

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌های کیفی رودخانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مطالعه‌ی موردی: رودخانه‌ی زاینده‌رود

حمیدرضا صفوی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

کاربرد مدل‌های کیفی رودخانه‌ها به‌طور روزافزونی گسترش یافته و کالیبراسیون و صحت‌سنجی این مدل‌ها اهمیتی خاص برای پیش‌بینی وضعیت آبی رودخانه و نحوه مدیریت صحیح بر آن‌ها دارد. در این نوشتار یک الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر بهینه‌ی ضرایب واکنش پارامترهای کیفی BOD و DO در رودخانه‌ی زاینده‌رود با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2K ارائه شده است. تابع هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات تفاوت بین داده‌های مشاهده‌شده با مقادیر شبیه‌سازی‌شده برای تعیین ثابت‌های مصنوعی واکنش‌های بیوشیمیایی (k_1)، هوادهی (k_2) و کاهش برآثر ته‌نشینی (k_3) است. قیدهای مربوط به فضای جستجوی هر ثابت اعمال شده و مدل بهینه‌سازی به‌صورت درون‌گذار به‌دلیل در دسترس بودن مدل شبیه‌ساز QUAL2K در صفحات گسترده اجرا شد. ثابت مصنوعی بیوشیمیایی (k_1) در طول بازه‌های مختلف رودخانه‌ی زاینده‌رود از 0.2 تا 1 day^{-1} ، 3.27 ، ثابت هوادهی (k_2) از 0.82 تا 22.13 day^{-1} و ثابت کاهش برآثر ته‌نشینی (k_3) از 0.6 تا 4.27 day^{-1} تغییر می‌کند. مرحله‌ی صحت‌سنجی نیز نشان‌گر دقت قابل قبول در کاربرد مقادیر ثابت‌های کالیبره‌شده در مدل کیفی رودخانه‌ی زاینده‌رود است.

واژگان کلیدی: کیفیت رودخانه، مدل‌سازی، الگوریتم ژنتیک، کالیبراسیون، صحت‌سنجی، زاینده‌رود.

hasafavi@cc.iut.ac.ir

مقدمه

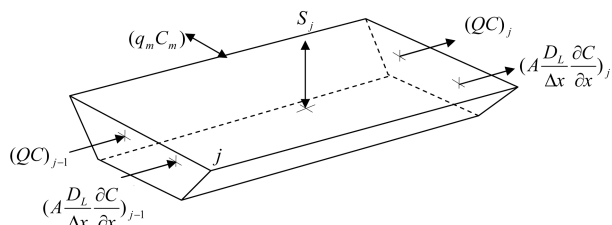
است؛ از جمله سه الگوریتم مختلف گرادبان مزدوج^[۱]، روش مارکواردت^[۲] و بیشترین کاهش^[۳] برای تعیین ضریب پخشیدگی طولی در مدل پیش‌روی شوری درخورها به‌کار رفته است.^[۱] همچنین از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی برای کالیبراسیون مدل QUAL2E استفاده شده است.^[۲] پژوهشگرانی^[۳] نیز در بررسی‌هایی در رابطه با قابلیت کاربرد الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون مدل استریرو فلیس، روش ارزیابی به‌هم آمیخته‌ی پیچیده^[۴] برای کالیبراسیون مدل SWAT^[۴] و نیز تحلیل حساسیت کالیبراسیون مدل‌های کیفی رودخانه‌ها در حالت دینامیکی^[۵] را به‌کار بردند.

استفاده از الگوریتم‌های جدید بهینه‌سازی برای کالیبراسیون مدل‌های کیفی رودخانه‌ها به‌دلیل سادگی کاربرد و دقت بالای آن‌ها اهمیت ویژه‌ی دارد. در این میان روش الگوریتم ژنتیک به دلیل کاربرد آن در مقیاس‌های بزرگ، مسائل پیچیده و غیرخطی و نیز استفاده‌نکردن از مشتق توابع، کاربرد گسترده‌ی در مسائل مدیریت کیفی منابع آب دارد.^[۶]

کاربرد مؤثر روش الگوریتم ژنتیک بستگی به انتخاب صحیح عملگرهای آن دارد. عملگرهای GA عبارت‌اند از: جمعیت اولیه، نمونه‌گیری، احتمال جهش ژنتیکی و تلفیق. تحقیقات گسترده‌ی نیز در زمینه‌ی اهمیت عملگرهای GA در انتخاب بهینه‌ی پارامترهای مدل انجام شده است. بیشترین تحقیقات انجام‌شده روی مدل‌سازی فرایند

مدل‌های کیفی رودخانه‌ها برای بررسی وضعیت موجود، تأثیر فعالیت‌های آبی بر آن، بررسی اقدامات اصلاحی و مدیریتی بر کیفیت آب رودخانه‌ها به‌کار می‌رود. در دو دهه‌ی اخیر مدل‌های ریاضی گوناگونی بر اساس شناخت کلیه‌ی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در رودخانه‌ها توسعه یافته و در رودخانه‌های مختلف دنیا استفاده شده است که هر کدام بسته به شرایط کاربردی آن از نظر تعداد پارامترهای با قابلیت مدل‌سازی، تغییرات مکانی و زمانی، یک یا چند بُعدی بودن، تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و مکانیزم‌های اندرکنش‌های رودخانه با بستر و دیوارها تقسیم‌بندی می‌شوند. لذا پس از انتخاب نوع مدل مناسب با شرایط فیزیکی رودخانه‌ی مورد مطالعه و جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌های مورد نیاز برای اجرای آن، مهم‌ترین گام در فرایند مدل‌سازی، کالیبراسیون مدل بر اساس ثابت‌های واکنش‌های آن است. کالیبراسیون مدل‌های کیفی رودخانه‌ها با مقایسه‌ی نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل با داده‌های مشاهده‌شده، به‌صورت سنتی و با روش سعی و خطا انجام می‌شود. این روش علاوه بر صرف وقت زیاد ممکن است به نتیجه‌ی بهینه منجر نشود. تحقیقات زیادی در رابطه با روش‌های بهینه‌سازی برای کالیبراسیون مدل‌ها انجام شده

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۴/۲۵، داوری ۱۳۸۶/۱۲/۷، پذیرش ۱۳۸۷/۷/۳۰.



شکل ۱. تعادل جرمی در المان زام.

در معادله ۱، تغییرات جرم در زمان، $\frac{\partial M_j}{\partial t}$ ، در المان زام برابر با تفاوت بین دبی جرمی ورودی، $\left(\frac{AD_L}{\Delta x} \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)\right)_{j-1}$ ، با دبی جرمی خروجی، $\left(\frac{AD_L}{\Delta x} \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)\right)_j$ ، به علاوه انتقال ورودی، $(A\bar{U}C)_j$ ، منهای انتقال خروجی، $(A\bar{U}C)_{j-1}$ ، و واکنش، $\frac{\partial C}{\partial t}$ ، و نهایتاً ترم انتقال جرم در اثر چشمه یا چاه، S_j ، به المان است. در شرایط دائمی $\frac{\partial M_j}{\partial t} = 0$ است. فرم تفاضلات محدود معادله ۱ برای کلیه المان‌های محاسباتی اعمال شده در رودخانه به‌کار رفته است و با اجرای مدل شبیه‌سازی بر اساس شرایط اولیه و شرایط مرزی و نیز دبی و غلظت آلاینده‌های ورودی یا خروجی از المان‌ها، می‌توان توزیع غلظت آلاینده، C_j ، را در طول رودخانه به‌دست آورد.

مقدار $\frac{\partial C}{\partial t}$ تابع واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی است که در طول رودخانه اتفاق می‌افتد. در بررسی روند تغییرات اکسیژن محلول، DO و میزان اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی، BOD در طول رودخانه معادلات تغییر نرخ به صورت ساده عبارت‌اند از:

$$\frac{do}{dt} = k_2(o_s - o) - k_1 L \quad (2)$$

$$\frac{dL}{dt} = -k_1 L - k_2 L \quad (3)$$

که در آن‌ها، o غلظت اکسیژن محلول (mg/L)؛ o_s غلظت اشباع اکسیژن در دما و فشار محل (mg/L)؛ k_2 ثابت سرعت هوادهی (day^{-1})؛ k_1 ثابت سرعت واکنش بیوشیمیایی (day^{-1})؛ L غلظت BOD (mg/L)؛ k_2 ثابت سرعت کاهش BOD در اثر ته‌نشینی (day^{-1}).

لذا در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه شامل اکسیژن محلول و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی به ۳ ثابت واکنش k_1 ، k_2 و k_3 نیاز است، که روابط تجربی نیز برای تخمین آن‌ها وجود دارد، ولی به هر جهت این ثابت‌ها عواملی برای کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی هستند و به روش سعی و خطا با اجرای پی‌درپی مدل شبیه‌سازی در طی فرایند کالیبراسیون می‌توان آن‌ها را تعیین کرد.^[۱۵] به دلیل این که فرایند سعی و خطای مدل شبیه‌سازی برای تعیین ثابت‌های مصنوعی بسیار وقت‌گیر و طولانی است، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی برای کالیبراسیون مدل و تعیین این ثابت‌ها مورد توجه قرار گرفته و در این تحقیق به تعیین مقادیر بهینه ثابت‌های مصنوعی k_1 ، k_2 و k_3 با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک شیوه‌ی از بهینه‌سازی است که نشأت‌گرفته از اصل «نجات قوی‌ترها»^[۱۶] در بین جانداران در طبیعت است.^[۱۷] در این روش از یک جمعیت اولیه از جواب‌های ممکن مسئله به صورت تصادفی درون دامنه‌ی مسئله انتخاب می‌شود. هر کدام از اعضای این جمعیت اولیه که به کروموزوم معروفند از لحاظ تطابق با تابع هدف

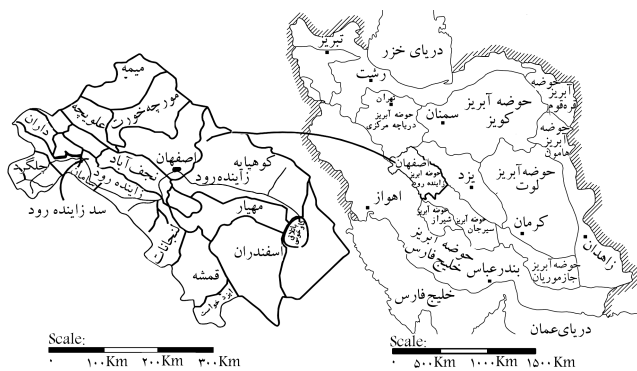
تبدیل بارش به رواناب بوده است. برخی پژوهشگران دریافتند که عملگرهای GA تأثیر عمده‌ی روی پارامترهای بهینه‌ی مدل ندارد و از طرفی انتخاب مقادیر بهینه‌ی عملگرهای GA از مسئله‌ی به مسئله‌ی دیگر تفاوت دارد،^[۱۷] ولی می‌توان مقادیر قابل قبول حدود جواب برتر برای عملگرهای مختلف GA (برای مقادیر جهش ژنتیکی و تلفیق) را تعیین کرد.^[۱۸] در سال ۲۰۰۳ نیز در بررسی نقش انتخاب عملگرهای GA روی کالیبراسیون مدل‌های کیفی رودخانه‌ها (در مثالی فرضی) این نتیجه حاصل شد که برخی پارامترهای کیفی نظیر اکسیژن محلول (DO) نسبت به مقادیر انتخابی برای عملگرهای GA حساس هستند.^[۹] همچنین از الگوریتم ژنتیک برای طراحی سیستم پایش کیفی رودخانه‌ها با تأکید بر کاربرد آن در رودخانه‌ی کارون استفاده شد،^[۱۹] و نیز برخی روش الگوریتم ژنتیک را در تخمین ضریب هوادهی (k_2) فقط برای پارامتر اکسیژن محلول (DO) با استفاده از مدل QUAL2E به‌کار بردند و با استفاده از مثالی فرضی به ازاء مقادیر مختلف عملگرهای GA، مقادیر بهینه‌ی ثابت واکنش را با تابع هدف حداقل مجموع مربعات خطاها تعیین کردند.^[۱۱] در این نوشتار کالیبراسیون هم‌زمان چند پارامتر کیفی رودخانه و همچنین بررسی آن با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری‌شده در رودخانه‌ی زاینده رود انجام شده است. ضرایب ثابت‌های مصنوعی پارامترهای کیفی DO و BOD در رودخانه‌ی زاینده‌رود به طور هم‌زمان با استفاده از روش GA کالیبره شده است. مدل به‌کار رفته برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه، مدل QUAL2K (نسخه‌ی جدیدی از QUAL2E) است که در محیط صفحات گسترده تهیه شده است.^[۱۳و۱۲]

مدل شبیه‌سازی کیفی رودخانه

مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت رودخانه‌ها در حقیقت بیان ریاضی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در رودخانه‌هاست. اغلب این مدل‌ها بر اساس اصل بقای جرم بنا شده‌اند. در حال حاضر، مدل‌های پیچیده‌ی برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و اندرکنش آن‌ها با یکدیگر به‌کار می‌رود. از جمله می‌توان به مدل‌های WASP۴، QUAL2E، QUAL2K اشاره کرد که به طور گسترده‌ی در غرب‌ال‌گری سیاست‌های مختلف در مدیریت کیفی رودخانه‌ها به‌کار می‌رود. در این تحقیق از مدل QUAL2K برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه استفاده شده است. این مدل علاوه بر توانایی‌های مدل QUAL2E که یک مدل شبیه‌سازی یک بُعدی ۱۵ پارامتری و به لحاظ هیدرولیکی دائمی و ناپیک‌ناخت با در نظر گرفتن بقای جرم و تعادل حرارتی و قابل استفاده برای بارهای نقطه‌ی و غیرمتمرکز است، دارای قابلیت‌های جدید شبیه‌سازی جلبک‌های کف‌زی، pH و پاتوژن‌ها نیز است و اندرکنش آب با رسوبات رودخانه را نیز مدل‌سازی می‌کند. در مدل QUAL2K رودخانه به ز المان کوچک گسسته می‌شود و معادله‌ی بقای جرم برای تعیین غلظت آلاینده‌ها به‌کار می‌رود. تبدلات جرم در المان زام به‌صورت شکل ۱ در نظر گرفته شده است و براساس آن معادله‌ی انتقال جرم به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial M_j}{\partial t} = \left[\left(AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)_j - \left(AD_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{j-1} \right] - \left[(A\bar{U}C)_j - (A\bar{U}C)_{j-1} \right] + V_j \frac{\partial C_j}{\partial t} + S_j \quad (1)$$

که در آن، M_j جرم آلاینده با غلظت $[M]C_j$ ؛ x_j راستای طولی رودخانه $[L]$ ؛ A_j سطح مقطع عرضی $[L^2]$ ؛ V_j حجم المان $[L^3]$ ؛ DL ضریب پخشیدگی $[L^2 T^{-1}]$ ؛ \bar{U} سرعت میانگین $[L T^{-1}]$ ؛ S_j دبی جرمی ورودی یا خروجی از المان $[M T^{-1}]$.



شکل ۲. موقعیت حوضه آبریز زاینده رود و رودخانه‌ی زاینده رود در آن.

با تونل‌های کوهرنگ و چشمه‌ی لنگان به این رودخانه اضافه می‌شود. تونل شماره ۱ یک کوهرنگ سالیانه به‌طور متوسط حدود ۳۰۰ میلیون مترمکعب آب از حوضه کارون به حوضه‌ی زاینده‌رود منتقل و تونل شماره ۲ دو نیز سالیانه حدود ۴۰۰ میلیون مترمکعب آب به حوضه‌ی زاینده‌رود منتقل می‌کند. حجم آب منتقل شده از طریق تونل چشمه‌ی لنگان نیز سالیانه حدود ۱۴۰ میلیون مترمکعب است. لذا با توجه به آورد طبیعی رودخانه‌ی زاینده‌رود، آورد سالیانه این رودخانه قبل از سد زاینده‌رود حدود ۱۷۷۰ میلیون مترمکعب و آورد طبیعی در پایین دست سد سالیانه حدود ۱۹۰ میلیون مترمکعب و در مجموع ۱۹۶۰ میلیون مترمکعب است.^[۱۷]

آب رودخانه‌ی زاینده‌رود در سه بخش عمده‌ی کشاورزی، شهری و صنعتی مصرف می‌شود که مجدداً مقداری از آن‌ها به‌صورت زهکشی از اراضی کشاورزی مجاور رودخانه و یا پساب‌های شهری و صنعتی به رودخانه‌ی زاینده‌رود وارد می‌شود. براساس آمارهای وزارت جهاد کشاورزی، سالیانه متجاوز از ۴۸۰۰ میلیون مترمکعب آب برای آبیاری اراضی مصرف و حدود ۷۱/۹٪ آب مصرفی از منابع زیرزمینی و ۲۸/۱٪ آب یعنی حدود ۱۳۵۰ میلیون مترمکعب از منابع سطحی تأمین^[۱۸] و همچنین سالیانه حدود ۲۱۰ میلیون مترمکعب برای مصارف شهری و مجموعاً حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب برای مصارف صنعتی (به‌دلیل وجود صنایع بزرگ و پراکنده‌ی کوچک در سطح حوضه) آب برداشت می‌شود.^[۱۷] لذا در مجموع میزان مصرف از این رودخانه در شرایط فعلی حدود ۱۶۶۰ میلیون مترمکعب است. از این رو به لحاظ کمیت، آب این حوضه شرایط ویژه‌ی دارد که با افزایش مصرف در سال‌های آتی، کمبود منابع آب دارد و حفاظت کیفی از این منابع تحت تنش نیز در اولویت است.

منابع آلاینده‌ی زاینده‌رود نیز شامل آلاینده‌های صنعتی، کشاورزی و شهری است. آلاینده‌های صنعتی در مجموع سالیانه حدود ۷/۲ میلیون مترمکعب پساب صنعتی به زاینده‌رود تخلیه می‌کنند. منابع آلاینده‌ی شهری نیز به‌صورت تخلیه‌ی مستقیم فاضلاب بهداشتی یا پساب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها، به‌صورت متمرکز آلودگی را به زاینده‌رود تخلیه می‌کنند. فاضلاب بهداشتی که به زاینده‌رود تخلیه می‌شود مجموعاً سالیانه حدود ۴۷/۵ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. منابع آلاینده‌ی کشاورزی به‌صورت متمرکز از زهکشی‌های شبکه‌های آبیاری یا به‌صورت گسترده از طریق نشت از سواحل رودخانه به زاینده‌رود تخلیه می‌شود. از سه زهکشی عمده در طول رودخانه به نام‌های زرین‌شهر، شاه‌کرم و سگری مجموعاً سالیانه به‌طور متوسط حدود ۱۷ میلیون مترمکعب زهاب کشاورزی به رودخانه تخلیه می‌شود.^[۱۸]

برای بررسی وضعیت کیفی آب رودخانه‌ی زاینده‌رود و نیز مدل‌سازی آن تاکنون نمونه‌گیری و شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شده است، که غالباً براساس نمونه‌برداری‌های اداری کل حفاظت محیط زیست استان اصفهان انجام شده است.

ارزیابی می‌شوند. سپس با استفاده از قوانین احتمال و از طریق روش‌های تلفیق و جهش ژنتیکی، از بین جمعیت نسل اولیه، نسل بعدی یا فرزندان تولید می‌شوند، بدیهی است که آن دسته از کروموزوم‌های نسل اول که انطباق بیشتری با تابع هدف دارند، احتمال بیشتری در تولید نسل جدید خواهند داشت. بعد از تولید نسل جدید، مجدداً مقادیر هر عضو این نسل از لحاظ انطباق با تابع هدف ارزیابی می‌شوند و در صورت حاصل‌نشدن شرایط لازم جواب بهینه، روند فوق تا رسیدن به جواب مطلوب ادامه می‌یابد.

در الگوریتم ژنتیک مقادیر عملگرهای آن شامل مقدار احتمال تلفیق و نیز جهش ژنتیکی به نوع فرایند مورد بررسی بستگی دارد. در مدل‌های مدیریت کیفی رودخانه‌ها احتمال تلفیق بین ۰/۵ تا ۰/۷ و احتمال جهش عموماً بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ توصیه شده است.^[۱۴] فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دو طریق پایان می‌یابد: الف) در طی تکرارهای متعدد، کروموزومی به دست آید که کاملاً مقدار مورد نیاز تابع هدف را ارضاء کند که این کروموزوم به‌عنوان جواب نهایی معرفی می‌شود؛ ب) پس از آنکه تعداد تکرارهای مجاز پایان یافت، هیچ‌کدام از کروموزوم‌ها در هیچ‌یک از نسل‌ها کاملاً تابع هدف را ارضاء نکند. در این حالت مناسب‌ترین کروموزوم در بین نسل‌ها به‌عنوان جواب نهایی معرفی می‌شود.

مدل بهینه‌سازی کیفی رودخانه

برای تعیین مقادیر بهینه‌ی ثابت‌های مصنوعی کیفی رودخانه با استفاده از داده‌های مشاهده‌شده یا اندازه‌گیری‌شده و نیز مقادیر پارامترهای به دست‌آمده از مدل‌های شبیه‌سازی، از تابع هدف کمینه‌ساختن مجموع مربعات تفاوت مقادیر مشاهده‌شده با مقادیر شبیه‌سازی‌شده که به‌صورت زیر بیان می‌شود، استفاده می‌شود:

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (P_{oij} - P_{sij})^2 \quad (4)$$

که در آن، Z تابع هدف؛ i شمارنده‌ی پارامتری که اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده؛ J تعداد نقاط اندازه‌گیری پارامترها در طول رودخانه؛ N تعداد کل پارامترهای اندازه‌گیری یا شبیه‌سازی شده؛ K تعداد کل ایستگاه‌های کیفی بر روی رودخانه؛ P_{oij} پارامتر نام مشاهده‌شده و یا اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه j ام رودخانه؛ P_{sij} پارامتر نام شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه j ام رودخانه.

به‌عنوان مثال برای کاربرد این مدل بهینه‌سازی در کالیبراسیون ضرایب مصنوعی رودخانه‌ی زاینده‌رود که در حکم مطالعه‌ی موردی در این تحقیق انتخاب شده است، از داده‌های ۱۰ ایستگاه استفاده و کالیبراسیون و صحت‌سنجی برای دو پارامتر کیفی DO و BOD با ثابت‌های مصنوعی k_1 ، k_2 و k_3 انجام شده است.

مطالعه‌ی موردی: رودخانه‌ی زاینده‌رود

زاینده‌رود به‌عنوان بزرگ‌ترین رودخانه‌ی داخلی فلات مرکزی ایران و نیز مهم‌ترین منبع آب سطحی استان اصفهان شناخته شده است که از ارتفاعات زردکوه بختیاری سرچشمه می‌گیرد. سرچشمه‌ی اصلی زاینده‌رود، چشمه‌ی دیمه، با آورد سالیانه‌ی حدود ۹۳۰ میلیون مترمکعب است. این رودخانه مطابق شکل ۲ در طول حدود ۳۶۰ کیلومتری خود که به باتلاق گاوخونی منتهی می‌شود، از غرب به شرق جلگه‌ی اصفهان را آبیاری می‌کند. به غیر از چشمه‌های متعددی که آب زاینده‌رود را تأمین می‌کنند، منبع دیگر تأمین آب رودخانه‌ی زاینده‌رود آب‌های بین حوضه‌ی است که

جدول ۱. فضای جستجوی ثابت‌های مصنوعی.

| ثابت مصنوعی | $K_1(\text{day}^{-1})$ | $K_2(\text{day}^{-1})$ | $K_3(\text{day}^{-1})$ |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| فضای جستجو | ۰/۰۰۰-۷/۰ | ۰/۰۰۰۰-۱۰۰/۰ | ۰/۰۰۰۲-۴/۰ |

ایستگاه‌های ۱ تا ۴ که تغییرات این پارامترها به دلیل ورود آلاینده‌های کمتر در بالادست زیاد نیست، اقدام شد. بدیهی است برای اخذ نتایج دقیق‌تر نیاز به داده‌های مشاهده‌شده‌ی بیشتری است. نحوه‌ی کدگذاری ژن‌ها به صورت اعداد حقیقی است و مقادیر ژن‌های کروموزوم‌های اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. ارزیابی هر کروموزوم براساس مقدار تابع هدف (رابطه‌ی ۴) به ازاء مقادیر ژن‌های آن صورت می‌گیرد. فضای جستجوی ثابت‌های مصنوعی که عملاً به صورت قید برای تابع هدف عمل می‌کند به صورت جدول ۱ انتخاب شده است.^[۹]

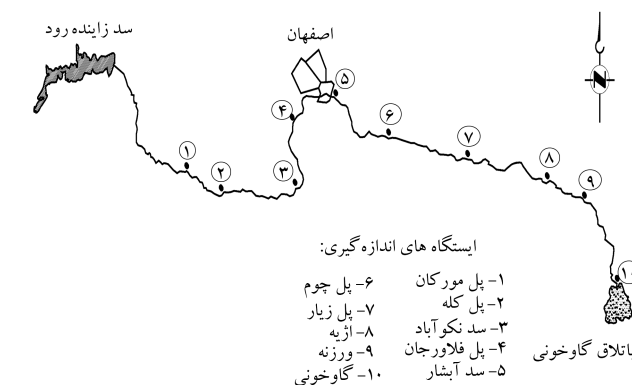
پس از تعیین مقادیر بارز کروموزوم‌ها لازم است کروموزوم‌های والد برای نسل بعد انتخاب شوند. برای انتخاب کروموزوم والد از بین روش‌های انتخابی مختلف، روش تورنمنت با اندازه‌ی ۲ استفاده می‌شود.

مراحل بعدی در الگوریتم ژنتیک، تلفیق و جهش در کروموزوم‌هاست. با انتخاب احتمال جهش ۰/۰۰۵ و احتمال تلفیق ۰/۶۹ با جمعیت اولیه‌ی معادل ۵۰۰، تولید نسل‌های بعدی انجام شده است.^[۹] این مراحل تا زمانی تکرار می‌شود که بهترین جواب‌های هر نسل به مقدار ثابتی هم‌گرا شوند. بهترین جوابی که با استفاده از این الگوریتم به دست می‌آید میزان ثابت‌های مصنوعی کالیبره‌شده را مشخص می‌کند.

نتایج و بحث

با اجرای مدل بهینه‌سازی برای کالیبراسیون ثابت‌های مصنوعی k_1 ، k_2 و k_3 مقادیر آن در طول ۹ بازه‌ی رودخانه‌ی زاینده رود تعیین شد. برای مثال مقادیر این ثابت‌ها برای ماه‌های مرداد و دی به شرح جدول‌های ۲ و ۳ تعیین شد.

در شکل ۴ مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده‌ی DO در شکل ۵ نیز مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده‌ی BOD در ماه‌های مرداد و دی براساس مقادیر ثابت‌های مصنوعی کالیبره‌شده نشان داده شده است. برای مردادماه، جذر مجموع مربعات تفاوت‌ها (RMSE) برای DO معادل ۰/۷۳ و برای BOD معادل ۳/۶۲ است. همچنین برای دی‌ماه، RMSE برای DO برابر با ۱/۰۹ و برای BOD معادل ۴/۸۳ حاصل شده است. شبیه به جدول‌های ۲ و ۳ و شکل‌های ۴ و ۵ برای ۶ ماه دیگر در جدول ۴ (مقادیر جذر مجموع مربعات تفاوت‌ها در طول این



شکل ۳. موقعیت ۱۰ ایستگاه اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب بر روی رودخانه‌ی زاینده رود.

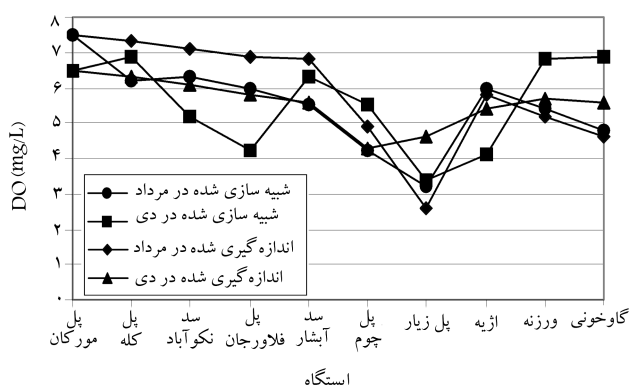
این نمونه‌برداری‌های به‌طور پراکنده از سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۲ و از سال ۱۳۷۳ تاکنون در قالب طرح‌های بررسی و مدیریت زیست محیطی منابع آب و خاک استان به طور ماهانه یا فصلی انجام شده است که متناوباً در ۲۲ ایستگاه ولی نه کاملاً در هر دوره، در تمامی ایستگاه‌ها با تعیین پارامترهای pH، DO، EC، BOD، TDS، TSS، COD، نیترات آمونیوم، نیتریت، سولفات، فسفات، کلراید، بی‌کربنات، سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و انواع فلزات و درجه حرارت آب بوده است. از بین ۲۲ ایستگاه اندازه‌گیری کیفی، ۱۰ ایستگاه پل مورکان، پل کله، سد نکوآباد، پل فلاورجان، سد آبشار، پل چوم، پل زیار، ازبه، ورزنه و گاوخونی دارای کامل‌ترین داده‌های موجود هستند.^[۱۰] در شکل ۳ موقعیت این ایستگاه‌ها در طول رودخانه‌ی زاینده‌رود نشان داده شده است.

در این تحقیق با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی پارامترهای DO، BOD و درجه حرارت در این ۱۰ ایستگاه در طول سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۷، اقدام به کالیبراسیون مدل کیفی رودخانه‌ی زاینده‌رود در طول ۹ بازه با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2K و الگوریتم ژنتیک برای تعیین مقادیر بهینه‌ی ضرایب واکنش شده است. همچنین صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های کیفی سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۱ انجام شده است. این تذکر لازم است که مشخصه‌های هیدرومتری رودخانه در مقاطع مختلف در نزدیکی مقاطع اندازه‌گیری پارامترهای کیفی از جمله سرعت متوسط و عمق میانگین از ایستگاه‌های هیدرومتری شرکت آب منطقه‌ی اصفهان استخراج شده است.

کالیبراسیون ثابت‌های مصنوعی

برای کالیبراسیون ثابت‌های مصنوعی پارامترهای کیفی DO و BOD در رودخانه‌ی زاینده‌رود با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در طول ۸ ماه مختلف سال آبی ۱۳۷۸-۱۳۷۷ در ۱۰ ایستگاه (۹ بازه‌ی محاسباتی) اقدام شد. برای شبیه‌سازی از مدل QUAL2K که در صفحه‌های گسترده تهیه شده است و برای بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک از نرم‌افزار MATLAB ۷/۱ استفاده شد.

در بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک برای تولید کروموزوم‌ها، متغیرهای تصمیم در کنار یکدیگر به صورت رشته یا کروموزوم قرار داده می‌شوند. از آنجا که در کالیبراسیون مدل کیفی ۳ ثابت مصنوعی در طول ۹ بازه‌ی محاسباتی در ۸ ماه مختلف به‌منزله‌ی متغیر تصمیم هستند، هر کروموزوم شامل ۲۱۶ ژن است. برای تکمیل داده‌های مشاهده‌شده با درون‌یابی پارامتر BOD در چهار ایستگاه فرضی واقع در وسط ایستگاه‌های اندازه‌گیری ۱ تا ۵ و نیز پارامتر DO در سه ایستگاه فرضی در وسط



شکل ۴. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده‌ی DO در ایستگاه‌های مختلف در مرداد و دی.

جدول ۲. مقادیر کالیبره شده‌ی ثابت‌های مصنوعی در طول ۹ بازه‌ی رودخانه‌ی زاینده رود در مردادماه.

| شماره‌ی بازه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|------------------------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| $K_1(\text{day}^{-1})$ | ۰/۰۸۱ | ۰/۰۹۸ | ۰/۱۸ | ۰/۲۶ | ۰/۴۳ | ۰/۸۲ | ۰/۶۱ | ۱/۲۳ | ۰/۹۳ |
| $K_r(\text{day}^{-1})$ | ۱۲/۳۱ | ۱۴/۸۶ | ۲۰/۶۳ | ۲/۹۵ | ۴/۲۳ | ۱۸/۶۱ | ۰/۹۲ | ۰/۴۱ | ۲/۶۳ |
| $K_T(\text{day}^{-1})$ | ۰/۰۴ | ۰/۸۳ | ۰/۹۶ | ۱/۵۳ | ۰/۴۸ | ۳/۴۳ | ۰/۵۴ | ۲/۳۱ | ۱/۵۶ |

جدول ۳. مقادیر کالیبره شده‌ی ثابت‌های مصنوعی در طول ۹ بازه‌ی رودخانه‌ی زاینده رود در دی‌ماه.

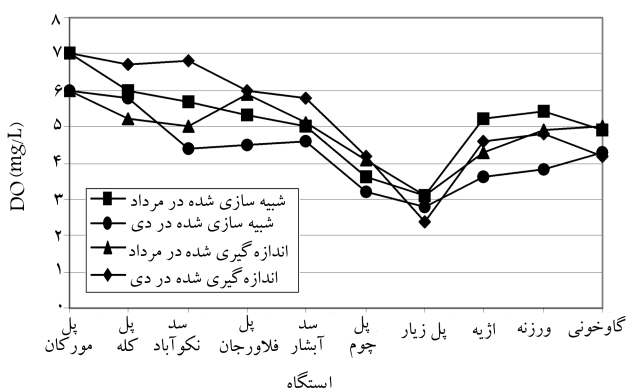
| شماره‌ی بازه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| $K_1(\text{day}^{-1})$ | ۰/۰۶۹ | ۰/۱۷ | ۰/۴۶ | ۰/۵۳ | ۰/۷۲ | ۱/۸۲ | ۲/۱۰ | ۲/۴۱ | ۱/۰۳ |
| $K_r(\text{day}^{-1})$ | ۷/۶۸ | ۹/۴۱ | ۱۲/۵۹ | ۷/۴۶ | ۱۰/۷۱ | ۵/۴۷ | ۲/۱۸ | ۱/۲۸ | ۶/۴۹ |
| $K_T(\text{day}^{-1})$ | ۰/۰۹ | ۱/۱۲ | ۲/۱۸ | ۱/۳۹ | ۲/۳۸ | ۳/۹۲ | ۱/۴۹ | ۰/۲۹ | ۰/۴۳ |

به صورت جامع‌تر و با داده‌های بیشتری براساس فرایندهای ترکیبی کالیبره و به طور هم‌زمان کلیه‌ی ثابت‌های بهینه شوند.

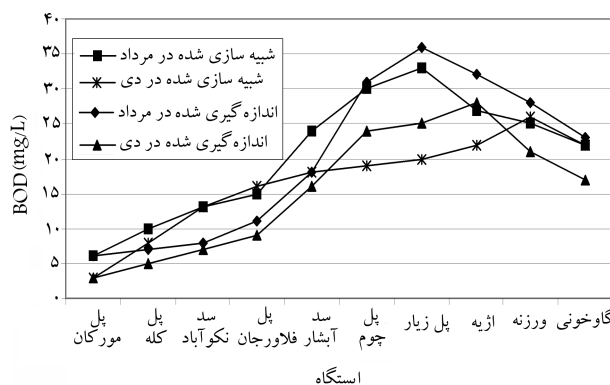
صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی ثابت‌های مصنوعی کالیبره شده در مدل کیفی QUAL2K برای ماه‌های مختلف، براساس داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای کیفی DO و BOD مربوط به سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ استفاده شد. این تذکر لازم است که به دلیل عدم اندازه‌گیری این دو پارامتر در ماه‌های بهمن و اسفند ۱۳۸۱ و نیز تیرماه ۱۳۸۲، صحت‌سنجی برای ماه‌های مشترک بین سال‌های کالیبراسیون (۱۳۷۷-۱۳۷۸) و سال‌های صحت‌سنجی (۱۳۸۱-۱۳۸۲)، یعنی ماه‌های مهر، آذر، دی، فروردین، تیر و مرداد انجام شده است.

برای مقایسه‌ی نتایج مدل شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده از همان معیار جذر مجموع مربعات تفاوت‌ها (RMSE) استفاده شده است، که در جدول ۶ برای این دو پارامتر درج شده است و نیز برای مقایسه‌ی تفاوت مقادیر شبیه‌سازی با مشاهداتی در طول رودخانه در ماه‌های مرداد و دی، تغییرات این دو پارامتر در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همانند مرحله‌ی کالیبراسیون، تفاوت‌های کمتر در بالادست رودخانه به دلیل وجود آلاینده‌های کمتر در این قسمت‌های رودخانه است.



شکل ۶. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده‌ی DO در ایستگاه‌های مختلف در مرداد و دی در مرحله‌ی صحت‌سنجی.



شکل ۵. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی BOD در ایستگاه‌های مختلف در مرداد و دی.

جدول ۴. جذر مجموع مربعات تفاوت‌ها (RMSE) بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده براساس مدل کالیبره شده.

| ماه | مهر | آذر | بهمن | فروردین | خرداد | تیر |
|-----------|------|------|------|---------|-------|------|
| RMSE(DO) | ۱/۶۸ | ۱/۵۳ | ۰/۷۴ | ۰/۶۹ | ۱/۰۳ | ۱/۳۹ |
| RMSE(BOD) | ۵/۷۹ | ۵/۱۲ | ۵/۴۲ | ۳/۸۵ | ۵/۶۷ | ۶/۷۹ |

ماه‌ها) درج شده است. همچنین در جدول ۵، دامنه‌ی تغییرات و میانگین و نیز انحراف معیار ثابت‌های مصنوعی برای ۹ بازه‌ی رودخانه درج شده است. بدیهی است دامنه‌ی وسیع تغییرات و نیز انحراف معیار حاصله از جدول ۵ برای ثابت‌های مصنوعی ناشی از تغییرات حاصله در نوع و مقدار آلاینده‌ها در طول ماه‌های مختلف است. البته این دامنه‌ی تغییرات در بازه‌های ابتدایی رودخانه به دلیل ورود آلاینده‌های کمتر به رودخانه به مراتب کوچک‌تر و در بازه‌های انتهایی بیشتر است. همچنین به دلیل اینکه بسیاری از فرایندهای کیفی دیگر نظیر کاهش در اثر ته‌نشینی، واکنش با رسوبات کف، نیتریفیکاسیون، فعالیت‌های زیستی نظیر فعالیت جلبک‌ها و... در مقادیر پارامترهای DO و BOD مؤثر است، که در این تحقیق به آن‌ها پرداخته نشده است، لذا مقادیر کالیبره شده‌ی ثابت‌های مصنوعی در طول بازه‌های مختلف و در ماه‌های مختلف متفاوت است. لذا برای افزایش دقت در کالیبراسیون بایستی مدل

جدول ۵. پارامترهای آماری ثابت‌های مصنوعی کالیبره‌شده در طول ۹ بازه‌ی رودخانه‌ی زاینده رود.

| شماره‌ی بازه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| k_1 (day ⁻¹) | | | | | | | | | |
| دامنه‌ی تغییرات | -۰٫۰۹۶ | -۰٫۰۶۹ | -۰٫۰۷۱ | -۰٫۰۸۸ | -۱٫۳۳ | -۲٫۴ | -۳٫۷۲ | -۲٫۹۳ | -۱٫۷۶ |
| میانگین | ۰٫۰۶۳ | ۰٫۰۷۳ | ۰٫۰۶ | ۰٫۰۲ | ۰٫۰۶ | ۰٫۰۳ | ۰٫۱۲ | ۰٫۰۶ | ۰٫۰۳ |
| انحراف معیار | ۲٫۱۸ | ۴٫۹۸ | ۳٫۲۳ | ۵٫۱۶ | ۸٫۸۳ | ۶٫۹۷ | ۷٫۴۳ | ۵٫۴۱ | ۴٫۱۹ |
| k_2 (day ⁻¹) | | | | | | | | | |
| دامنه‌ی تغییرات | -۱۵٫۶ | -۲۰٫۱۲ | -۲۱٫۸۳ | -۱۶٫۸ | -۲۲٫۱۳ | -۲۱٫۸۲ | -۱۲٫۱ | -۸٫۶۸ | -۱۲٫۱۱ |
| میانگین | ۸٫۱ | ۱۰٫۳ | ۱۱٫۲ | ۰٫۶۳ | ۰٫۰۸ | ۰٫۹۶ | ۰٫۰۸۲ | ۰٫۱۵ | ۰٫۳۹ |
| انحراف معیار | ۱۳٫۱۹ | ۲۲٫۸۳ | ۲۶٫۱۱ | ۲۵٫۴۳ | ۳۲٫۶۴ | ۴۱٫۸۲ | ۲۸٫۳۶ | ۳۲٫۱۶ | ۳۸٫۱۹ |
| k_3 (day ⁻¹) | | | | | | | | | |
| دامنه‌ی تغییرات | -۱٫۲۱ | -۲٫۳۲ | -۲٫۹۱ | -۳٫۳۹ | -۴٫۲۷ | -۵٫۱۸ | -۳٫۱۲ | -۳٫۱۸ | -۲٫۹۳ |
| میانگین | ۰٫۰۱۵ | ۰٫۰۶۲ | ۰٫۰۸۳ | ۰٫۰۸ | ۰٫۰۶ | ۰٫۰۹۲ | ۰٫۰۶ | ۰٫۰۹ | ۰٫۱۸ |
| انحراف معیار | ۳٫۱۸ | ۶٫۵۹ | ۸٫۶۳ | ۷٫۴۲ | ۱۰٫۱۵ | ۱۸٫۲۱ | ۲۳٫۱۸ | ۱۵٫۷۲ | ۱۴٫۳۶ |

جدول ۶. جذر مجموع مربعات تفاوت‌ها (RMSE) بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مرحله‌ی صحت‌سنجی مدل کیفی.

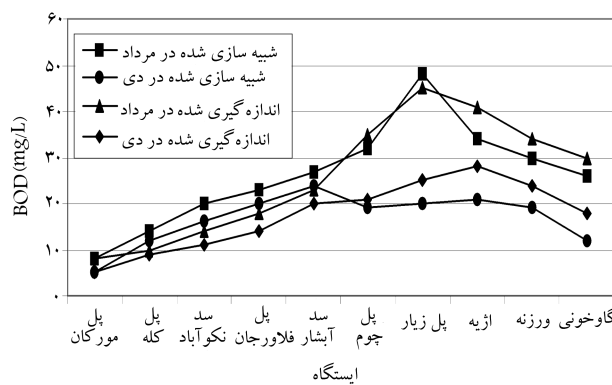
| ماه | مهر | آذر | دی | فروردین | تیر | مرداد |
|-----------|------|------|------|---------|------|-------|
| RMSE(DO) | ۱٫۹۲ | ۱٫۶۴ | ۰٫۸۱ | ۰٫۹۳ | ۱٫۶۲ | ۰٫۸۶ |
| RMSE(BOD) | ۵٫۴۰ | ۵٫۸۲ | ۴٫۹۴ | ۴٫۱۴ | ۶٫۴۹ | ۴٫۴۸ |

نتیجه‌گیری

با روند رشد و توسعه‌ی امروزی، بشر به‌ویژه در زمینه‌های صنعتی و شهری، رودخانه‌ها به‌منزله‌ی منبع پذیرنده‌ی حجم وسیعی از آلاینده‌های مختلف است که بایستی در حفاظت کیفی آن‌ها کوشش بیشتری به عمل آید. برای بررسی وضعیت موجود و پیش‌بینی و برنامه‌ریزی درازمدت کیفی رودخانه‌ها نیاز به مدل‌های شبیه‌ساز کالیبره‌شده با دقت مناسب است.

در این نوشتار روش استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی هم‌زمان سه ثابت مصنوعی برای پارامترهای DO و BOD ارائه و کاربرد آن در رودخانه‌ی زاینده‌رود نشان داده شد. از مدل QUAL2K به‌عنوان شبیه‌ساز کیفی به دلیل قابلیت‌های آن در صفحات گسترده و سادگی ارتباط آن با مدل بهینه‌ساز GA استفاده شد. تابع هدف براساس کمیته‌ساختن مجموع مربعات تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده با شبیه‌سازی‌شده برای دو پارامتر DO و BOD در ۱۰ ایستگاه موجود انتخاب و قیود آن نیز محدود به فضای جستجوی هر پارامتر بود.

مدل شبیه‌ساز کیفی نیز به‌صورت درون‌گذار عمل کرد. هرچند نتایج حاصله برای ثابت‌های مصنوعی k_1 ، k_2 و k_3 در بازه‌های مختلف رودخانه‌ی زاینده‌رود و حتی برای یک بازه در طول ماه‌های مختلف با شرایط هیدرولیکی و آلاینده‌های مختلف متفاوت بود، ولی میانگین آن‌ها، به‌ویژه در بازه‌هایی که آلودگی کمتری را دریافت می‌کردند، نسبتاً ثابت و انحراف معیار کمتری را نشان می‌دادند. به‌هر صورت دامنه‌ی تغییرات این ثابت‌های مصنوعی در طول فضای جستجوی آن‌ها که عموماً در روش‌های سنتی حدس و خطا زیاد است، بسیار محدودتر و با قابلیت اعتماد بیشتری هستند. جذر مجموع مربعات تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده با مقادیر شبیه‌سازی‌شده پس از کالیبراسیون به‌ویژه برای اکسیژن محلول در حد قابل قبولی است. صحت‌سنجی مدل نیز نشان داد که مقادیر ثابت‌های کالیبره‌شده برای ماه‌های



شکل ۷. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده‌ی BOD در ایستگاه‌های مختلف در مرداد و دی در مرحله‌ی صحت‌سنجی.

در هر صورت تأثیر فرایندهای کیفی دیگر به‌ویژه نیترونیفیکاسیون و فعالیت‌های زیستی نظیر فعالیت جلبک‌ها و واکنش با رسوبات کف رودخانه از عوامل ایجاد تفاوت بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده با شبیه‌سازی‌شده است که می‌توان با در نظر گرفتن فرایندهای دیگر و تعداد بیشتری از عوامل کالیبراسیون، بر دقت مدل کالیبره‌شده و نهایتاً مرحله‌ی صحت‌سنجی افزود.

