

شبیه‌سازی و روندیابی هیدرودینامیکی کمی-کیفی انتقال آلودگی در رودخانه شهری با استفاده از تلفیق مدل WASP و HEC-RAS

امیرعلی عبداللهی^۱، حسین بابازاده^{۲*}، بهمن یارقلی^۳ و لعبت تقوی^۴

چکیده

پیش‌بینی و شبیه‌سازی هیدرودینامیکی پارامترهای کیفی رودخانه‌ها در تعیین میزان بارگذاری آلاینده‌ها و شیوه انتشار آلودگی در اکوسیستم‌های آبی با توجه به توان خود پالایی رودخانه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از انجام این پژوهش روندیابی آلودگی رودخانه بالیخلوچای و مقایسه نتایج حاصل از آن با شاخص‌های آماری است. در این پژوهش، برقراری ارتباط بین نتایج دو مدل شبیه‌سازی شده هیدرودینامیکی کمی و کیفی (WASP و HEC-RAS)، کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بر اساس نمونه‌های گرفته‌شده از شش ایستگاه پایش در طول سال‌های ۹۴-۹۵ انجام شد. با توجه به نتایج اعتبارسنجی، شاخص‌های آماری $RMSE$ ، RE و NSE برای متغیر اکسیژن محلول به ترتیب برابر با $۰/۰۴$ ، $۰/۷۲$ ، $۴/۷$ و $۰/۸۴$ و برای دبی رودخانه به ترتیب برابر با $۰/۰۷$ ، $۸/۲$ ، $۵/۲$ و $۰/۸۱$ بود. بررسی نتایج به دست آمده از شاخص‌های آماری، نشان داد که شبیه‌سازی مربوط به متغیرهای پژوهش، به خوبی انجام شده و نتایج شبیه‌سازی، قابل اعتماد بوده و هر دو مدل از عملکرد مناسبی برای پیش‌بینی کیفیت آب برخوردار هستند. با توجه به نتایج خروجی مدل‌ها، آبدهی رودخانه در طول مسیر از $۱/۲\text{m}^3/\text{s}$ به $۰/۳\text{m}^3/\text{s}$ و اکسیژن محلول از $۷/۵\text{mg}/\text{l}$ به $۳/۵\text{mg}/\text{l}$ رسیده که نشان‌دهنده افت شدید دبی و DO رودخانه بود. بررسی روند آلودگی در رودخانه بالیخلوچای، نشان داد که پایین‌دست رودخانه از نظر مدیریت کیفی باید در اولویت قرار گیرد و در تعیین راهبردهای مقابله با آلودگی‌ها و ارتقاء مدیریت در حوضه رودخانه بالیخلوچای، می‌توان از نتایج این پژوهش استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، روندیابی آلودگی، رودخانه‌های شهری، شبیه‌سازی هیدرودینامیکی.

ارجاع: عبداللهی ا. ع. بابازاده ح. یارقلی ب. و تقوی ل. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی و روندیابی هیدرودینامیکی کمی-کیفی انتقال آلودگی در رودخانه شهری با استفاده از تلفیق مدل WASP و HEC-RAS. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۲۱-۳۱.

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

۳- استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج.

۴- دانشیار گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران.

* نویسنده مسئول: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۸

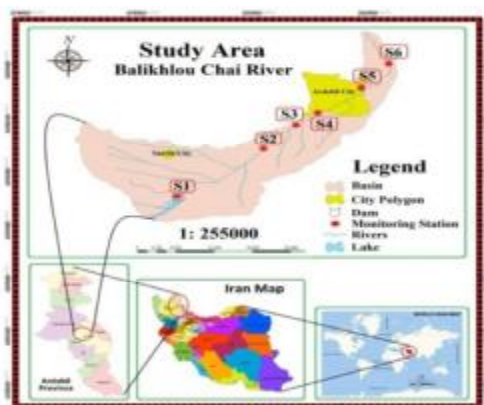
مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان مهم‌ترین منابع تأمین و انتقال آب مصرفی در بخش‌های صنعت، کشاورزی و شرب، از اهمیت خاصی برخوردارند. حفظ کیفیت منابع آب برای تأمین آب آشامیدنی، ارتقاء فعالیت‌ها و کاربری‌های تفریحی و ایجاد یک اکوسیستم مناسب برای ماهیان و حیات‌وحش، مستلزم کیفیت بالای آب در رودخانه‌هاست؛ بدین دلیل، آگاهی از روند تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها همراه با شناسایی عوامل اصلی آلودگی آن از اهمیت بسیاری برخوردار است (جعفری و همکاران، ۲۰۰۹). از دیدگاه توسعه پایدار، نگاه ویژه‌ای به اکوسیستم‌های آبی وجود دارد که لازمه وجود حیات و هرگونه توسعه‌ای، بدون توجه به ویژگی‌های خاص این نوع اکوسیستم‌ها، محکوم به فناست. رودخانه‌های ایران به‌عنوان منبع اصلی حفظ محیط‌زیست جانداران، نقش بسزایی در زندگی مردم دارد که متأسفانه در سال‌های اخیر، در این نوع اکوسیستم‌ها، به شدت شاهد نابودی آن‌ها هستیم. با توجه به اینکه رودخانه بالیخلوچای در سال‌های اخیر از یک‌سو با افزایش بار آلودگی، افزایش تعداد انشعابات کشاورزی و مشکلات کم‌آبی و از سوی دیگر با قرار گرفتن در مسیر توریستی نمین به نیر و سیل هجوم مسافران داخلی به‌علت وجود جاذبه‌های بکر طبیعی و گردشگری در این حوضه، در معرض انتشار انواع آلودگی زیست‌محیطی به‌خصوص آلودگی آب در نواحی و مناطق مختلف روبه‌رو شده و از آنجایی‌که تاکنون مطالعه‌ای درباره روندبایی وضعیت آلودگی زیست‌محیطی اکوسیستم این رودخانه انجام نشده است؛ بنابراین مطالعه در این‌باره امری ضروری و مهم می‌باشد.

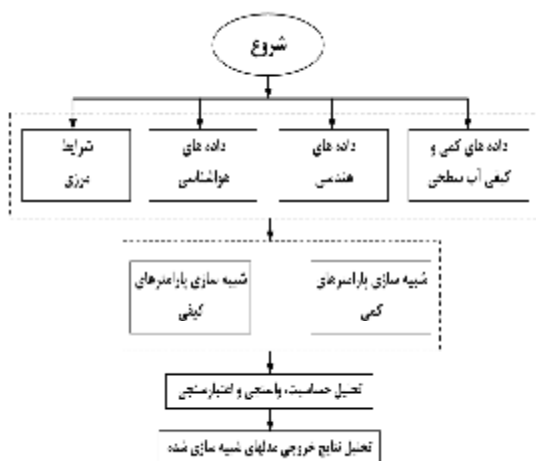
تا به امروز، با توسعه هیدرولوژی و علوم کامپیوتری، بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی از مقیاس حوزه آبریز به مقیاس جهانی توسعه‌یافته‌اند (لی و همکاران، ۲۰۱۵). یک مدل هیدرولوژیکی، ساده‌سازی یک سیستم آب در جهان واقعی در یک حوضه را نشان می‌دهد. مدل‌سازی دینامیکی کیفیت آب می‌تواند به‌طور واضح آثار تغییرات زمانی و مکانی در دریافت آب‌ها را پیش‌بینی کند (بنت و همکاران، ۲۰۱۳؛ سسیل و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج حاصل از مدل‌های دینامیکی کیفیت آب، معمولاً امکان پیش‌بینی و ارزیابی آثار بارگیری مواد مغذی روی تغذیه‌گرایی در رودخانه‌ها را فراهم می‌کند و منجر به طراحی و مدیریت شبکه‌های نظارت بر کیفیت آب می‌شود. وانگ و همکاران

(۲۰۱۸) از مدل هکراس برای شبیه‌سازی گیاهان ساحلی در رودخانه ساکرامنتو، ارزیابی توانایی آن در مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی و تعامل بین جریان و پوشش گیاهی ساحلی استفاده کردند. کوالزاک و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل HEC-RAS، مشکل سیلاب رودخانه ویستولا را از طریق شبیه‌سازی جریان رودخانه تخمین زده و حل کردند. حقی‌آبی و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی برای پیش‌بینی مؤلفه‌های کیفیت آب رودخانه تیره، واقع در جنوب غربی ایران از سه روش GMDH، ANN و SVM استفاده کردند. مقایسه نتایج مدل GMDH با سایر مدل‌های کاربردی نشان می‌دهد که اگرچه این مدل برای پیش‌بینی مؤلفه‌های کیفیت آب عملکرد قابل قبولی دارد، دقت آن کمی از ANN و SVM کمتر است. ارزیابی صحت مدل‌های کاربردی بر اساس شاخص‌های خطا نشان می‌دهد که SVM دقیق‌ترین مدل است.

چن و همکاران (۲۰۱۲) از مدل کیفی عددی آب، برای بهینه‌سازی مکان یک ایستگاه مانیتورینگ کیفی آب در درازمدت در رودخانه هیلونگجیانگ در شمال شرقی چین استفاده کردند. هدف بعدی آن، ارائه یک مدل برای کمک به ایجاد ایستگاه‌های خودکار نمونه‌گیری کیفیت است که بهترین اندازه‌گیری تغییرات پارامترهای کیفیت آب سطحی در طول رودخانه را نشان می‌دهد. بارنول و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقی مدل Qual2e UNCAS را برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول رودخانه‌ها در وضعیت جریان پایدار مطالعه کردند که به‌طور خلاصه، تعدادی از کاربردهای این مدل بازبینی شده و قابلیت آنالیز عدم قطعیت را شرح داده و در مورد اهمیت داده‌های صحرایی در پیش‌بینی مدل بحث شده است. حسین و همکاران (۲۰۱۸) شبیه‌سازی سیلاب در بخش دهلی رودخانه یامو را با استفاده از مدل HEC-RAS، انجام دادند. با استفاده از این مدل ارزیابی آسیب‌پذیری تفاوت بین پل‌ها و موانع مختلف در بخش دهلی انجام شده است. نتایج ارائه شده در پژوهش فوق، می‌تواند به سیاست‌گذاران در اولویت‌بندی راهبردهای مقابله با آثار نامطلوب سیل در حوضه رودخانه یامونا کمک ارزشمندی ارائه دهد. جارسشوان و همکاران (۲۰۱۳) پژوهشی برای بهبود مدیریت کیفی آب رودخانه‌ای در تایلند با استفاده از مدل WASP انجام دادند که از نتایج مدل برای افزایش آگاهی عمومی برای کاهش بار آلودگی به حوضه این رودخانه مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی رودخانه بالیخلوچای اردبیل



شکل ۲- مراحل روش شناسی تحقیق

مرور سوابق مطالعاتی در ارتباط با مدل‌های شبیه‌سازی، مطالعاتی در زمینه‌ی شبیه‌سازی جریان و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی مؤثر در تحلیل روند آلودگی رودخانه به‌صورت جامع انجام نشده و بیشتر مطالعات شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی یا شبیه‌سازی پارامتر کیفی رودخانه به‌صورت جداگانه انجام شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، پیش‌گامی-کیفی رودخانه بالیخلوچای اردبیل طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۵ است. تحقق این هدف مستلزم استفاده از مدل‌های موجود برای بررسی و تحلیل دقیق‌تر رابطه بین میزان جریان (دبی) و پارامترهای شاخص کیفی آب رودخانه است که در این صورت روند آلودگی در رودخانه بالیخلوچای شبیه‌سازی و برای سال‌های آتی پیش‌بینی می‌شود.

روش پژوهش

معرفی محدوده مورد مطالعه

رودخانه بالیخلوچای به طول ۲۴ کیلومتر در استان اردبیل در شمال غربی ایران واقع است که از محدوده جغرافیایی ۳۸ درجه و ۴ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۴ دقیقه شرقی شروع و تا ۳۸ درجه و ۲۲ دقیقه شمالی و ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی ادامه دارد. در شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی و شکل ۲ فلوجارت مراحل انجام تحقیق نشان داده شده است.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری داده‌های کیفی رودخانه

برای انجام این مطالعات، ابتدا نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های زیست‌محیطی برای پارامترهای کیفی آب به‌صورت ماهیانه انجام و سپس پارامترهای موردنظر با استانداردهای موجود مقایسه شد. برای اجرای این مرحله در حوضه بالیخلوچای شش ایستگاه پایش تعیین شد. انتخاب ایستگاه‌های نمونه‌برداری در این رودخانه، با توجه به بررسی‌های انجام شده و با مطالعه مسیر رودخانه و همچنین با توجه به امکان نمونه‌برداری از آن و شیوه نمونه‌برداری با توجه به دستورالعمل نمونه‌برداری سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران انجام شد (گلین و همکاران، ۲۰۱۴).

داده‌های هیدرولوژیکی و کیفیت آب

در این پژوهش DO، BOD₅، نترات و ارتوفسفات به‌عنوان پارامترهای کیفی آب رودخانه بالیخلوچای انتخاب شده و ارتباط آن‌ها با میزان جریان (دبی) رودخانه بررسی شده است. داده‌های موردنیاز با دوره نمونه‌برداری یک‌ساله برای ایستگاه‌های تعیین شده در رودخانه بالیخلوچای در دسترس هستند. داده‌های کیفیت آب از شش ایستگاه تعیین شده برای پوشش طیف وسیعی از عوامل تعیین‌کننده در رودخانه بالیخلو جمع‌آوری شده است (جدول ۱). اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت آب در طی یک دوره یک ساله (از اردیبهشت ۱۳۹۴ تا اردیبهشت ۱۳۹۵) انجام شد.

جدول ۱- متغیرهای شاخص در روندیابی آلودگی رودخانه بالیخوچای

پارامتر ایستگاه	(mg/l) DO	(mg/l) BOD ₅	دبی (m ³ /s)	نیترا (mg/l)	ارتوفسفات (mg/l)
اول	۸/۸۷	۳/۰۸	۱/۲	۳/۸۹	۰/۰۹
دوم	۸/۲۹	۴/۸۳	۱/۳	۱/۵۹	۰/۰۹
سوم	۸/۶۱	۴/۵	۰/۸	۲/۶۹	۰/۰۸
چهارم	۷/۹۳	۵/۱۷	۰/۵۷	۵/۲۲	۰/۱۴
پنجم	۷/۷۱	۵/۵	۰/۵۳	۵/۵۳	۰/۱۱
ششم	۸/۴۲	۵	۰/۲۶	۵/۱۸	۰/۱۳
میانگین سالانه	۸/۳	۴/۶۸	۰/۷۷	۳/۸۵	۰/۱۰۶
استاندارد	۵ - ۲	۵	-	۵	۰/۲

معرفی مدل HEC-RAS

نرم افزار HEC-RAS از مدل‌های پویای یک‌بعدی است که مرکز هیدرولوژی ارتش ایالات متحده در سال ۱۹۹۵ آن را تولید کرد و در حال توسعه است (برونر، ۲۰۱۰). این مدل قادر است مدل‌سازی جریان پیوسته و دینامیکی رودخانه را انجام دهد (گودل، ۲۰۰۵). در این مدل، ویژگی‌های مختلف رودخانه مانند انحراف از مسیر، پل‌ها و هرگونه سازه‌های هیدرولیکی در رودخانه می‌تواند تعریف شود (فن و ونگ، ۲۰۰۹؛ خاتاک و همکاران، ۲۰۱۶؛ پارسا و همکاران، ۲۰۱۳).

مدل روندیابی دینامیکی در HEC-RAS مبتنی بر نظریه موج دینامیکی معادلات سنت و نانت که شامل معادلات پیوسته و مومنوم است (حسین، ۲۰۱۷). ورودی‌های اصلی این مدل شامل رژیم جریان، تراز سطح آب، دبی، ضریب افت، هندسه مقطع عرضی و طول بازه‌ها برای هر دو کانال اصلی و سیلاب است (گیسون و فلمینگ، ۲۰۱۰). معادلات سنت و نانت براساس متغیرهای هیدرولیکی موردنظر به صورت‌های مختلف ارائه شده است. در صورتی که دو متغیر عمق جریان و دبی برای تعریف وضعیت جریان به کار رود (سرگی و همکاران، ۲۰۱۳)، این معادلات به صورت معادلات (۱) و (۲) است:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

که در آن، A سطح مقطع جریان، Q دبی جریان، h عمق جریان آب، S_f شیب خط افت انرژی، S₀ شیب کف کانال، g شیب ثقل، x و t به ترتیب متغیرهای مربوط به مکان و زمان است.

تعیین ضریب زبری مانینگ

ضریب زبری مانینگ در این رودخانه بر اساس بازدهیهای صحرایی، محاسبات و جدول ۲ انجام شد. برای تعیین ضریب زبری مانینگ محدوده موردنظر به شش زیرمحدوده تقسیم شد. سرگی و همکاران (۲۰۱۳) برای تعیین میزان ضریب زبری بر اساس وضعیت مختلف، معادله (۳) را که مورد تأیید اداره کشاورزی ایالات متحده است، ارائه کرد (راهنمای تعیین ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها، ۲۰۱۵).

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (3)$$

که در آن n ضریب زبری ترکیبی، n_b ضریب زبری پایه با توجه به جنس بستر و دانه‌بندی، n₁ ضریب زبری ناشی از نامنظمی‌های سطح کانال، n₂ ضریب زبری ناشی از تغییرات شکل و اندازه مقطع عرضی کانال، n₃ ضریب زبری ناشی از موانع در برابر جریان، n₄ ضریب زبری ناشی از پوشش گیاهی، m ضریب اصلاح مانداری بودن کانال است.

معرفی مدل WASP

مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه بالیخوچای با استفاده از برنامه شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل کیفیت آب نسخه ۷/۵۲ تکمیل شد. WASP یک برنامه دینامیکی و تفاضل محدود است که برای شبیه‌سازی کیفی سیستم‌های آبی طراحی شده است (وول و همکاران، ۲۰۰۳) مدل WASP یک مدل ۱ تا ۳ بعدی مبتنی بر محدوده پویا برای سیستم‌های آبی است (سروسی و همکاران، ۲۰۱۰؛ ناراسیمهان و همکاران، ۲۰۱۰). مسائل مورد مطالعه با استفاده از مدل WASP شامل BOD و DO به صورت دینامیک، مواد مغذی و یوتریفیکاسیون، آلودگی باکتریایی و مواد شیمیایی آلی و فلزات سنگین است (جانسون و همکاران، ۲۰۱۲). مزیت

$$S_c = \left[\left(\frac{\Delta W}{\bar{W}} \right) / \left(\frac{\Delta P}{\bar{P}} \right) \right] \quad (۵)$$

که در آن S_c ضریب حساسیت بدون بعد، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، \bar{W} متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و \bar{P} متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل است. برای استفاده از معادله (۵) برای تحلیل حساسیت مدل دامنه تغییرات ضریب حساسیت (لیو و همکاران، ۲۰۰۷ و هنگ و همکاران، ۲۰۰۹) در جدول ۳ پیشنهاد شده است. هنگامی که مجموعه‌ای از ضرایب موجود برای یک مجموعه‌ای از شرایط خارجی (برای مثال با توجه به درجه حرارت، جریان و بارهای ورودی) ایجاد شده است، مدل برای مجموعه‌ای از شرایط ورودی، درباره شروع به کالیبراسیون می‌شود (جارسشوان و همکاران، ۲۰۱۳). اگر نتایج مدل در یک خطای استاندارد قرار گیرد، مدل قابل قبول است؛ یعنی اگر خروجی مدل با یک روش منطقی و کمی با مجموعه دوم داده موافق باشد، مدل اعتبارسنجی شده در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی عملکرد مدل، مطالعات و سوابق بسیاری منتشر شده است (بنت و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه ضریب کارایی مدل Nash-Sutcliffe (NSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای نسبی (RE) به‌عنوان معیارهای ارزیابی انتخاب شدند. داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای موردنظر محاسبه شد و مقادیر این معیارها بین این داده‌ها به دست آمد. RMSE و RE بیشترین شیوه استفاده از روش ارزیابی تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده در کالیبراسیون مدل‌سازی را دارند (سروچی و همکاران، ۲۰۱۰). معادلات (۶) الی (۹) شاخص‌های ارزیابی مدل را در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهند.

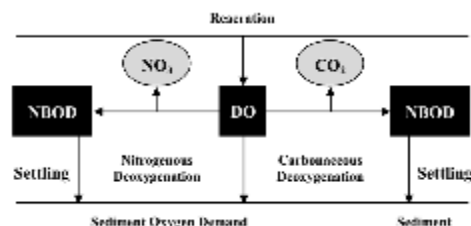
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{est} - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_i^{est} - Y_i|}{N} \quad (۷)$$

این روش انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی و شبیه‌سازی و همچنین بسیاری از مسائل کیفیت آب است (چو، ۲۰۱۰؛ پنگ و همکاران، ۲۰۱۰). برای این مطالعه، ماژول Eutrophication WASP7 (EUTRO) انتخاب و از هشت حالت مدل یوترو (رابرت و همکاران، ۲۰۰۹)، چهار حالت زیر بررسی شد: نیترات (NO_3-N)، ارتوفسفات، اکسیژن محلول (DO) و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD). در این مطالعه اکسیژن محلول از زیرگروه مدل یوترو به‌عنوان شاخص اصلی انتخاب و در وضعیت پایدار برای مقایسه اثر تغییرات بارگذاری آلاینده‌ها در غلظت DO شبیه‌سازی شد (شکل ۳). پویایی اکسیژن محلول با استفاده از معادلات تعادل Streeter-Phelps اصلاح شد.

CBODu مورد استفاده در مدل WASP از معادله (۴) (چن و همکاران، ۲۰۱۲) و همچنین با استفاده از ضریب اکسیداسیون زدایی ۰/۲ در روز به دست آمد (وول و همکاران، ۲۰۰۳).

$$CBOD_u = (1 - e^{-5k}) CBOD_5 \quad (۴)$$



شکل ۳- چارچوب مفهومی معادلات Streeter-Phelps اصلاح‌شده در WASP

تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی

برای تحلیل حساسیت مدل HEC-RAS و WASP، ابتدا با استفاده از معادله ضریب حساسیت معادله (۵) این مدل تحلیل حساسیت شده و پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی نتایج (داده‌های خروجی) حاصل از شبیه‌سازی، مشخص شد و بر اساس این داده‌ها و تغییر آن و مقایسه خروجی مدل با داده‌های واقعی حاصل از مطالعه میدانی در سطح رودخانه تا حدی که نتایج شبیه‌سازی مدل نسبت به مقادیر واقعی اختلاف ناچیزی نشان دهند که اصطلاحاً بتوان گفت پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی نتایج خروجی مدل دارند به خوبی تعیین و مدل تحلیل حساسیت شده است.

و مقدار این پارامتر بیان‌کننده این است که مقادیر پیش‌بینی شده چقدر از مقادیر مشاهده شده انحراف دارد. NSE نشان دهنده عملکرد مدل و مقدار آن بین صفر و یک است که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، بهتر است. MAE میانگین قدر مطلق خطا نیز بیانگر مقدار متوسط خطا است و هر چه کمتر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل است. RE خطای نسبی و هر چقدر پایین باشد، بهتر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{est} - Y_i)^2}{N}} \quad (8)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i^{est} - Y_i)}{\sum_{i=1}^N Y_i} \quad (9)$$

که در معادلات بالا Y_i^{est} مقدار شبیه‌سازی شده در مدل در زمان i ، Y_i مقدار مشاهدات در زمان i ، \bar{Y}_i شاخص‌ها برای مقدار متوسط مشاهده شده و N میانگین تعداد مشاهدات هستند. در این معادلات، حد پایین RMSE صفر

جدول ۲- مقادیر ضریب زبری مانینگ و پارامترهای مؤثر در تعیین آن مطابق روش کاون برای وضعیت موجود (راهنمای ضریب زبری رودخانه‌ها، ۲۰۱۵)

محدوده محل موردنظر	ضریب زبری مربوط به دانه‌بندی	درجه ناهمواری در سطح کانال	ضریب حاصل از تغییرات مقطع	ضریب مربوط به موانع موجود	ضریب مربوط به پوشش گیاهی	ضریب مربوط به انحنای مسیر	ضریب زبری کل
۱ بستر	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵	۰	۰	۰	۱	۰/۰۳۳
کناره	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۵۳
۲ بستر	۰/۰۲۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰	۰	۱/۱	۰/۰۴۶
کناره	۰/۰۲۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۱/۱	۰/۰۶۹
۳ بستر	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰	۰	۱	۰/۰۳۸
کناره	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۰۵
بستر	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰	۰	۱/۰۵	۰/۰۴۰
کناره	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱	۰	۱/۰۵	۰/۰۵۶
بستر	۰/۰۲۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰	۱/۱	۰/۰۵۰
کناره	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۱/۱	۰/۰۷۲
بستر	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰	۰/۰۱	۰	۱	۰/۰۴۸
کناره	۰/۰۲۸	۰/۰۱	۰	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۱	۰/۰۶۳

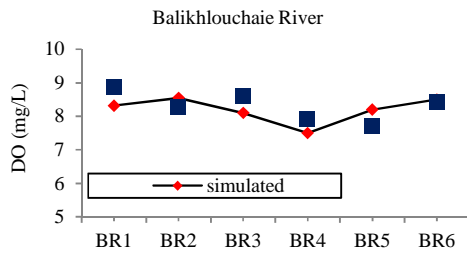
نتایج

نتایج تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی

کالیبراسیون موقتی مدل شامل دوره اردیبهشت ۱۳۹۴ تا فروردین ۱۳۹۵ و اعتبارسنجی، با استفاده از نمودارها و روابط موجود بررسی شد. نتایج کلی تحلیل حساسیت پارامترهای دینامیکی به صورت کیفی در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این جدول، اکسیژن محلول نسبت به کلیه پارامترها حساس و در مرحله واسنجی حساس‌تر است.

شکل ۴ نتیجه کالیبراسیون و اعتبارسنجی اکسیژن محلول (DO) را در مدل WASP نشان می‌دهد. به‌طور کلی، متغیرهای حالت پیش‌بینی شده، در نهایت با ایجاد سازگاری و افزایش درجه اعتبار مدل بر اساس نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج اندازه‌گیری شده مدل کالیبره شد.

با توجه به معادلات (شاخص‌های آماری) مقادیر این پارامترها برای همه متغیرهای خروجی مدل‌های شبیه‌سازی در جدول ۵ و ۶ محاسبه شد. مقدار RMSE در جدول ۵ مربوط به مدل WASP در بالاترین حد خود ۸/۳ و در پایین‌ترین حد خود ۶/۲ بود و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده، انحراف چندانی نداشت. مقدار NSE نیز در بالاترین حد خود ۰/۸۴ و در پایین‌ترین حد خود ۰/۷۷ (نزدیک به ۱) و مدل از عملکرد خوبی برخوردار بود. مقدار RMSE در جدول ۶ مربوط به مدل HEC_RAS، در بالاترین حد خود ۹/۱ و در پایین‌ترین حد خود ۵/۷۶ بوده و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده شده، انحراف زیادی نداشت. مقدار NSE نیز در بالاترین حد خود ۰/۸۱ و در پایین‌ترین حد خود ۰/۶۳ (نزدیک به ۱) و مدل از عملکرد خوبی برخوردار است. MAE و مقدار RE در هر دو



شکل ۴- اعتبارسنجی اکسیژن محلول (DO) مدل WASP طی دوره یکساله

جدول (بعد از کالیبراسیون)، در حد پایینی بود که این امر نشان داد خروجی مدل‌ها از دقت بالایی برخوردار و خطای نسبی هر دو مدل پایین است. مقایسه نتایج آنالیز آماری در جداول فوق در قبل و بعد از کالیبراسیون نشان می‌دهد که شاخص‌های آماری در بعد از کالیبراسیون، نتایج نسبتاً خوبی را به دست آورده و با توجه به نتایج جدول و تجزیه و تحلیل مقادیر به دست آمده از شاخص‌های آماری برای متغیرهای شبیه‌سازی شده، می‌توان چنین تحلیل کرد که به‌طور کلی شبیه‌سازی مربوط به متغیرهای تحقیق، به‌خوبی انجام شد و نتایج شبیه‌سازی قابل اعتماد است.

جدول ۳- طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای دامنه تغییرات ضریب حساسیت

دامنه	$S_c = 0$	$0 < S_c < 0.3$	$0.3 < S_c < 1.5$	$S_c > 1.5$
شدت حساسیت	بدون حساسیت	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد

جدول ۴- ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل HEC-RAS & WASP

پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_c در حالت +۲۵%	مقدار S_c در حالت -۲۵%	درجه حساسیت
اکسیژن محلول	۰/۷	۱/۶	متوسط-زیاد
BOD ₅	۰/۶	۰/۵۱	متوسط-متوسط
نیترات	۰/۵۵	۰/۳۶	متوسط-متوسط
ارتوفسفات	۰/۵	۰/۲۸	متوسط-کم
دبی	۰/۴۶	۰/۶۸	متوسط-متوسط
سرعت جریان	۰/۱	۰/۵۵	کم-متوسط
عمق هیدرولیکی	۰/۱۵	۰/۰۳	کم-کم
ضریب زبری مانینگ	۱	۰/۶	متوسط-متوسط
K12C	۰/۰۲	۰/۳۶	کم-متوسط
K12T	۰/۰۸	۰/۳۹	کم-متوسط
OPCW	۰/۲۹	۱/۴۸	کم-متوسط
KDC	۰/۴۶	۰/۱	متوسط-کم

جدول ۵- بررسی آماری اعتبارسنجی عملکرد مدل WASP قبل و بعد از کالیبراسیون در طی دوره شبیه‌سازی

شاخص آماری متغیر	قبل از کالیبراسیون				بعد از کالیبراسیون			
	RE	RMSE	MAE	NSE	RE	RMSE	MAE	NSE
اکسیژن محلول	-۰/۱۱	۸/۳	۵/۴	-۰/۷۷	-۰/۱۱	۷/۲	۴/۷	-۰/۸۴
BOD ₅	-۰/۱۵	۸/۸	۶/۲	-۰/۷۵	-۰/۱۵	۸/۳	۵/۸	-۰/۷۹
نیترات	-۰/۲۱	۷/۲	۴/۸	-۰/۷۳	-۰/۲۱	۶/۸۵	۴/۶	-۰/۸۱
ارتوفسفات	-۰/۰۹	۷/۵	۷/۴	-۰/۷۰	-۰/۰۹	۶/۲	۴/۳	-۰/۷۷

جدول ۶- بررسی آماری اعتبارسنجی عملکرد مدل HEC-RAS قبل و بعد از کالیبراسیون در طی دوره شبیه‌سازی

شاخص آماری متغیر	قبل از کالیبراسیون				بعد از کالیبراسیون			
	RE	RMSE	MAE	NSE	RE	RMSE	MAE	NSE
دبی	-۰/۱۲	۹/۳	۶/۳	-۰/۷۶	-۰/۱۲	۸/۲	۵/۲	-۰/۸۱
سرعت	-۰/۱۸	۹/۸	۷/۲	-۰/۵۸	-۰/۱۸	۹/۱	۶/۱	-۰/۶۳
عمق هیدرولیکی	-۰/۲	۶/۲۴	۸/۵	-۰/۶۹	-۰/۲	۵/۷۶	۷/۳	-۰/۷۵

اتلاف دبی آب (عم از تبخیر و نفوذ در زمین) افزایش می‌یابد و موجب کاهش دبی آب رودخانه می‌شود؛ ۲- استفاده و برداشت بی‌رویه از آب رودخانه و برداشت از چاه‌های زیرزمینی توسط کشاورزان و مردم محلی، موجب کاهش سطح سفره آب زیرزمینی و عدم برآورد حداقل حقبه زیست‌محیطی (کشاورزی و زیستی) در این رودخانه، از عوامل کاهش دبی آب و کاهش سرعت و عمق هیدرولیکی آب رودخانه است.

تحلیل نتایج خروجی مدل شبیه‌سازی WASP

رویکرد آبی در درجه اول بر اساس ماژول انتخاب‌شده در مدل شبیه‌سازی و همچنین بر اساس پارامترهای شبیه‌سازی شده در این مدل انجام شد؛ به گونه‌ای که با استفاده از داده‌های کیفی واردشده به مدل یوترو، شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرها برای سال‌های آبی را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی مدل WASP برای وضع موجود و پیش‌بینی برای ده سال آینده برای هر یک از متغیرهای شبیه‌سازی در شکل ۶ آمده است.

در مقایسه خروجی مدل شبیه‌سازی WASP با افزایش نترات، فسفات و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، شکل ۷ در طول رودخانه، مقدار اکسیژن محلول، به شدت کاهش می‌یابد. گفتنی است که دلیل اشباع بودن میزان اکسیژن محلول در وضعیت فعلی، پدیده پرغذایی و افزایش جلبک‌های سبز- آبی است که موجب افزایش آن شده و در پیش‌بینی ده‌ساله آبی، مقدار این متغیر به شدت نزول پیدا می‌کند و رودخانه را در حالت آلودگی متوسط (بتا نروساپروپ) قرار می‌دهد. دلیل افزایش بار آلودگی، ورود رواناب‌های سطحی ناشی از بارندگی به داخل رودخانه و شست‌وشوی انواع سموم و کودهای آلی، فسفات و نترات ناشی زهاب زمین‌های کشاورزی و نیز بار آلی وارد شده توسط تخلیه فاضلاب شهری و روستایی به داخل رودخانه در طی مسیر است که منبع غذایی مهمی برای این جلبک‌ها و در نتیجه آن موجب افزایش بار آلودگی و کاهش سلامت رودخانه می‌شود. با توجه به این موضوع، پیش‌بینی وضعیت رودخانه در ده‌ساله آبی برای هر یک از متغیرها نشان می‌دهد که میزان بار آلودگی (میزان بارگذاری آلاینده‌ها) به شدت افزایش یافته و رودخانه در حالت آلودگی شدید (آلفا مزو ساپروپ) قرار دارد.

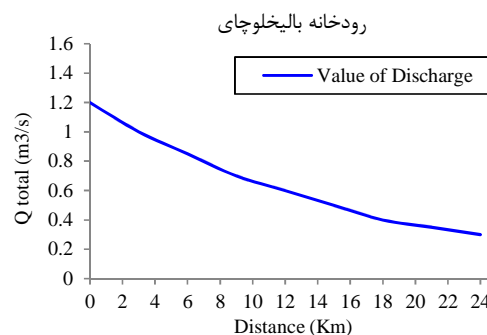
تحلیل نتایج خروجی مدل شبیه‌سازی HEC-RAS

در جدول ۷ نتایج مشاهدات و شبیه‌سازی مدل HEC-RAS برای دبی، سرعت و عمق هیدرولیکی نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول، تفاوت بین متغیرهای شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، معنی‌دار است. مقدار اختلاف بین متغیرها زیاد نیست و شبیه‌سازی این متغیرها معقول به نظر می‌رسد. شکل ۵ نمودار منحنی دبی- اشل بازه اصلی رودخانه بالیخوچای را نشان می‌دهد.

جدول ۷- نتایج مقادیر متغیرهای مشاهداتی و شبیه‌سازی

شده در رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS

متغیر	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	شبیه‌سازی شده - مشاهده شده
سرعت (m/s)	۱/۵	۱/۴۵	۰/۰۵
عمق هیدرولیکی (m)	۰/۳	۰/۲۲	۰/۰۸
دبی (m ³ /s)	۱/۳	۱/۲	۰/۱



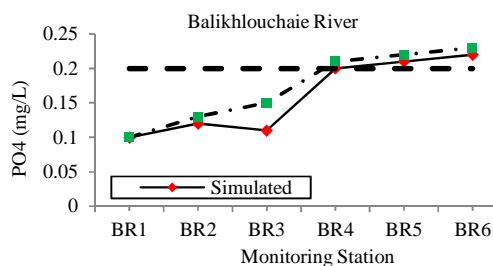
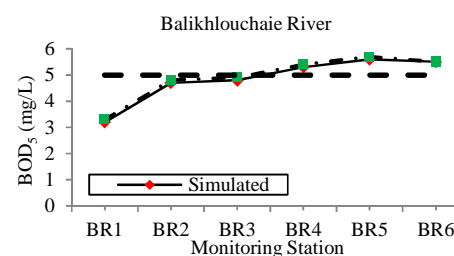
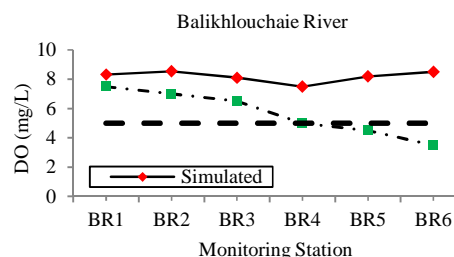
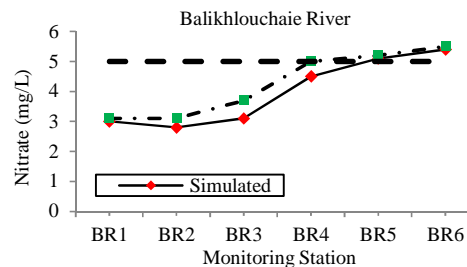
شکل ۵- منحنی دبی- اشل بازه اصلی رودخانه بالیخوچای در طول دوره شبیه‌سازی

با توجه به تجزیه و تحلیل نمودارهای شبیه‌سازی مدل HEC-RAS، دو دلیل اصلی در کاهش سرعت و عمق هیدرولیکی آب در طول رودخانه و به تبع آن کاهش دبی آب رودخانه می‌توان اشاره کرد: ۱- کاهش سرعت و عمق هیدرولیکی، عمدتاً از ویژگی‌های توپوگرافی مسیر است. توپوگرافی شیب‌دار در امتداد اولیه رودخانه و عرض متوسط آن دلیل بر اثبات این موضوع است. در امتداد مسیر رودخانه بالیخوچای از بالادست به پایین‌دست، عرض بستر افزایش می‌یابد و شیب مسیر رودخانه از بالادست به پایین‌دست کمتر می‌شود و به دنبال آن میزان

و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب به‌صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن این روابط است، اصل اساسی در برآورد روند آلودگی رودخانه، تحلیل رابطه بین این متغیرها و روابط می‌باشد و مستلزم به‌کارگیری مدل‌هایی است که بتواند این ارتباط را برقرار کند. در این پژوهش رابطه بین خروجی‌های دو مدل تحلیل شد و روابط علت و معلولی در روند آلودگی رودخانه بالیخلوچای که هدف اصلی این پژوهش است، با در نظرگیری شبیه‌سازی هیدرودینامیکی کمی-کیفی مشخص شد. بر اساس این ارزیابی، می‌توان مدل‌های شبیه‌سازی شده را روشی مناسب و قابل اطمینان در روندیابی آلودگی رودخانه توصیه کرد.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی هدف از مدیریت رودخانه بالیخلوچای، بازگرداندن کیفیت آب رودخانه به سطح قابل قبول و حفاظت از رودخانه برای اهداف مختلف است. مقایسه این نتایج تحلیل دقیق‌تری از روند آلودگی در رودخانه بالیخلوچای را مشخص می‌کند؛ به گونه‌ای که با کاهش دبی رودخانه در پایین‌دست، میزان بارگذاری آلاینده‌ها افزایش یافته و رودخانه نیز به‌صورت طبیعی قادر به کاهش آلاینده‌ها و برگرداندن رودخانه به وضعیت عادی خود را ندارد؛ زیرا هم سرعت آب رودخانه و هم عمق هیدرولیکی رودخانه کاهش پیدا کرد و به دنبال آن میزان اختلاط آب رودخانه کاهش پیدا می‌کند و همچنین از مقدار اکسیژن محلول رودخانه، به‌علت کاهش اختلاط و افزایش بار آلودگی کاسته می‌شود و آلودگی رودخانه افزایش می‌یابد. در این پژوهش به‌خوبی روابط علت و معلولی، مشخص و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد کنترل فاضلاب خانگی و زهاب کشاورزی که منابع اصلی ورود آلاینده‌ها به داخل حوضه رودخانه و عامل اصلی در تشدید پدیده پرغذایی هستند، یک اولویت مهم است. علاوه بر این، نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که بخش‌های پایین‌دست رودخانه برای مدیریت کیفیت آب در وضعیت فعلی، حیاتی خواهد بود. پیش‌بینی ده‌ساله نشان می‌دهد که اگر اقدامات لازم برای مدیریت وضع موجود کیفیت آب رودخانه انجام شود، باید در زمینه احیاء رودخانه قدم برداشت.



شکل ۶- مقایسه پیش‌بینی‌های پارامترهای خروجی (NO₃, DO, BOD₅, PO₄) مدل WASP برای سال ۲۰۲۶ و وضعیت کنونی

مقایسه نتایج تحقیق حاضر با سوابق مطالعاتی

تحلیل نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی شده در این مطالعه، نشان می‌دهد که یک همبستگی قوی بین این نتایج وجود دارد؛ یعنی رابطه‌ای بین دبی جریان، سرعت و عمق هیدرولیکی آب شبیه‌سازی شده در مدل HEC-RAS با متغیرهای کیفی شبیه‌سازی شده در مدل WASP وجود دارد. مقایسه نتایج این تحقیق با سوابق مطالعاتی انجام شده در این زمینه، نشان می‌دهد که مطالعات شبیه‌سازی با هدف روندیابی آلودگی و تحلیل روابط علت و معلولی صورت نپذیرفته و بیشتر مطالعات درباره شبیه‌سازی جریان

منابع

- Thailand Using WASP Model. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 6(23): 4485-4491.
11. Fan C. Ko C. H. and Wang W. S. 2009. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. J Environ Manage. 90(5): 1824-1832.
 12. Gibson S. Pak J. and Fleming M. 2010. Modeling watershed and riverine sediment processes with HEC-HMS and HEC-RAS. Paper presented at: Watershed Management Conference, Davis, CA.
 13. Goodell CR. 2005. Dam breaks modeling for tandem reservoirs: a case study using HEC-RAS and HEC-HMS. Paper presented at: Impacts of Global Climate Change, World Water and Environmental Resources Congress, May 15-19, Anchorage, Alaska, United States. 11 p.
 14. Guidelines for the Determination of Hydraulic Roughness Coefficient of Rivers. 2015. Regulation 688. Ministry of Energy, Office of Technical, Engineering, Social and Environmental Standards for Water and Wastewater. <http://seso.moe.gov.ir>
 15. Haghiahi A. H. Nasrolahi A. H. and Parsaie A. 2018. Water quality prediction using machine learning methods, Water Quality Research Journal. 53(1): 3-13.
 16. Heng L. K. Hsiao T. C. Evett S. Howell T. and Steduto P. 2009. Validation the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal. 101: 488-498. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/720967>.
 17. Husain A. 2017. Flood modelling by using HEC-RAS. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) , 50(1).
 18. Husain A. Sharif M. and Ahmad ML. 2018. Simulation of Floods in Delhi Segment of River Yamuna Using HEC-RAS. American Journal of Water Resources. 6(4): 162-168.
 19. Johnson J. L. Wolfe C. and Waidler D. 2012. An economic assessment of water quality improvement BMPs for the Eagle Mountain Lake Watershed. Proceedings of the 2012 Agricultural and Applied Economics Association Meetings. Seattle, Washington, USA, 13-16 p.
 20. Khattak M. SANwar F. Saeed T. U. Sharif M. Sheraz Kh. and Ahmed A. 2016. Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcGIS: A Case Study of Kabul River. Arabian Journal for Science and Engineering (Springer). 41(4): 1375-1390.
 21. Kowalczyk Z. Świergal M. and Wroblewski M. 2018. River Flow Simulation Based on Thailand Using WASP Model. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 6(23): 4485-4491.
 1. جعفری سلیم ب. نبی بیدهندی غ. سالمی آ. طاهریون م. و اردستانی م. ۱۳۸۸. بررسی کیفیت آب رودخانه قشلاق با استفاده از شاخص‌های کیفی آب، نشریه علوم محیطی. ۶(۴): ۱۹-۲۸.
 ۲. گلین شریف دینی ن. امیرنژاد ر. و صائب ک. ۱۳۹۳. پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه دوهزار تنکابن بر اساس شاخص NSFQI با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران. ۲۴(۱۱۹): ۲۹-۳۹.
 3. Barnwell T. O. Brown L. C. and Whittemore R. C. 2004. Importance of Field Data in Stream Water Quality Modeling Using QUAL2E-UNCAS. Journal of Environmental Engineering. 130(6): 643-647.
 4. Bennett N. D. Croke B. F. Guariso G. Guillaume J. H. Hamilton S. H. Jakeman A. J. and Pierce S. A. 2013. Characterising performance of environmental models. Environ. Model. Software. 40: 1-20.
 5. Brunner GW. 2010. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 4.1. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. 790 p.
 6. Cecile A. Keren J. C. and Sean R. 2010. Inundation mapping using hydraulic model's case studies of steady and unsteady models on the Tar river, NC', Advanced Hydrologic Prediction Service (AHPS) web pages published by North Carolina University. pp: 1-10.
 7. Cerucci M. Jaligama G. K. and Ambrose R. B. 2010. Comparison of the monod and droop methods for dynamic water quality simulations. Journal of Environmental Engineering. 136(10): 1009-1019.
 8. Chen Q. Wu W. Blanckaert K. Ma. J. and Huang G. 2012. Optimization of water quality monitoring network in a large river by combining measurements, a numerical model and matter-element analyses. Journal of Environment Management. 110: 116-124.
 9. Cho J. H. 2010. Water quality modeling of a lake considering rainfall-runoff pollution loads and water quality improvement by diffuse pollution control. Proceedings of the 5th Conference on Water, Climate and Environment, BALWOIS, Ohrid, Republic of Macedonia, 25-29 may. 10 p.
 10. Chuersuan N. Nimrat S. and Chuersuan S. 2013. Empowering Water Quality Management in Lamtakhong River Basin.

- the HEC-RAS System., Advanced Solutions in Diagnostics and Fault Tolerant Control, Advances in Intelligent Systems and Computing 635, Springer International Publishing AG 2018., DOI 10.1007/978-3-319-64474-5_21.
22. Li H. Zhang Y. and Zhou X. 2015. Predicting surface runoff from catchment to large region. Advances in Meteorology. Article ID 720967. 13 p.
 23. Liu H. F. Genard M. Guichard S. and Bertin N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. Journal of Experimental Botany. 58(13): 3567-3580.
 24. Narasimhan B. Srinivasan R. Bednatz S. T. Ernst M. R. and Allen P. M. 2010. A comprehensive modeling approach for reservoir water quality assessment and management due to point and nonpoint source pollution. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 53(5): 1605-1617.
 25. Parsa AS. Qalo N. Heydari M. and Mohd Amin NF. 2013. Introduction to floodplain zoning simulation models through dimensional approach. International Journal of Advance Civil Structure Environment Engineering. 1(1): 20-23.
 26. Peng S. Fu G. Y. and Zhao X. 2010. Integration of USEPA WASP model in a GIS platform. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 11(12): 1015-1024.
 27. Robert B. Ambrose Jr. Tim A. Wool and Thomas O. Barnwell Jr. 2009. Development of Water Quality Modeling in the United States. Environ. Eng. Res. 2009 December, 14(4): 200-210.
 28. Sergey S. Khrapov Andrey V. and Pisarev Ivan A. 2013. The Numerical Simulation of Shallow Water: Estimation of the Roughness Coefficient on the Flood Stage., Advances in Mechanical Engineering., Article ID 787016. 11 p.
 29. Wang J. Zhang Zh. Greimann B. and Huang B. 2018. Application and evaluation of the HEC-RAS – riparian vegetation simulation module to the Sacramento River., Ecological Modelling, Elsevier. 368: 158-168.
 30. Wool T. Ambrose R. Martin L. and Comer E. 2003. Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) 6.0, Draft: User's Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA. 156 p.

