات خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) به‌صورت زیر استفاده شد.

$$(۵) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}}$$

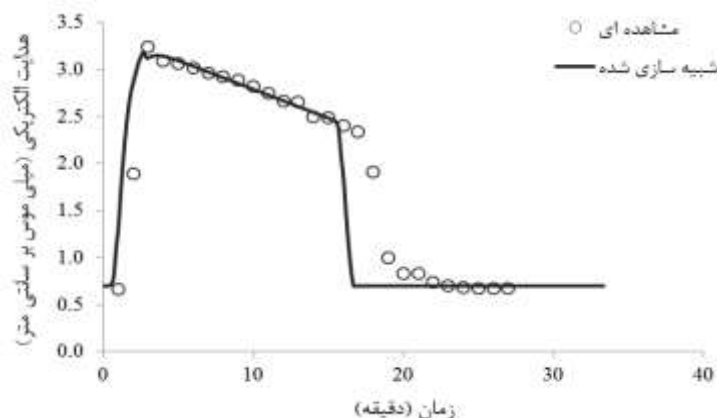
$$(۶) \quad SE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_m - Y_p)^2}}{\bar{Y}_m}$$

$$(۷) \quad MAE = \frac{\sum |Y_m - Y_p|}{n}$$

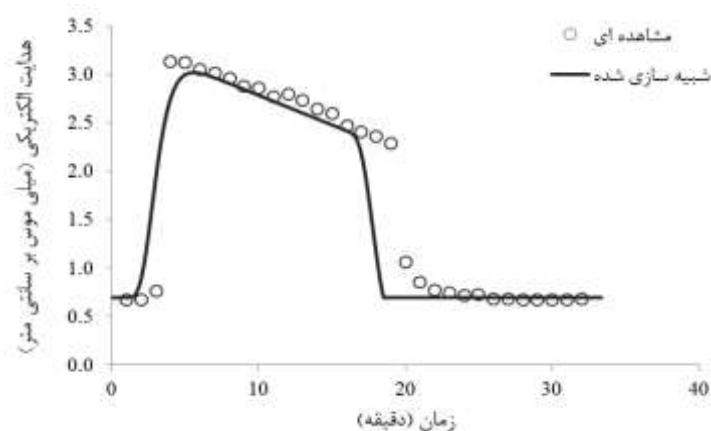
$$(۸) \quad R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_p - \bar{Y}_p)]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Y_p - \bar{Y}_p)^2}$$



شکل (۳): مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روندیابی کیفیت آب کانال آبیاری در ایستگاه ۱



شکل (۴): مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روندیابی کیفیت آب کانال آبیاری در ایستگاه ۲



شکل (۵): مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روندیابی کیفیت آب کانال آبیاری در ایستگاه ۳

جدول (۲): مقادیر شاخص‌های آماری مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روندیابی کیفیت آب کانال آبیاری

ایستگاه نمونه‌برداری	RMSE (mmohs/cm)	SE	MAE (mmohs/cm)	R ²
۱	۰/۳۵	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۹۰
۲	۰/۴۷	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۸۱
۳	۰/۴۳	۰/۲۴	۰/۱۹	۰/۸۴

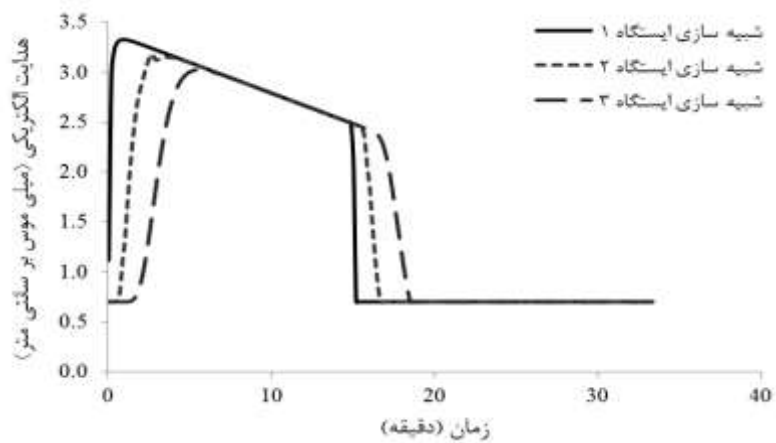
برای ایستگاه سوم با بیشینه هدایت الکتریکی ۳/۱۴ میلی‌موس بر سانتی‌متر برابر با ۴ دقیقه بوده است. پس از آن با گذشت زمان، در اثر پدیده پخشیدگی نمودار هدایت الکتریکی یکنواخت‌تر می‌شود. به عبارت دیگر با گذشت زمان، پروفیل هدایت الکتریکی در رودخانه بیشتر پخش شده و پروفیل آن به سمت حالت ماندگار حرکت می‌کند.

با توجه به جدول ۲، بیشترین تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ایستگاه اول و کمترین انطباق در ایستگاه نمونه‌برداری دوم می‌باشد.

همانطور که از شکل‌های ۳ تا ۵ نمایان است قبل از تزریق ماده ردیاب (سدیم کلرید)، هدایت الکتریکی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری حداقل مقدار خود بود. پس از تزریق، هدایت الکتریکی ماده ردیاب با الگوی زمانی خاصی افزایش یافته است. پس از گذشت ۳۰ ثانیه، میزان هدایت الکتریکی در ایستگاه اول به بیشینه مقدار خود یعنی ۳/۳ میلی‌موس بر سانتی‌متر رسید. بیشینه مقدار هدایت الکتریکی برای ایستگاه نمونه‌برداری دوم که برابر با ۳/۱۸ میلی‌موس بر سانتی‌متر بود، بعد از گذشت ۲ دقیقه و ۴۰ ثانیه به وجود آمد. این شرایط

است در ایستگاه سوم تاثیر عامل زمان در توسعه پروفیل هدایت الکتریکی و کاهش دامنه آن به علت تاثیر ضریب پراکندگی تا رسیدن به یک حالت پایدار در مقایسه با ایستگاه اول مشهود می‌باشد. می‌توان گفت میزان هدایت الکتریکی آب در ایستگاه دوم نسبت به ایستگاه اول حدود $0/17$ میلی‌موس بر سانتی‌متر و در ایستگاه سوم نسبت به ایستگاه دوم حدود $0/12$ میلی‌موس بر سانتی‌متر، کاهش یافته است. همچنین مدت زمان رسیدن بیشینه هدایت الکتریکی از ایستگاه اول به دوم حدود ۲ دقیقه و از ایستگاه دوم به سوم حدود ۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه بوده است.

Kalburgi et al. (2015) در تحقیقی در رودخانه گاتابراها هند، مقدار شاخص SE را برای پارامترهای BOD و DO در مرحله واسنجی به ترتیب $0/612$ و $0/718$ و در مرحله اعتباریابی $0/919$ و $0/648$ بدست آوردند و دقت مدل را خوب ارزیابی کردند. با توجه به مقادیر RMSE، MAE، خطای استاندارد و ضریب تبیین می‌توان انطباق بین نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را در تحقیق حاضر بسیار خوب ارزیابی کرد. شکل ۶ مقادیر روند تغییرات کیفیت آب شبیه‌سازی شده را در ۳ ایستگاه نمونه‌برداری در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده



شکل (۶): مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده روندیابی کیفیت آب کانال آبیاری در هر ۳ ایستگاه

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق با استفاده از تکنیک تحلیل پویایی سیستم و استفاده از محیط برنامه‌نویسی VENSIM، روند تغییرات کیفی آب شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور واسنجی و اعتباریابی نتایج مدل نیز از آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده از یکی از کانال‌های فرعی آبیاری نهر شعبان واقع در شهرستان نهاوند در سال ۱۳۹۵ استفاده گردید. بازه مورد مطالعه کانال فرعی آبیاری ۴۶۸/۸ متر بود که در آن تزریق ماده کلرید سدیم با هدایت الکتریکی ۰/۷۴۶ میلی‌موس بر سانتی‌متر به مدت ۲۰ دقیقه صورت گرفت و در ۳ ایستگاه با فواصل معین نمونه‌برداری انجام پذیرفت. شرایط کانال مذکور کاملاً تحت کنترل قرار داشت، تا به‌عنوان یک مدل فیزیکی، نماینده‌ای از شرایط واقعی در رودخانه باشد. میزان برازش میان مقادیر واقعی و

شبیه‌سازی شده روند تغییرات کیفیت آب، با محاسبه شاخص‌های آماری RMSE، SE، MAE و R^2 محاسبه گردید. بهترین انطباق نتایج مدل با داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه اول، و کمترین انطباق در ایستگاه نمونه-برداری دوم بود. مقدار این شاخص‌ها به ترتیب در ایستگاه اول برابر با ۰/۳۵، ۰/۱۸، ۰/۱۳ و ۰/۹۰ و در ایستگاه دوم ۰/۴۷، ۰/۲۴، ۰/۲۲ و ۰/۸۱ برآورد گردید. نتایج حاکی از توانایی مدل در شبیه‌سازی روند کیفی آب داشت.

از قابلیت مدل تهیه شده در این تحقیق علاوه بر نمایش تغییرات تمامی پارامترهای مؤثر در سیستم نسبت به زمان، می‌توان به افزایش سرعت ایجاد مدل، سادگی اصلاح ساختار مدل در واکنش به تغییرات سیستم، روندیابی کیفیت آب رودخانه، بهینه‌سازی، قابلیت تحلیل حساسیت و صرف زمان کمتر در اجرای برنامه اشاره کرد.

منابع

- ابریشم‌چی، ا. ۱۳۸۳. مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن چند منظوره با استفاده از روش پویایی سیستم. نشریه آب و فاضلاب، جلد ۵۷، ص ۴۷-۵۸.
- مفتاح هلقی، م. ۱۳۸۸. برآورد حداکثر بار آلودگی مجاز قابل تخلیه به گرگان‌رود. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۶، شماره ۱، ص ۳۵-۱۹.
- نوذری، ح.، م. حیدری و س. آزادی. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی در مدیریت‌های مختلف آبیاری با روش تحلیل پویایی سیستم. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۷، شماره ۴، ص ۵۷۵-۵۶۵.
- Ahmadi, M. H., R. Rajabpour, F. Raeiszadeh and S. Farzin. 2014. Investigation the effects of reservoir operation on providing different demands by System dynamics (Case study: Kowsar dam in Iran). *International Journal of Scientific Research and Management*, 2(14): 1807-1811.
- Batu, V. 2005. *Applied flow and solute transport modeling in aquifers, fundamental principles and analytical and numerical methods*. CRC Press.
- Forrester, J. W. 1961. *Industrial dynamics*, Productivity Press, Portland, OR.
- Gomez, S. and G. j. Pelletier. 2009. A modeling framework for simulation macacu river in Rio de janiero. *Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, ASCE J. Irrg. Drain Eng.* 126(6): 381-388.
- Gonçalves, J. C. and M. F. Giorgetti. 2013. Mathematical model for the simulation of water quality in rivers using the VENSIM PLE® software. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(1): 48-63.
- Kalburgi, P. B., R.N. Shareefa and U. B. Deshannavar. 2015. Development and evaluation of BOD-DO model for River Ghataprabha near Mudhol (India), using QUAL2K. *Journal of Engineering and Manufacturing*, 1: 15-25.
- Kashefipour, S. M. and R. A. Falconer. 2002. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. *Water Research*, 36: 1596-1608.

Lai, Y. C., Y. T. Tu, C. P. Yang, R. Y. Surampalli and C. M. Kao. 2013. Development of a water quality modeling system for river pollution index and suspended solid loading evaluation. *Journal of Hydrology*, 478: 89-101.

Mirch, A., K. Madani, D. Watkins and S. Ahmad. 2012. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resource Management*, 26: 2421-2442.

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. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 135(1): 32-38.

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. *Journal of Sustain. Water Resour. Manag.* 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. *Irrig. Drain. Eng.* 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000777.

Park, E. and H. Zhan. 2001. Analytical solutions of contaminant transport from finite one, two, and three dimensional sources in a finite thickness aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 53(1): 41-61.

Sadeghi khalegh abadi, L., A. Shamsai and H. Goharnejad. 2014. An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model. *Journal of Civil Engineering*, 19(6): 1941-1949.

Smedt, F., W. Brevis and P. Debels. 2005. Analytical solution for solute transport resulting from instantaneous injection in streams with transient storage. *Journal of Hydrology*, 315: 25-39.

Wei, S. H., H. Yong, J. Song, K. Abbaspour and Z. Xu. 2012. System dynamics simulation model for assessing Socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. *European Journal of Operational Research*, 221: 248-262.

Zheng, L., C. Chen and F. Y. Zhang. 2004. Development of water quality model in the Satilla River Estuary, Georgia. *Journal of Ecological Modelling*, 178(3): 457-482.

Simulation of the quality process of Nahr shaaban irrigation channel using system dynamics approach

Hamed Nozari¹, Saeed Azadi², Neda Mazoji³

Abstract

Using computer models in order to investigation of pollution changes in the rivers is essential. The first step in protecting water resources is the comprehensive awareness of their quality. So, in this research using system dynamics approach to developed computer model in the VENSIM programming environment, which can simulate the process of changing water quality in 468.8 m from the detector source. In order to calibrate and validate the model results, data collected from one of the irrigation channels of Nahavand (Nahr Shaaban) in Hamedan were used. After statistical analysis and calculation of RMSE, SE, MAE and R^2 , the fit between measured and simulated was calculated. In the irrigation channel, sodium chloride with electrical conductivity of 0.746 mmohs/cm was injected for 20 minutes and there were three sampling stations. The best fit of the model results with measured data was at the distance of 12.5 m (the first sampling station), and the lowest adaptation was in the second sampling station at the distance of 228 m from the injection source. The values of statistical indexes in the first sampling station were 0.35 mmohs/cm, 0.18, 0.13 mmohs/cm and 0.90, and at the second sampling station were 0.47 mmohs/cm, 0.24, 0.22 mmohs/cm and 0.81, respectively. The results showed that the model has good accuracy in simulation of water quality process.

Keywords: Pollution, Simulation, Sodium Chloride, VENSIM Software

¹ Associate Professor, Dept. of Water science engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran. (corresponding Author). E-mail: hanozari@yahoo.com

² Ph.D Student of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.

³ M.Sc. Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Univ., Hamedan, Iran.