

مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هشتم، شماره بیست و دوم، زمستان ۱۳۹۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۹

تاریخ بازنگری اولیه مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۴

صفحات: ۱۴۴ - ۱۲۳

تحلیل و محاسبه ابزارهای موردنیاز برای حفاظت کیفی آب بمنظور کمینه کردن مخاطرات وارده به محیط زیست

محسن دهقانی درمیان^۱، غلامرضا عزیزیان^{۲*}، سید آرمان هاشمی منفرد^۳

چکیده

بروز عواملی مانند کاهش نزولات جوی، رشد جمعیت و پیشرفت صنعت اهمیت توجه به مدیریت صحیح کیفی منابع آب را دوچندان کرده است. منابع ورود آلاینده به رودخانه‌ها از منظرهای مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیق مدیریت آلاینده‌های کنترل‌پذیر و غیرقابل کنترل مدنظر قرار گرفته شد. برای مدیریت و کنترل خسارات ناشی از هریک از انواع این آلاینده‌ها از ابزار کیفی مشخصی استفاده گردید. ظرفیت جذب در هنگام ورود آلودگی قابل کنترل و جریان رقیق‌ساز ابزار پیشنهادی این تحقیق برای مدیریت آلودگی غیرقابل کنترل می‌باشد. برای تحلیل و محاسبه ابزارهای کیفی مذکور از فرایند شبیه‌سازی بوسیله حل تحلیلی معادله انتقال-پخش آلودگی استفاده شد. منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده در این تحقیق یک منطقه با مشخصات مشخص می‌باشد که توسط پژوهش‌های پیشین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای متوسط مساحت غلظت غیرمجاز (\bar{C}_a)، مسافت آسیب‌دیده (\bar{X}) و زمان تماس غلظت غیرمجاز آلودگی با رودخانه (T) بعنوان شاخص‌های تاثیرگذار در محاسبه ابزارهای کیفی، در هر حلقه فرایند شبیه‌سازی محاسبه شدند. نتایج نشان داد که تغییرات ۹۴/۱ درصدی در دبی سیستم رودخانه-مخزن باعث ۹۹/۳ درصد تغییر در مقدار ظرفیت جذب محاسبه شده، می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد با بکارگیری جریان رقیق‌ساز مناسب، مقادیر ۱۰ و ۲۰ تن آلاینده ناگهانی ورودی به مقادیر غلظت مجاز ۰/۵ و ۱ میلی‌گرم بر لیتر در طول رودخانه رسیدند. در این فرآیند مقادیر پارامترهای حیاتی کیفی رودخانه شامل \bar{C}_a ، T و X، به ترتیب تغییرات ۹۶/۶، ۹۲/۲ و ۵۳/۷ درصدی را نشان دادند.

واژگان کلیدی: مدیریت کیفی آب، کنترل آلودگی ناگهانی، ظرفیت جذب، جریان رقیق‌ساز، مدل شبیه‌سازی کیفی.

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان mohsen.dehghani@pgs.usb.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان(نویسنده مسئول) azizyan@eng.usb.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان Hashemi@eng.usb.ac.ir

مقدمه

آب‌های سطحی و رودخانه‌ها مهم‌ترین منابع آب مورد استفاده بشر می‌باشند. متأسفانه ورود آلودگی‌های تصفیه‌نشده به این منابع از طریق صنعت و کارخانجات، کشاورزی و دفع فاضلاب‌های خانگی، کیفیت آب این منابع را به شدت کاهش داده‌اند و بعضی اوقات باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست رودخانه می‌شوند. در این شرایط، هزینه‌های بالای تصفیه آب برای رسیدن به یک حداقل قابل قبول از پارامترهای کیفی آب متناسب با تقاضاهای مختلف مانند شرب و تفریحی، نیاز است. یکی از راه‌های مقرون به صرفه و اقتصادی در مدیریت منابع آب برای مدیریت آلودگی‌های قابل کنترل در هنگام ورود آن، در نظر گرفتن مفهوم ظرفیت جذب رودخانه و برای آلودگی‌های غیرقابل کنترل در نظر گرفتن مفهوم جریان رقیق‌ساز متناسب با نوع آلودگی ورودی است. این دو مفهوم برای محافظت از کیفیت آب رودخانه بسیار حیاتی و ضروری می‌باشند. عبارت دیگر ارزیابی مقدار مجاز آلودگی وارده به رودخانه با تنظیم شدت جریان آن رودخانه، یک راه حل مدیریتی، کاربردی و با صرفه اقتصادی بسیار بالا برای محافظت از کیفیت آب رودخانه می‌باشد که می‌تواند در موارد بسیاری از جمله در هنگام بحران ورود آلودگی، راهکار و راهگشای مدیران بخش آب باشد. مفهوم ظرفیت جذب یک اکوسیستم و یا محیط‌زیست برای اولین بار در کنفرانس استهکلم در سال ۱۹۷۲ معرفی و مطرح شد. این مفهوم پس از آن بعنوان یک محدودیت در زمینه آلودگی‌های دریایی توسط جسامپ (۱۹۸۶) گسترش و توسعه داده شد. استفاده از مفهوم ظرفیت جذب بعنوان یک حد و آستانه زیست‌محیطی در بسیاری از تکنیک‌ها، روندها و فرایندهای مدیریتی زیست‌محیطی است و بطور کلی یک چارچوب لازم و ضروری برای طراحی استانداردهای زیست‌محیطی مناسب برای استفاده صحیح و مناسب از زمین را فراهم می‌کند. گلاسونی و همکاران (۱۹۹۰) در مقاله خود مفهوم ظرفیت جذب را برای چهار منطقه در آمریکا تعریف و مدل‌سازی کردند. شکری و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که خسارات ناشی از آلودگی‌های وارد شده در مخازن از دو راه می‌تواند به سیستم منابع آب تاثیر بگذارد که عبارتند از: خسارت ناشی از مصرف آب آلوده و خسارت ناشی از تخصیص آب ناکافی. کی‌رنس (۱۹۷۷) بیان کرد که ظرفیت پذیرش بعنوان توانایی یک اکوسیستم برای کنار آمدن با غلظت معینی از مواد آلی و زباله، بدون وارد آمدن ضرر و زیان قابل توجه و هرگونه عوارض بیولوژیکی تعریف می‌شود؛ و چند فرض ذاتی در استفاده از مفهوم ظرفیت جذب در مدیریت کیفی آب وجود دارد مانند اینکه هر محیط دارای ظرفیت جذب محدود برای وفق دادن برخی از مواد زائد بدون عواقب غیرقابل کنترل است.

لازم به ذکر است که عباسی (۱۹۷۶) و عباسی و سونی (۱۹۸۳) و (۱۹۸۴) نتیجه گرفتند که استفاده از مفهوم ظرفیت جذب، زمانی که اکوسیستم در تماس با مواد سمی که پایدار و ماندگار هستند و تمایل به تمرکز در محیط‌زیست دارند، بسیار محدود می‌شود. عباسی و عباسی (۲۰۱۲) در تحقیق خود بیان کردند که در استفاده از مفهوم ظرفیت جذب در رودخانه‌ها، باید یک حداقل جریان رودخانه را تعیین نمود که یک ضریب اطمینان بالا و بالتبع ضریب خطر پایینی را شامل باشد. طبیعتاً متناسب با تغییر نوع آلودگی ورودی، این مقدار جریان برای کمینه کردن خطر، تغییر خواهد کرد. ظرفیت جذب یک اصطلاح و مفهوم است که چندین تعریف برای آن ارائه شده است. لندیس

(۲۰۰۸) از مفهوم مجموع حداکثر بار روزانه^۱، بعنوان ظرفیت جذب منطقه مورد مطالعه‌اش یاد کرد و ازین مفهوم برای اجرای فرایند پاکسازی و تصفیه آب در آمریکا استفاده نمود. اسپانو و چن (۲۰۰۰) ظرفیت جذب را بعنوان یکی از شاخه‌های روش شیئی‌گرا توسعه دادند و از آن برای آنالیز و کنترل منبع آلودگی نقطه‌ای در یک رودخانه استفاده نمودند. تحقیقات زیادی پیرامون ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها انجام شده است. مطالعه رفتارخوپالایی رودخانه کارون به کمک نرم افزار QUAL2Kw بررسی شده و زمان‌های بحرانی پدیده خودپالایی برای پارامترهای مختلف کیفی در رودخانه مطالعه و بررسی گردید (مقیم‌نژاد و همکاران ۱۳۹۶). تحقیق پیرامون یافتن خصوصیات منبع ورود آلاینده به محیط زیست اعم از مکان، مقدار غلظت و زمان تزریق آلودگی به آب از اهمیت بالایی برخوردار است. خرسندی و همکاران (۲۰۱۴) به کمک مدل CE-QUAL-W2 و با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک این مهم را به انجام رسانیدند. همچنین پارامترهای کیفی آب‌های سطحی برای تعیین شاخص‌های کیفی مناسب توسط روش رگرسیون بردار پشتیبان^۲ محاسبه گردید (محمودی و همکاران ۲۰۱۶). پژوهش‌های زیادی روی تحقیقات عددی و آزمایشگاهی برای تعیین شاخص‌های کیفی آب انجام گرفته است. اسمدت و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهش خود راه‌حلی برای تخمین غلظت ماده ردیاب در پایین‌دست نقطه تزریق ارائه کردند. این روش که شامل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است قادر است که در هر زمان و مکان غلظت را محاسبه نماید و بطور موفقیت آمیز برای رودخانه چپلا استفاده شد.

دآندراده و همکاران (۲۰۱۳) یک مدل برای محافظت رودخانه از آلودگی ارائه کردند. در این مدل از الگوریتم شبیه‌سازی گداختگی^۳ و مدل در دسترس شبیه‌سازی کیفیت جریان آب QUAL2E استفاده شده است. از این روش برای تعیین غلظت اکسیژن موردنیاز برای فعالیت‌های بیوشیمیایی در رودخانه سانتاماریادا ویتوریا در برزیل استفاده شده است. در یک سری تحقیقات پیوسته با انجام آزمایشات کیفی در محیط‌های آب و خاک برای تعیین غلظت مواد آلاینده آلی و آفت‌کش‌ها، به ارائه راهکارهای نظارتی و مدیریتی برای حفظ کیفیت اکوسیستم منطقه مطالعاتی پرداخته شد (علی و همکاران ۲۰۱۵(a)، ۲۰۱۵(b)، ۲۰۱۸(a)، ۲۰۱۸(b)، ۲۰۱۸(c)). مفهوم ظرفیت جذب بعنوان یک ابزار مدیریت کیفی کارآمد بصورت آزمایشگاهی اثبات شد و نشان داده شد در فصول مختلف ترسالی و خشکسالی مقدار این کمیت مهم در رودخانه هوان متفاوت است (ژانگ و همکاران ۲۰۱۷). تنظیم شدت جریان برای کمینه‌کردن خسارات ایجاد شده ناشی از ورود آلودگی‌های ناگهانی و غیرمجاز، یک اقدام و راه حل عملی اصلاحی در مدیریت بحران آلودگی است که جریان رقیق‌ساز نامیده می‌شود. در سال (۲۰۱۱) توسط کلمن و همکاران برای تعیین مقدار جریان رقیق‌ساز، یک روش با استفاده از معادله پیوستگی جرم برای بررسی آلومنیوم و بررسی منبع آن از آب زیرزمینی، آب سطحی، تصفیه فاضلاب برگشتی و تلفات ناشی از رسوب‌گذاری، برداشت آب و تخلیه‌ی سرریز از مخازن داده شد. این روش برای بررسی ۱۳ مخزن پذیرفته شد و پس از بررسی با داده‌های اندازه‌گیری شده،

1 Total Maximum Daily Load (TMDL)

2 Support vector regression (SVR)

3 Simulated Annealing

صحت نتایج مدل تایید شد. کاراموز و همکاران (۲۰۰۳) یک مدل بهینه‌سازی برای مدیریت کیفی آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک پویای ترتیبی^۱ را توسعه دادند. مدل پیشنهادی این محققان برای مدیریت کیفی رودخانه کارون به کار گرفته شد. کیلینگ (۲۰۰۷) تحقیق کرد که اقیانوس‌شناس‌ها برای کنترل آلودگی از اصطلاح و مفهوم ظرفیت جذب استفاده می‌کنند. آن‌ها این اصطلاح را بعنوان توانایی و قدرت آب در رقیق‌سازی، پخش و جذب آلودگی‌ها و پساب‌های صنعتی تعریف می‌کنند بطوریکه در حین این فرایند هیچ آسیب و ضرری به گونه‌های ارزشمند و تجاری ماهی و دیگر آبزیان داخل آب، وارد آید.

فرهادیان و همکاران (۲۰۱۴) آسیب‌های وارده از طرف آلودگی به محیط‌زیست را بعنوان توابعی از مقدار آلودگی با غلظت غیرمجاز و مدت زمان تماس آلودگی غیرمجاز با محیط‌زیست رودخانه در نظر گرفتند. برای این منظور حرکت آلودگی در رودخانه توسط روش تحلیلی حل معادله انتقال شبیه‌سازی شده و مقادیر ظرفیت جذب و جریان رقیق‌ساز به کمک روش بهینه‌سازی به‌ترتیب توسط روش برنامه‌ریزی غیرخطی^۲ و نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^۳ بدست آمده است که روش برنامه‌ریزی غیرخطی، روشی با زمان ران بالا می‌باشد که گاهی مواقع غیرقابل حل نیز می‌گردد. دهقانی درمیان و همکاران (۲۰۱۸) به مدیریت و کنترل آلودگی‌های غیرقابل کنترل پرداختند. در این راه از روش عددی جدید SEF^۴ که در مقاله هاشمی منفرد و دهقانی درمیان (۲۰۱۶) معرفی شده بود، برای شبیه‌سازی فرایند انتقال آلودگی در سیستم رودخانه-مخزن استفاده کردند. دو ابزار جریان رقیق‌ساز و زمان ماند به-ترتیب با توجه به قیود کیفی زمان و مکان آسیب‌دیده، برای حفاظت کیفی آب، شبیه‌سازی شدند. همچنین هاشمی منفرد و همکاران (۲۰۱۷) مدیریت کیفی رودخانه را با در نظر گرفتن زیان‌های وارده از طرف آلاینده به رودخانه بصورت دو تابع مقدار آلودگی با غلظت غیرمجاز و مسافت طولی آلوده شده از رودخانه با غلظت غیرمجاز، انجام دادند. در پژوهش این محققین برای شبیه‌سازی رفتار آلودگی در رودخانه از روش تحلیلی حل معادله انتقال-پخش آلودگی استفاده گردید.

بنابراین مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر، ارائه الگوریتم سریع برای محاسبه ظرفیت جذب درمواقع ورود آلودگی‌های قابل کنترل و همچنین معرفی یک الگوریتم دقیق و سریع برای محاسبه جریان رقیق‌ساز مورد نیاز برای کنترل آلودگی‌های غیرقابل کنترل است. بزرگ‌ترین مزیت این الگوریتم‌های شبیه‌سازی، زمان ران بسیار پایین و همچنین ارائه پاسخ سریع در شرایط مختلف ورود آلودگی به رودخانه است که در مقابل با الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده در تحقیقات پیشین از مزیت بالایی برخوردار است. پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق برای شبیه‌سازی وضعیت کیفی رودخانه شامل شاخص‌های متوسط مساحت غلظت غیرمجاز، متوسط غلظت غیرمجاز و بازه زمانی و مکانی آلوده شده از رودخانه با غلظت بالاتر از حد مجاز می‌باشند.

1 Sequential Dynamic Genetic Algorithm (SDGA)

2 Nonlinear programming (NLP)

3 Non dominated sorting genetic algorithms II (NSGA-II)

4 Symmetric exponential function (SEF)

داده‌ها و روش‌ها

معادلات ریاضی با مشتقات جزئی پایه اساسی شبیه‌سازی اغلب پدیده‌های طبیعی می‌باشند. شبیه‌سازی پدیده انتقال-پخش آلودگی نیز از این امر مستثنی نیست. رابطه (۱) نشانگر معادله دیفرانسیل یک‌بعدی انتقال-پخش آلودگی در جریان آرام با یک سرعت مشخص می‌باشد (ون گنیوچتن و آلوز ۱۹۸۲).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \pm kc \quad (1)$$

در این رابطه c نشانگر غلظت آلاینده برحسب (mg/L) در زمان t و مکان پایین دست x است. همچنین t عبارتست از مدت زمان وقوع آلودگی در رودخانه برحسب ثانیه و x بازه مکانی از محل ورود آلاینده برحسب متر. u سرعت متوسط رودخانه برحسب متر بر ثانیه و D و k به ترتیب ضریب پخش و ضریب پوسیدگی آلودگی برحسب (m^2/s) و ($1/s$) می‌باشند. معادله (۲) نمایانگر حل تحلیلی معادله دیفرانسیل (۱) برای زمانی که یک آلودگی ناگهانی به رودخانه وارد شود، می‌باشد (هاشمی منفرد و همکاران ۲۰۱۴، هاشمی منفرد و دهقانی درمیان ۲۰۱۶، هاشمی منفرد و همکاران ۲۰۱۶، هاشمی منفرد و همکاران ۲۰۱۷).

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi t D_x}} \exp\left(-\frac{(x_0 + V_x t)^2}{4D_x t}\right) \quad (2)$$

که در آن $C(x, t)$ عبارتست از غلظت آلودگی در طول رودخانه در مکان و زمان‌های x و t ، هم چنین A سطح مقطع کانال، V_x سرعت متوسط جریان و D_x ضریب پخش طولی آلودگی در رودخانه می‌باشد. هم چنین M در این رابطه جرم آلودگی بر حسب کیلوگرم است. در تحقیق سئو و چیونگ در سال ۱۹۹۸ روش‌های مختلف محاسبه ضریب پخش طولی در رودخانه‌ها قید شده است که در این تحقیق از روش فیشر (۱۹۷۵) به شرح زیر برای محاسبه ضریب پخش استفاده شده است.

$$D = 0.011 \frac{u^2 w^2}{hv} \quad (3)$$

در رابطه بالا، w عرض مقطع رودخانه برحسب متر، h عمق آب برحسب متر و v سرعت برشی برحسب متر بر ثانیه می‌باشد که به شکل زیر قابل محاسبه است.

$$v = \sqrt{gRs} \quad (4)$$

در رابطه ۴، g شتاب گرانش زمین برابر با $9/81$ متر بر مجذور ثانیه، s شیب هیدرولیکی رودخانه و R شعاع هیدرولیکی است که بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$R = A/p \quad (5)$$

در این رابطه A مساحت سطح مقطع جریان برحسب مترمربع و p محیط خیس شده جریان برحسب متر می‌باشد.

شاخص‌های ارزیابی آلودگی

در مطالعات پیشین خسارت ناشی از ورود آلودگی به رودخانه با در نظر گرفتن دو پارامتر ارزیابی شده است (فرهادیان و همکاران ۲۰۱۴). نخست آلودگی با غلظت بالاتر از حد مجاز در طول رودخانه؛ دوم بازه زمانی که این آلودگی با غلظت بالاتر از حد مجاز با آب رودخانه در تماس است.

در تحقیق حاضر یک معیار جدید علاوه بر معیارها و پارامترهای فوق برای بررسی خسارت ناشی از وقوع آلودگی در رودخانه‌ها در نظر گرفته شده است و آن مسافتی است که آلودگی با غلظت غیر مجاز با جریان آب رودخانه در تماس است و مسافت آسیب‌دیده نامیده می‌شود. بر اساس رابطه (۲) این سه پارامتر فوق با همدیگر در ارتباطند بطوریکه دو سناریوی زیر برقرار است:

* برای کاهش بازه زمانی تماس آلودگی با غلظت غیرمجاز با آب رودخانه، سرعت جریان آب در رودخانه باید افزایش یابد، بنابراین آلاینده مدت زمان تماس کمتری با رودخانه خواهد داشت.

* برای کاهش غلظت بالاتر از حد مجاز و مسافت آسیب‌دیده در رودخانه، سرعت جریان آب در رودخانه باید کاهش یابد، بنابراین در این حالت زمان لازم برای پخش و کاهش غلظت آلودگی کافی و زیاد خواهد بود. از این رو با این کاهش سرعت، غلظت غیرمجاز و مسافت آسیب‌دیده نیز کاهش یافته و کمینه می‌گردد.

هدف این تحقیق مدیریت غلظت غیرمجاز آلودگی در رودخانه و رساندن آن به مقدار مجاز با کمک دو مفهوم کاربردی فوق می‌باشد. برای انجام یک مدیریت مناسب لازم است دو ابزار ظرفیت جذب و جریان رقیق‌ساز که در بخش مقدمه معرفی شدند را بیشتر روشن نمود تا مشخص شود چگونه بوسیله این دو راهکار می‌توان رودخانه را در شرایط مختلف به لحاظ هیدرولیکی و انواع ورود آلودگی، کنترل و حفاظت کیفی کرد.

در نظر گرفتن ظرفیت جذب یک رودخانه بعنوان یک معیار برای تصفیه آب و پاک‌کردن آب درمقابل آلودگی قابل کنترل، یک ضرورت و راهکار اقتصادی است که منجر به ساخت ابزار تصفیه آب معمولی و ارزان می‌شود و باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد. برای محاسبه ظرفیت جذب رودخانه، توجه به دونکته حائز اهمیت است:

* حداکثر ظرفیت جذب رودخانه در سرعت‌های پایین جریان آب اتفاق می‌افتد؛ چراکه باتوجه به رابطه (۲) برای کاهش غلظت حداکثری آلودگی در یک زمان مشخص، سرعت جریان آب باید کاهش یابد. بنابراین می‌توان گفت با کاهش سرعت جریان آب رودخانه، ظرفیت جذب آن رودخانه افزایش می‌یابد و بالعکس.

* ظرفیت جذب رودخانه‌های مختلف، متفاوت است. همچنین تعداد زیادی نیاز آبی در پایین‌دست رودخانه‌ها موجود می‌باشد، مانند: نیازهای خانگی، تفریحی، کشاورزی، صنعتی و ... که هریک از این نیازها، نیازمند آب با غلظت آلودگی مشخص و متفاوت می‌باشد.

شایان ذکر است اگر هیچ سازه تنظیمی (مخزن) در منطقه بالادست نیازهای آبی موجود در رودخانه وجود نداشته باشد، در این صورت شدت جریان یک پارامتر ثابت بوده و متغیر کنترلی نیست. در این شرایط ظرفیت جذب به فاصله محل برداشت آب برای تامین نیازهای آبی پایین‌دست از نقطه‌ی ورود آلودگی وابسته است. بعبارت دیگر، با

ثابت در نظر گرفتن غلظت مجاز پایین دست (برای یک نیاز آبی مشخص)، با افزایش مکان برداشت آب از نقطه ورود آلودگی، ظرفیت جذب نیز افزایش می‌یابد.

بنابراین باتوجه به مفاهیم فوق، ظرفیت جذب بعنوان یک ابزار مقرون بصرفه، در شرایط مختلف هیدرولیکی و کیفی رودخانه در حالت ورود آلودگی کنترل‌پذیر، قابل محاسبه خواهد بود.

زمانیکه آلودگی وارده به رودخانه تصادفی و غیرقابل کنترل باشد، مانند تخلیه ناگهانی و بدون اجازه‌ی آلودگی توسط کارخانه‌های مجاور رودخانه یا غرق شدن یک تانکر مواد شیمیایی مانند نفت در آب بر اثر تصادف‌های دریایی و بطور همزمان غلظت این آلودگی ورودی بیشتر از ظرفیت جذب و توان خودپالایی رودخانه باشد، این غلظت غیرمجاز بالای آلودگی در آب، باید بطریقی کاهش پیدا کند. یکی از راه‌های اصلاحی عملی و ساده برای کم کردن غلظت غیرمجاز آلودگی در رودخانه، آزادسازی یک حجم آب از مخزن بالادست نقطه ورود آلودگی است که جریان رقیق‌ساز نامیده می‌شود. در این شرایط، میزان آزادسازی آب، برای کمینه کردن خسارت وارده به محیط‌زیست تنظیم می‌شود. این امر تنها با ساخت یک سازه‌ی تنظیمی (سد) میسر و ممکن خواهد شد. از آنجاکه توده‌ی آلودگی ورودی ثابت و غیرقابل کنترل می‌باشد، یعنی نمی‌توان مانند قسمت محاسبه ظرفیت جذب، مقدار آلودگی ورودی را متغیر کنترلی در نظر گرفت، بنابراین فقط با تنظیم شدت جریان رودخانه از طریق سازه‌ی تنظیمی بالادست نقطه‌ی ورود آلودگی، باید خسارت ناشی از آلودگی را کاهش داد. فرهادیان و همکاران (۲۰۱۴) دو تابع هدف بنام‌های متوسط غلظت غیرمجاز (\bar{c}_d) و زمان تماس آلودگی با غلظت غیرمجاز با رودخانه (T) را معرفی نموده و از این دو برای محاسبه جریان رقیق‌ساز به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک دوهدفه نامغلوب استفاده کردند (شکل ۱).

$$c_d = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (c_{\max i}(x) - c_s) & c_{\max i} > c_s \\ 0 & c_{\max i} \leq c_s \end{cases} \quad (6)$$

که در آن $c_{\max i}$ غلظت حداکثری آلودگی در مکان x ام بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، c_s عبارتست از حد مجاز غلظت آلودگی در طول رودخانه بر حسب میلی‌گرم بر لیتر که توسط سازمان‌های حفاظت محیط‌زیست^۱ برای مواد مختلف تعیین و c_d مقدار غلظت غیرمجاز بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

با تقسیم c_d بر n (تعداد کل نقاط با غلظت بالاتر از c_s)، متوسط غلظت غیرمجاز (\bar{c}_d) شکل می‌گیرد.

$$\bar{c}_d = \frac{c_d}{n} \quad (7)$$

زمان تماس بعنوان بازه‌ی زمانی از لحظه‌ی وقوع آلودگی تا زمانیکه غلظت آلودگی در رودخانه برابر (c_s) می‌گردد، تعریف می‌شود و بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$T = \max (t_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

که در آن T زمان تماس بر حسب ثانیه، t_i زمان رسیدن آلودگی به تابع توزیع آلودگی i ام و i نمایشگر تعداد نقاط محاسباتی است.

¹ Environmental protection agencies (EPA)

در تحقیقی دیگر، هاشمی منفرد و همکاران (۲۰۱۷) دو تابع هدف جدید برای حفاظت کیفی رودخانه در مقابل ورود آلودگی معرفی کردند و بوسیله این دو تابع به کمک الگوریتم بهینه‌سازی (NSGA-II) به محاسبه جریان رقیق‌ساز پرداختند. از آنجا که c_a برابر با مجموع اختلافات بین مقدار ماکزیمم زنگوله آلودگی و مقدار مجاز است و در واقع تحقیق فرهادیان و همکاران (۲۰۱۴) برای محاسبه متوسط غلظت غیرمجاز، فقط مقدار پیک زنگوله آلودگی غیرمجاز را در نظر بودند، هاشمی منفرد و همکاران (۲۰۱۷) با ارائه c_a بجای c_a به شکل زیر، سعی در صحیح‌تر نمودن دقت شبیه‌سازی‌ها داشتند تا جریان رقیق‌ساز محاسبه شده از دقت بالاتری برخوردار باشد.

(۹)

$$c_a = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (c_{\max i}(x) - c_s) * A_i & c_{\max i} > c_s \\ 0 & c_{\max i} \leq c_s \end{cases}$$

که در آن A_i مساحت غلظت غیرمجاز در زنگوله‌ی آلودگی پایین دست نام می‌باشد که در شکل (۱) مشخص می‌باشد. در این شکل محور x بیانگر طول رودخانه، محور t نشان‌دهنده‌ی زمان و محورهای x و t هم‌راستا و هم‌جهت می‌باشند.

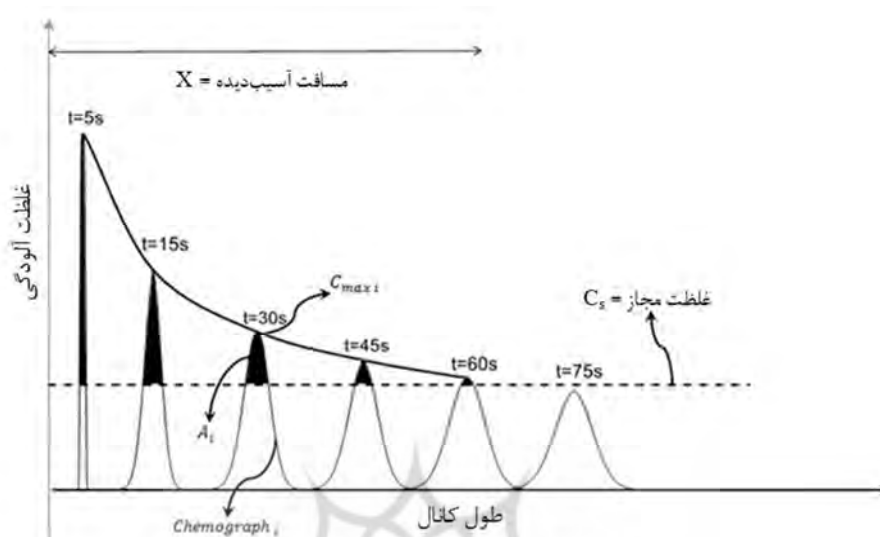
با تقسیم c_a بر $\sum_{i=1}^n A_i$ متوسط مساحت غلظت غیرمجاز (\bar{c}_a)، که اول تابع هدف پیشنهادی تحقیق هاشمی منفرد و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد، شکل می‌گیرد. در این تحقیق اثبات شد که تابع هدف \bar{c}_a نسبت به \bar{c}_a از دقت بالاتری برخوردار است و تابع هدف واقع بینانه‌تری می‌باشد.

$$\bar{c}_a = \frac{c_a}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (10)$$

دومین تابع هدف پیشنهادی تحقیق هاشمی منفرد و همکاران (۲۰۱۷)، فاصله آسیب‌دیده می‌باشد که به بازه‌ی مکانی بین محل وقوع آلودگی تا جایی که غلظت آلاینده وارده، برابر (c_s) می‌شود، اطلاق می‌گردد. مفهوم فاصله آسیب‌دیده بصورت ریاضی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$X = \max (x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

که در آن X فاصله آسیب‌دیده برحسب متر و x_i مکان i امین تابع توزیع آلودگی با غلظت بالاتر از c_s می‌باشد.

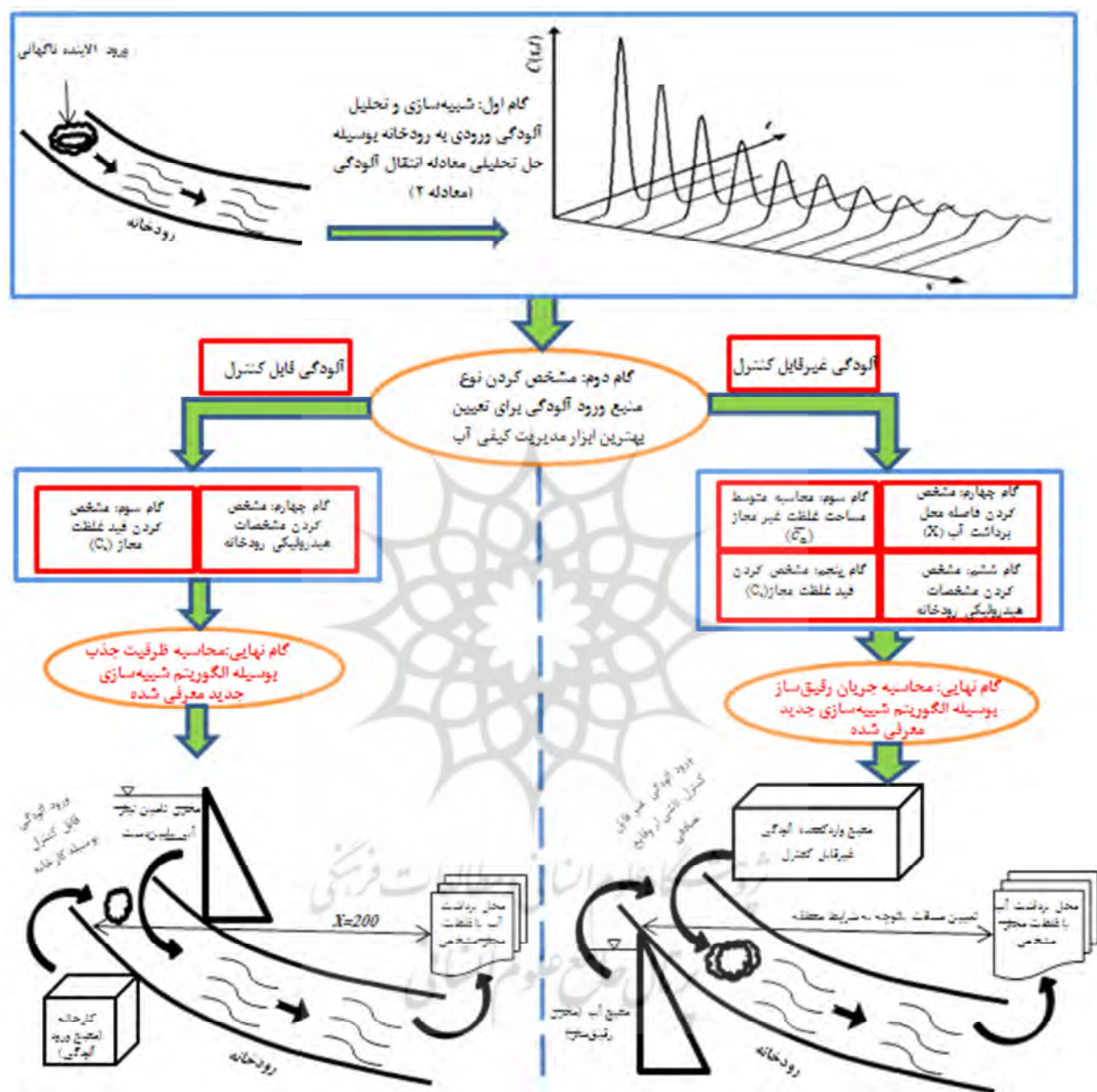


شکل ۱: نمایش پارامترهای تاثیرگذار در روند محاسبه ابزارهای کیفی (دهقانی درمیان و همکاران ۲۰۱۸)

همانطور که ذکر شد تحقیقات پیشین تاکنون برای محاسبه ابزارهای کیفی ظرفیت جذب و جریان رقیق‌ساز، از روش‌های زمان‌بر بهینه‌سازی استفاده می‌کردند، لذا هدف اصلی این تحقیق ارائه الگوریتم شبیه‌سازی سریع برای محاسبه این ابزارهاست. در همین راستا در این مقاله، سه پارامتر شامل قید غلظت مجاز (C_s) برای تعیین ظرفیت جذب و دو تابع هدف متوسط مساحت غلظت غیرمجاز (\bar{C}_a) و فاصله‌ی آسیب‌دیده (X) برای محاسبه جریان رقیق‌ساز موردنیاز برای حذف آلودگی، در نظر گرفته شده و به کار می‌روند.

منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی مدنظر این تحقیق، در تحقیقات بین‌المللی زیادی بکار گرفته شده است (فرهادیان و همکاران ۲۰۱۴، هاشمی منفرد و همکاران ۲۰۱۷، دهقانی درمیان و همکاران ۲۰۱۸). منطقه مذکور یک یک مساله پنج‌مارک و نمونه در زمینه مدیریت و حفاظت کیفی منابع آب می‌باشد و مزیت آن، توانایی مقایسه نتایج حاصل از تحقیقات مختلف و انتخاب ابزار و روش مدیریت کیفی مناسب می‌باشد. شکل ۲ شمای منطقه مطالعاتی در حالات مختلف محاسبه ظرفیت جذب و جریان رقیق‌ساز مناسب جهت حفاظت کیفی آب در حالات مختلف ورود آلاینده را نشان می‌دهد.



شکل ۲: شمای منطقه مطالعاتی در حالات مختلف محاسبه ظرفیت جذب و جریان رقیق‌ساز مناسب

برای محاسبه ظرفیت جذب رودخانه، فاصله بین محل برداشت آب و نقطه ورود آلودگی در منطقه مطالعاتی ۲۰۰ متر می‌باشد و سرعت جریان آب بین ۰/۷ تا ۱ متر بر ثانیه در فصول مختلف سال متغیر است. همچنین با توجه به دو نیاز آبی پایین‌دست مفروض در منطقه، مقدار غلظت آلودگی مجاز ۰/۵ و ۱ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. در قسمت محاسبه جریان رقیق‌ساز در منطقه مطالعاتی، مقدار ۱۰ و ۲۰ تن آلاینده وارد رودخانه می‌شود که بایستی با محاسبه جریان رقیق‌ساز مناسب، مقدار غلظت آلودگی را به همان دو غلظت مذکور ۰/۵ و ۱ میلی‌گرم بر لیتر رسانید. جدول ۱ مقادیر پارامترهای موردنیاز برای تحلیل و شبیه‌سازی ابزارهای مدیریت کیفی مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای موردنیاز برای محاسبه ابزارهای مدیریت کیفی در منطقه مطالعاتی

نام پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
A	۵	m^2
w	۵	m
h	۱	m
k	۰/۰۰۲	1/s
s	۰/۰۰۵	m/m
C_s	۱،۰۰/۵	mg/l

نتایج و بحث

برای تعیین ظرفیت جذب، منبع ورود آلاینده باید کنترل پذیر باشد. در تحقیقات پیشین برای محاسبه حداکثر ظرفیت جذب، روش بهینه‌سازی برای کنترل بیشترین میزان توده‌ی آلودگی قابل تخلیه، بکار برده شد. آن‌ها در تحقیق خود از غلظت مجاز بعنوان یک قید استفاده نموده و از روش برنامه‌ریزی غیرخطی که یک روش بهینه‌سازی تک‌هدفه است، استفاده کردند (فرهادیان و همکاران ۲۰۱۴).

در این تحقیق، بدون استفاده از روش بهینه‌سازی، ظرفیت جذب تعیین شد، دو دلیل برای تعیین ظرفیت جذب بدون استفاده از روش بهینه‌سازی وجود دارد:

* روش برنامه‌ریزی غیرخطی، راهکاری است که جواب بهینه را با محاسبه شیب در هر نقطه از فضای تابع هدف به کمک مشتق‌گیری تعیین می‌کند که این فرایند بسیار زمان‌بر می‌باشد و ممکن است غیرقابل حل نیز بشود (فرهادیان و همکاران ۲۰۱۴).

* بر اساس ماهیت مساله تعیین ظرفیت جذب، هیچ‌گونه روش بهینه‌سازی نیاز نیست، بعبارت دیگر با شبیه‌سازی و نوشتن یک برنامه کامپیوتری در متلب^۱، حداکثر ظرفیت جذب قابل محاسبه است.

بنابراین در این تحقیق برای تعیین ظرفیت جذب رودخانه، از برنامه‌نویسی در نرم افزار متلب استفاده شد، به این ترتیب که با توجه به نیازهای مختلف آبی پایین‌دست در فصول مختلف سال، مقدار آب آزادسازی شده از مخزن بالادست برای تامین نیازها، متفاوت است. هدف این قسمت از شبیه‌سازی این است که برای هر مقدار آزادسازی آب از مخزن بالادست رودخانه، حداکثر ظرفیت جذب محاسبه گردد.

برای هر مقدار سرعت جریان آب، هر فاصله آسیب‌دیده مشخص و هر قید غلظت مجاز پایین‌دست معین، ماکزیمم ظرفیت جذب در فرایند شبیه‌سازی محاسبه می‌شود. زمان اجرای برنامه کامپیوتری نوشته شده برای تعیین ظرفیت جذب در مقایسه با روش‌های بکار گرفته شده در تحقیقات پیشین، بالا نبوده و جواب‌های بدست آمده، هیچ‌گاه

^۱ - MATLAB

غیرقابل حل و تعریف نشده، نمی‌شوند. روندنمای برنامه نوشته شده برای محاسبه ظرفیت جذب و مقایسه آن با روش - های پیشین در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

جریان رقیق‌ساز نیز زمانی بعنوان یک ابزار مدیریت کیفی استفاده می‌شود که دو شرط زیر بطور همزمان برقرار باشد: * آلودگی وارد شده به رودخانه بطور ناگهانی و بدون اجازه بوده که می‌تواند ناشی از یک تصادف دریایی یا از خروجی یک واحد صنعتی به آب وارد شود.

* آلودگی ناگهانی وارد شده به رودخانه بیشتر از ظرفیت جذب رودخانه در مقابله با آلودگی باشد.

در این شرایط قید غلظت مجاز در یک فاصله آسیب‌دیده مشخص، نقض شده و غلظت آلودگی موجود در آن بازه، از غلظت آلودگی مجاز تجاوز می‌کند. برای کاهش خسارت وارده به محیط‌زیست، اثرات ناشی از ورود ناگهانی آلودگی، باید کمینه گردد. این اثرات عبارتند از:

- متوسط مساحت غلظت غیرمجاز (\bar{c}_a).

- فاصله‌ی آسیب‌دیده (X).

- زمان تماس غلظت آلودگی غیرمجاز با آب (T).

کمینه‌کردن فاصله آسیب‌دیده و زمان تماس غلظت آلودگی غیرمجاز با آب به این دلیل که باعث کاهش اکسیژن محلول در جریان آب و بالتبع خسارت به اکوسیستم آبی می‌شود، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به دلیل رابطه‌ی مستقیم بین متوسط مساحت غلظت غیرمجاز و زمان تماس (این رفتار مشابه در ادامه نتایج نشان داده خواهد شد)، متوسط مساحت غلظت غیرمجاز و فاصله‌ی آسیب‌دیده بعنوان دو تابع هدف برای تعیین جریان رقیق‌ساز و کاهش مخاطرات وارده به محیط‌زیست، در نظر گرفته شدند؛ بنابراین مساله تعیین جریان رقیق‌ساز بهینه به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } \left\{ \begin{array}{l} \bar{c}_a \\ X \end{array} \right.$$

S.to

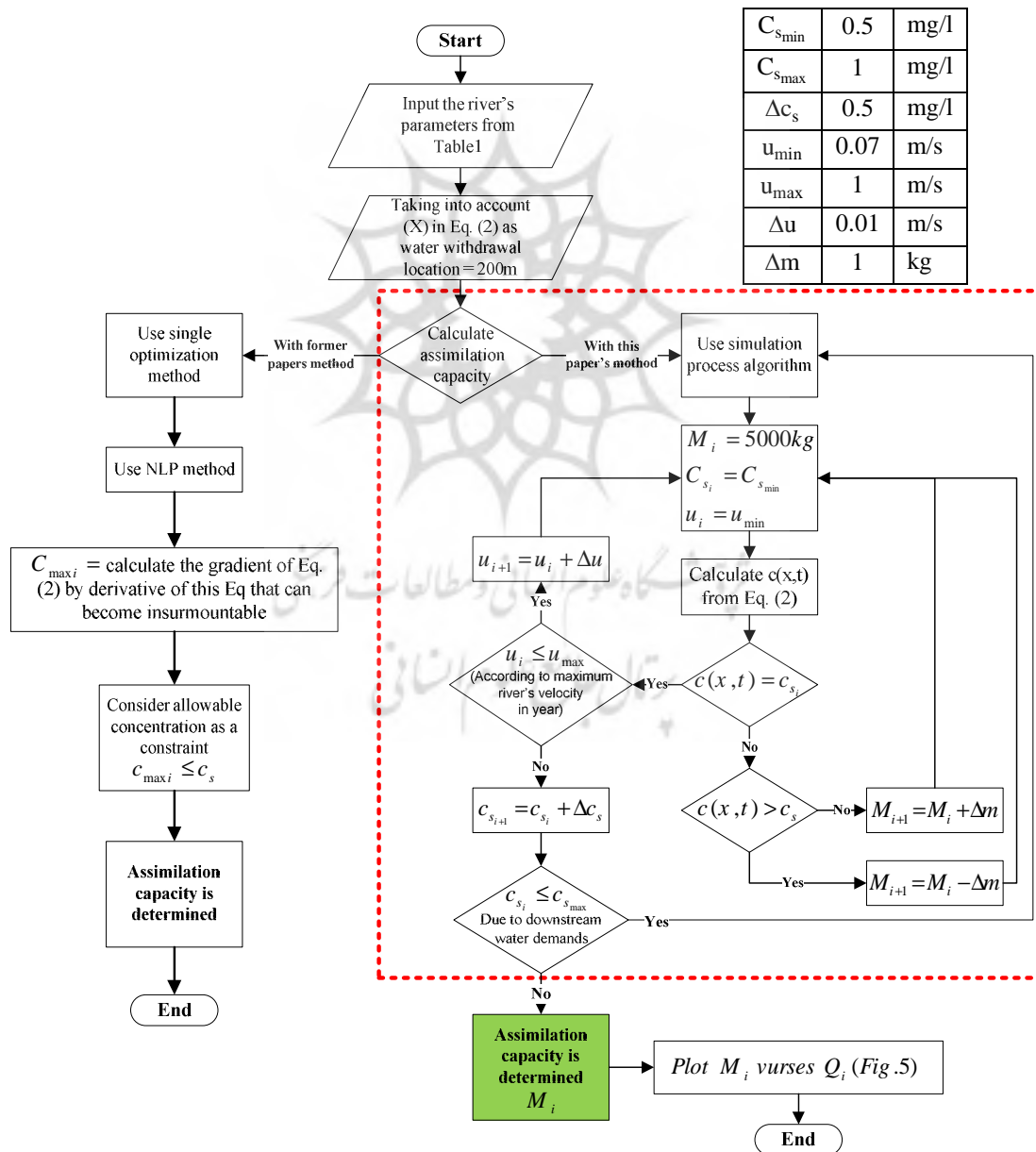
$$c_s = 0.5 \text{ and } 1 \text{ mg/l}$$

$$\text{Sudden pollution entrance} = 10 \text{ and } 20 \text{ ton}$$

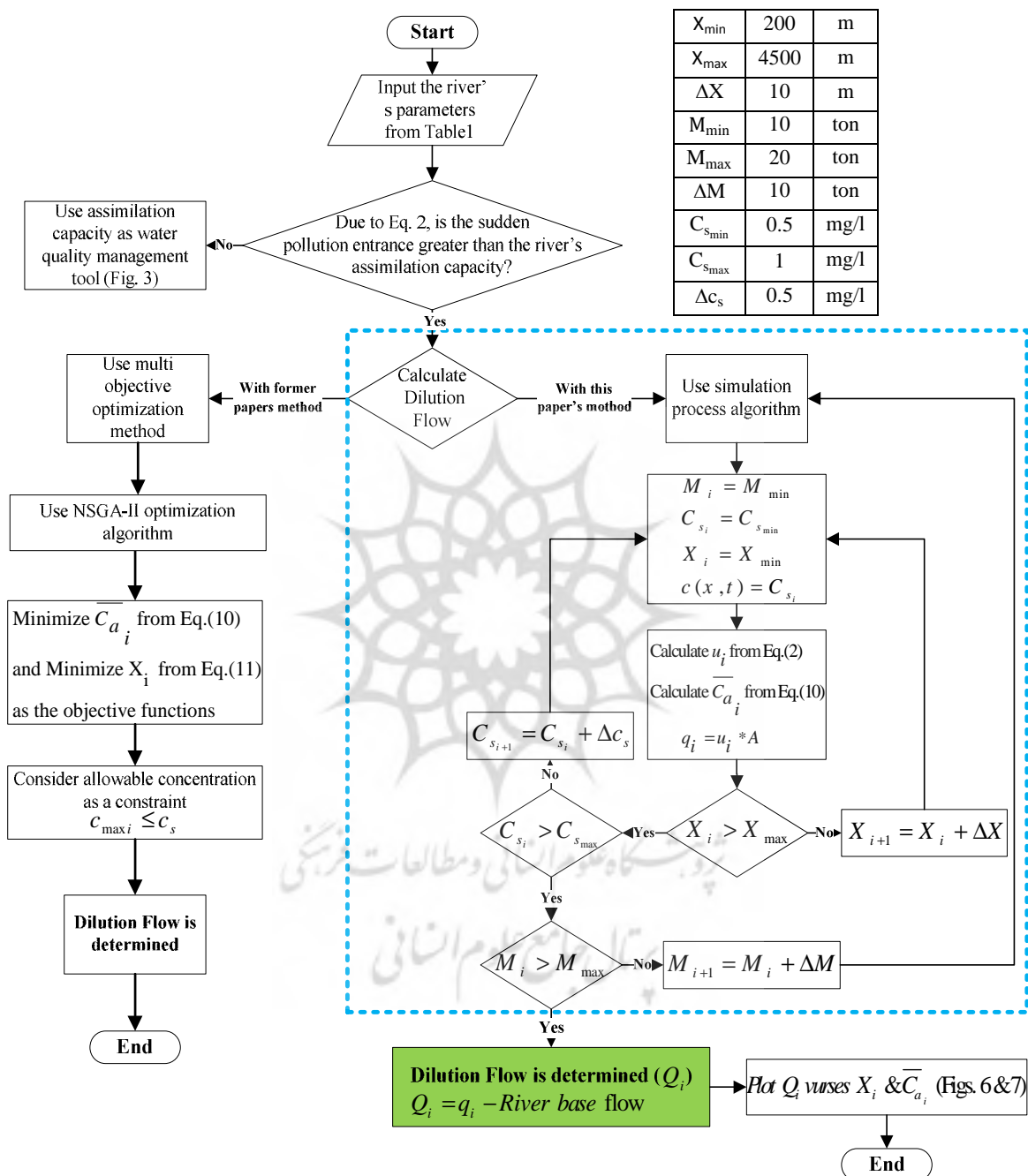
$$\text{Decision variable} = \text{Dilution flow} = 0.07 \text{ until } 8 \text{ m}^3/\text{s}$$

برای پاسخ به رابطه ۱۲ و محاسبه جریان رقیق‌ساز در تحقیقات پیشین از بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است (فرهادیان و همکاران ۲۰۱۴؛ هاشمی منفرد و همکاران ۲۰۱۷)؛ اما در تحقیق حاضر با توجه به ماهیت مساله تعیین جریان رقیق‌ساز (رابطه ۱۲) که فقط یک متغیر تصمیم، دو تابع هدف و دو قید دارد، می‌توان بدون استفاده از روش - های وقت‌گیر بهینه‌سازی، تنها با شبیه‌سازی جریان رقیق‌ساز موردنیاز را محاسبه کرد. به این ترتیب که در برنامه کامپیوتری شبیه‌سازی نوشته شده، برای هر حالت مشخص از شرایط هیدرولیکی و کیفی رودخانه، جریان رقیق‌ساز مناسب و لازم محاسبه می‌شود و مقدار آلاینده غیرمجاز وارد شده اولیه را به مقدار مجاز می‌رساند. در این فرایند سایر توابع هدف نیز مانند \bar{c}_a ، X و T در هر حلقه از برنامه محاسبه می‌شوند (شکل ۴).

در تحقیق حاضر، مساله مربوط به تعیین جریان رقیق‌ساز، بوسیله روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب پاسخ داده شده است و برنامه کامپیوتری نوشته شده در این مقاله، بسیار سریعتر از روش‌های مرسوم قبلی بهینه‌سازی، جریان رقیق-ساز موردنیاز را شبیه‌سازی می‌کند. همانطور که در رابطه ۱۲ بیان شد در این قسمت، دو مقدار آلودگی ۱۰ و ۲۰ تن بطور ناگهانی به رودخانه تخلیه می‌شوند و هدف، رساندن این مقادیر غلظت بالا و خطرناک آلودگی به دو مقدار مجاز ۰/۵ و ۱ میلی‌گرم بر لیتر با اعمال جریان رقیق‌ساز می‌باشد. بنابراین چهار سناریو برای تعیین میزان جریان رقیق‌ساز موردنیاز، وجود خواهد داشت تا مخاطرات وارده به محیط‌زیست کمینه گردند.



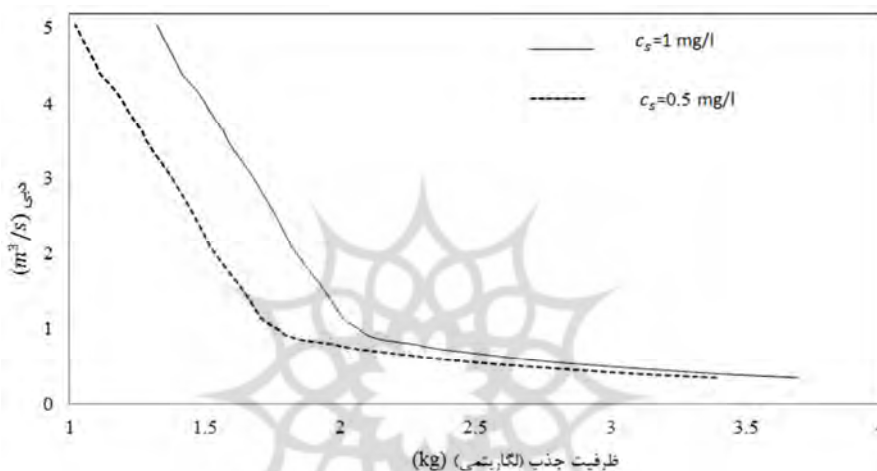
شکل ۳: روندنمای مقایسه محاسبه ظرفیت جذب بوسیله روش پیشنهادی این تحقیق و تحقیقات پیشین



شکل ۴: روندنمای مقایسه محاسبه جریان رقیق‌ساز بوسیله روش پیشنهادی این تحقیق و تحقیقات پیشین

اکنون نتایج کامل حاصل از فرایندهای شبیه‌سازی در محاسبه ظرفیت جذب و جریان رقیق‌ساز ارائه می‌گردد. برای تعیین حداکثر ظرفیت جذب، مقدار آب قابل رهاسازی از مخزن بالادست و مقدار آلودگی تخلیه شده به رودخانه، قابل تنظیم می‌باشند (شکل ۲). بنابراین برای هر مقدار آزادسازی آب، حداکثر ظرفیت جذب قابل محاسبه است. در واقع ظرفیت جذب عبارتست از حداکثر مقدار توده‌ی آلودگی‌ای که می‌تواند به رودخانه وارد شود بطوریکه غلظت

آلاینده از مقدار (C_s) بعد از محل برداشت آب (X)، کمتر باشد. لازم به ذکر است که در سرعت جریان آب ثابت (مخزن تنظیمی در بالادست رودخانه موجود نباشد) و در قید (C_s) ثابت، با افزایش محل برداشت آب از نقطه تخلیه آلودگی، ظرفیت جذب افزایش می‌یابد. شکل ۵ نشانگر نمودار حداکثر ظرفیت جذب سیستم رودخانه-مخزن می‌باشد. این نمودار، خروجی برنامه کامپیوتری نوشته شده در نرم افزار متلب می‌باشد که تحت مقادیر دبی مختلف برای تامین نیاز آبی پایین دست، برای هر دو مقدار غلظت مجاز پایین دست مساوی 0.5 و 1 میلی گرم بر لیتر رسم شده است.



شکل ۵: مقادیر حداکثری ظرفیت جذب سیستم رودخانه-مخزن برای مقادیر مختلف رهاسازی آب برای غلظت مجاز پایین دست 1 mg/l و 0.5 mg/l

بر اساس شکل بالا، دو نتیجه مهم حاصل می‌شود.

(۱) افزایش در مقدار غلظت مجاز پایین دست از مقدار 0.5 به 1 میلی گرم بر لیتر، باعث افزایش در مقدار حداکثری ظرفیت جذب با همان نسبت می‌شود. به این معنا که برای مساله موجود در این تحقیق، برای هر آزادسازی مشخص آب از مخزن بالادست و در فاصله آسیب دیده ثابت ($X=200m$)، با دو برابر شدن (C_s) از مقدار 0.5 به 1 میلی گرم بر لیتر، حداکثر ظرفیت جذب نیز دو برابر می‌شود.

(۲) کاهش دبی جریان باعث افزایش ظرفیت جذب می‌شود؛ زیرا با افزایش دبی، زمان تماس آلودگی با غلظت غیرمجاز با آب کاهش یافته و زمان لازم برای پوسیدگی و پخش آلودگی هم کاهش می‌یابد. بنابراین این امر باعث انتقال سریع آلودگی از نقطه وقوع به سمت پایین دست رودخانه می‌شود. بنابراین پیک زنگوله آلودگی در نقاط پایین دست افزایش یافته و مدل شبیه سازی ظرفیت جذب، مجبور است برای رسیدن به غلظت مجاز در نقاط پایین دست، میزان آلودگی ورودی را کاهش دهد تا قید غلظت مجاز برآورده شود.

در محاسبه جریان رقیق ساز مناسب برای کمینه کردن خسارات ناشی از آلودگی با استفاده از روش شبیه سازی نمایش داده شده در روندنمای شکل ۴، نمودارهای ۶ و ۷ حاصل شد. این نمودارها مقادیر جریان رقیق ساز در مقابل متوسط مساحت غلظت غیرمجاز و فاصله آسیب دیده را بطور همزمان برای غلظت مجاز پایین دست 1 و 0.5 میلی گرم بر لیتر نشان می‌دهند. با توجه و مقایسه دو نمودار ۶ و ۷ نتایج به شرح زیر حاصل می‌شود.

* در یک ورودی آلودگی ثابت و مشخص، با کاهش غلظت مجاز پایین دست (از ۱ به ۰/۵ میلی گرم برلیتر در این مطالعه)، بازه \bar{c}_a و X افزایش می یابد.

* برای یک توده آلودگی مشخص وارد شده به رودخانه، غلظت مجاز پایین دست ثابت و با توجه به نظر سیاست مدار بخش آب مبنی بر محل برداشت آب، مقدار بهینه \bar{c}_a و جریان رقیق ساز مورد نیاز تعیین می شود.

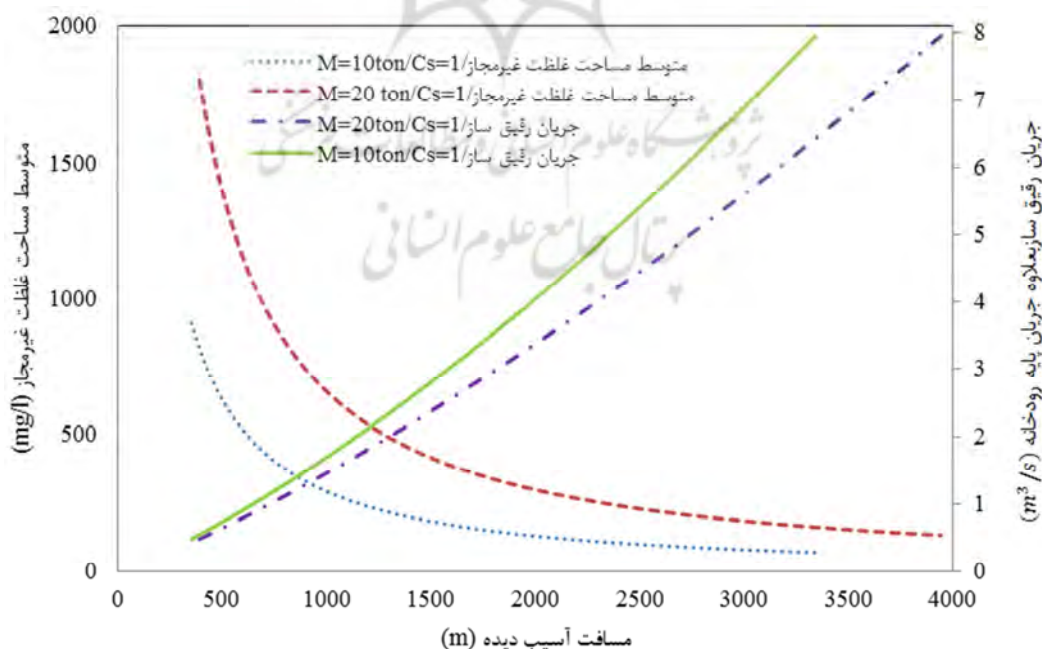
* در یک غلظت آلودگی پایین دست مشخص و ثابت، با افزایش مقادیر ورودی آلودگی از ۱۰ به ۲۰ تن، \bar{c}_a نیز با یک نسبت مشابه افزایش می یابد.

* در یک غلظت آلودگی پایین دست مشخص و ثابت، با افزایش مقادیر ورودی آلودگی از ۱۰ به ۲۰ تن، مقادیر مسافت آسیب دیده نیز حدود ۵۰۰ متر افزایش می یابد.

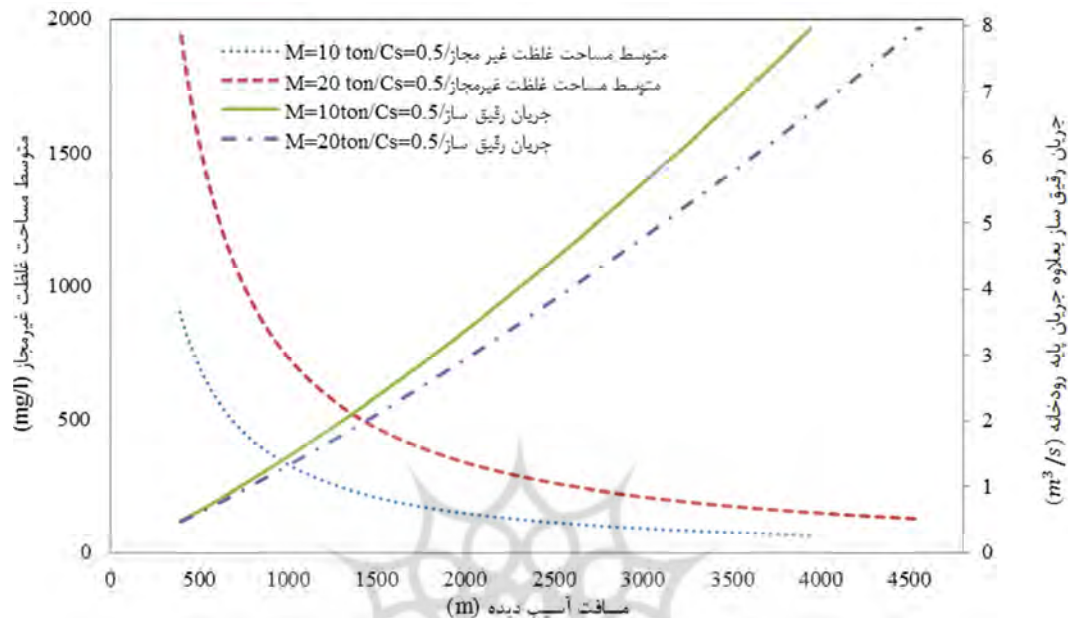
* در یک غلظت آلودگی پایین دست مشخص و ثابت، با افزایش مقادیر ورودی آلودگی از ۱۰ به ۲۰ تن، شیب نمودار جریان رقیق ساز کاهش می یابد.

* در یک توده آلودگی مشخص ورودی، غلظت آلودگی پایین دست ثابت، با بکارگیری جریان رقیق ساز مقادیر حیاتی کیفی \bar{c}_a کاهش می یابد.

* در واقع نمودارهای ۶ و ۷ نشانگر فرایند تدریجی اصلاح کیفیت آب و رسیدن غلظت آلودگی ورودی از $(M=10\&20 \text{ ton})$ به $(c_s=0.5\&1 \text{ mg/l})$ در پایین دست رودخانه با بکارگیری جریان رقیق ساز می باشد. در این بین مقادیر پارامترهای حیاتی کیفی رودخانه شامل X & \bar{c}_a نیز محاسبه می گردد.



شکل ۶: مقادیر جریان رقیق ساز در مقابل متوسط مساحت غلظت غیرمجاز و فاصله آسیب دیده برای غلظت مجاز پایین دست ۱ mg/l



شکل ۷: مقادیر جریان رقیق‌ساز در مقابل متوسط مساحت غلظت غیرمجاز و فاصله آسیب‌دیده برای غلظت مجاز پایین‌دست ۰/۵ mg/l

یکی از نتایج بسیار مهم تعیین جریان رقیق‌ساز، علاوه بر کاهش متوسط مساحت غلظت غیرمجاز \bar{c}_a ، کاهش زمان تماس غلظت آلودگی غیرمجاز (T) در رودخانه است. در زمان ورود آلودگی ناگهانی به رودخانه، کاهش دادن زمان تماس آلودگی غیرمجاز با آب بدلیل کاهش اکسیژن محلول در آب، بسیار مهم است. هرچند بدلیل رابطه مستقیم بین متوسط مساحت غلظت غیرمجاز و زمان تماس، کمینه کردن متوسط مساحت غلظت غیرمجاز، بصورت طبیعی باعث مینیمم شدن زمان تماس آلودگی غیرمجاز نیز می‌شود، پس نیازی به در نظر گرفتن زمان تماس بعنوان پارامتری جداگانه در فرایند شبیه‌سازی نیست. رابطه مستقیم بین پارامترهای \bar{c}_a و T و همچنین رابطه معکوس این دو پارامتر با X، بصورت هم‌زمان در قالب نمودارهای سه‌محوره ۸ و ۹ برای دو مقدار ($c_s = 0.5 \text{ mg/l}$) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که شکل‌های ۸ و ۹ زمانی استفاده می‌شود که مدیر و کارشناس بخش آب، زمان تماس آلودگی با غلظت غیرمجاز با آب را بعنوان یک قید برای محافظت از محیط‌زیست رودخانه در نظر بگیرد، یعنی بعنوان مثال گونه‌ای جانور آبی در رودخانه موجود باشد که بیشتر از یک زمان مشخص (زمان تماس) نتواند در آب با غلظت غیرمجاز زندگی کند. در چنین شرایطی، زمان تماس آلودگی غیرمجاز با آب، یک قید برای مدیریت کیفیت آب به حساب می‌آید و سایر پارامترهای کیفی رودخانه شامل \bar{c}_a ، X و جریان رقیق‌ساز موردنیاز محاسبه می‌شوند. موارد ذیل از تحلیل شکل‌های ۸ و ۹ استنتاج می‌شوند.

* در یک ورودی آلودگی ثابت و مشخص، با کاهش غلظت مجاز پایین‌دست (از ۱ به ۰/۵ میلی‌گرم برلیتر در این مطالعه)، بازه \bar{c}_a به میزان ۴/۵۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش و T به میزان ۱۷ ثانیه افزایش می‌یابد.

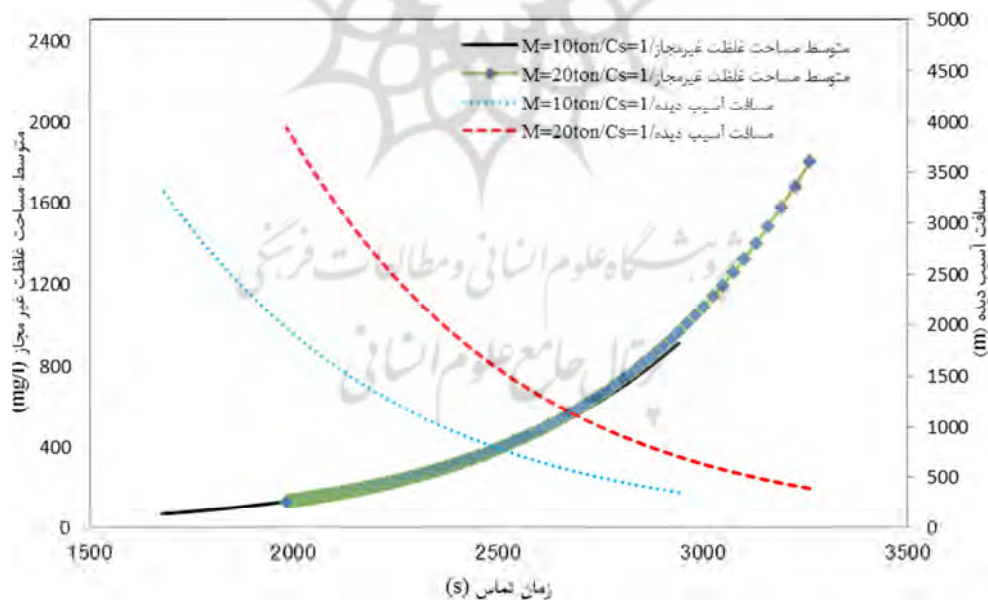
* در یک غلظت آلودگی پایین دست مشخص و ثابت، با افزایش مقادیر ورودی آلودگی از ۱۰ به ۲۰ تن، در حالت $c_s = 1\text{mg/l}$ ، زمان تماس ۱۷ ثانیه و در حالت $c_s = 0.5\text{mg/l}$ ، زمان تماس ۵۲ ثانیه افزایش یافت.

* در یک غلظت آلودگی پایین دست مشخص و ثابت، با افزایش مقادیر ورودی آلودگی از ۱۰ به ۲۰ تن، \bar{c}_a نیز افزایش می یابد.

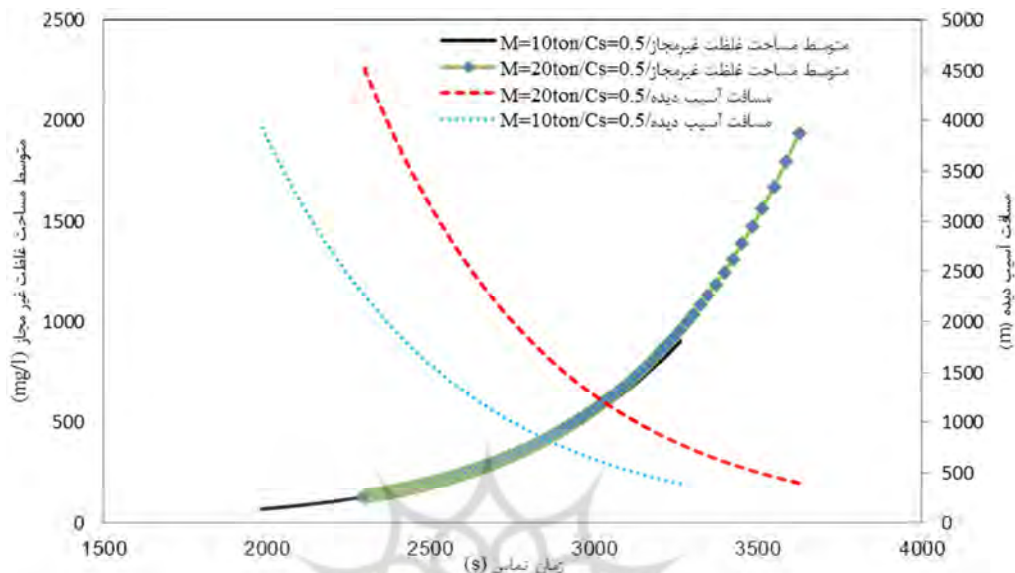
* برای یک توده آلودگی مشخص وارد شده به رودخانه، غلظت مجاز پایین دست ثابت و با توجه به نظر سیاست مدار بخش آب مبنی بر زمان تماس آلودگی با رودخانه، مقدار بهینه \bar{c}_a و جریان رقیق ساز مورد نیاز تعیین می شود.

* در شرایطی که زمان تماس قید باشد، به ازای هر زمان تماس مشخص و سایر ویژگی های معلوم از رودخانه مانند مانند توده آلودگی ورودی (در این مساله ۱۰ و ۲۰ تن) و غلظت مجاز پایین دست (۰/۵ و ۱ میلی گرم بر لیتر)، جریان رقیق ساز و همچنین متوسط مساحت غلظت غیرمجاز مناسب، تعیین می شود.

* با توجه به نمودارهای ۸ و ۹ در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۷۵۰ ثانیه برای $c_s = 1\text{mg/l}$ و بازه زمانی ۲۲۵۰ تا ۳۰۰۰ ثانیه برای $c_s = 0.5\text{mg/l}$ ، مقادیر \bar{c}_a برای دو آلودگی ورودی ۱۰ و ۲۰ تن تقریباً روی هم قرار می گیرد، اما مقادیر X در لحظات فوق تحت دو آلودگی ورودی ۱۰ و ۲۰ تن با یکدیگر تفاوت چشمگیری دارد که این نتایج حاکی از آنست که در این دو حالت مختلف ورود آلودگی، شرایط کیفی رودخانه کاملاً متفاوت می باشد.



شکل ۸: ارتباط بین پارامترهای حیاتی کیفی رودخانه شامل متوسط مساحت غلظت غیرمجاز، مسافت آسیب دیده و زمان تماس برای غلظت مجاز پایین دست 1mg/l



شکل ۹: ارتباط بین پارامترهای حیاتی کیفی رودخانه شامل متوسط مساحت غلظت غیرمجاز، مسافت آسیب دیده و زمان تماس برای غلظت مجاز پایین دست 0.5 mg/l

نتیجه گیری

در این تحقیق دو ابزار مدیریت کیفی برای کنترل و حفاظت کیفیت آب در هنگام ورود آلودگی در رودخانه تحلیل و محاسبه شد. ظرفیت جذب برای زمانیکه آلودگی وارده به رودخانه کنترل پذیر است و جریان رقیق ساز برای هنگامیکه آلودگی وارده غیرقابل کنترل بوده و مقدار آن بیشتر از ظرفیت جذب رودخانه باشد. در این پژوهش بمنظور محاسبه-ی ظرفیت جذب از روش شبیه سازی جدید با گام های مشخص بدون استفاده از روش های بهینه سازی، استفاده شد. برای شبیه سازی انتقال آلودگی در رودخانه، از حل تحلیلی معادله انتقال-پخش استفاده شد. منطقه مطالعاتی یک منطقه پنج مارک در زمینه مدیریت کیفی سیستم های رودخانه-مخزن که در تحقیقات قبلی استفاده شده بود، انتخاب شد. کلیه فرایندهای شبیه سازی و حل معادلات در نرم افزار متلب کدنویسی شد و روندنمای مراحل شبیه سازی در تحقیق قرار داده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که تغییرات دبی سیستم رودخانه-مخزن در بازه 0.3 تا 0.5 متر مکعب در ثانیه، می تواند باعث تاثیرات و تغییرات موثر و بزرگی در مقادیر ظرفیت جذب شود. این تغییرات دبی در طول دوره شبیه سازی در فاصله آسیب دیده ثابت 200 متری، باعث تغییرات ظرفیت جذب از 10.5 تا 2450 کیلوگرم برای غلظت مجاز پایین دست 0.5 میلی گرم بر لیتر و از 21 تا 4900 کیلوگرم برای غلظت مجاز پایین دست 1 میلی گرم بر لیتر می شود.

در تعیین جریان رقیق ساز موردنیاز برای حفاظت کیفی رودخانه از روش شبیه سازی جدید ارائه شده در این تحقیق استفاده شد که نسبت به روش بهینه سازی معرفی شده در تحقیقات پیشین مناسب تر و سریع تر می باشد. سه پارامتر (\bar{C}_a, X, T) در روند محاسبه جریان رقیق ساز محاسبه شدند. نتایج برای دو غلظت آلودگی مجاز (0.5 و 1 میلی گرم

بر لیتر) و دو مقدار آلودگی ورودی (۱۰ و ۲۰ تن)، نشان داد که برای هر مقدار جریان رقیق‌ساز، مقادیر \bar{c}_a ، X و T در یک بازه مشخص، متغیر است. این مقادیر در بازه‌ی ۶۶/۱۲ تا ۱۹۳۹/۲۶ میلی‌گرم بر لیتر برای \bar{c}_a ، ۳۵۲/۸ تا ۴۵۶۱/۱ متر برای X و در بازه‌ی ۱۶۷۷ تا ۳۶۲۴ ثانیه برای T متغیر بودند.

بطور کلی استفاده از تنظیم شدت جریان آب بالادست برای از بین بردن اثر غلظت غیرمجاز آلاینده‌ها، یک راه حل عملی اصلاحی مقرون بصرفه در مدیریت کیفی منابع آب می‌باشد. با توجه به اهمیت هر یک از جنبه‌های توابع هدف و پارامترهای \bar{c}_a ، X و T و با توجه به نظر مدیران و سهامداران بخش آب، باید در هنگام وقوع بحران ورود آلودگی، از یکی از ابزارهای بیان شده (ظرفیت جذب و یا جریان رقیق‌ساز) برای مدیریت کیفی آب استفاده نمود. مقادیر فوق‌الذکر برای مدیریت کیفی منطقه مطالعاتی این تحقیق بسیار حیاتی می‌باشد. بنابراین می‌توان با بکارگیری الگوریتم‌های شبیه‌سازی ارائه شده در این تحقیق و محاسبه مقادیر پارامترهای حیاتی کیفی معرفی شده، برای منابع آب کشور، محیط‌زیست این منابع حیاتی را در مقابل مخاطرات محیطی مختلف مدیریت نمود.

منابع

- هاشمی منفرد سید آرمان، دهقانی درمیان محسن، پیرزاده بهاره، اژدری مقدم مهدی. (۱۳۹۵). پیش بینی کیفیت آب در جریان های یک بعدی به کمک تابع انتقال آلودگی جدید و اصلاح معیار همگرایی، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۲): ۱۴۷-۱۶۲.
- مقیمي نژاد سمیه، ابراهیمی کیومرث، کراچیان رضا. (۱۳۹۶). مطالعه تغییرات فصلی خودپالایی رودخانه کارون، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۴۹(۴): ۶۲۱-۶۳۴.
- Abbasi SA (1976) Extraction and spectrophotometric determination of vanadium (V) with N-[p-N, Ndimethylanilino-3-methoxy 2-naphtho] hydroxamic acid. *Anal Chem* 48(4):714-717.
- Abbasi SA, Soni R (1983) Stress-induced enhancement of reproduction in earthworm *Octochaetus pattoni* exposed to chromium (VI) and mercury (II) - implications in environmental management. *Int J Environ Stud* 22(1):43-47.
- Abbasi SA, Soni R (1984) Teratogenic effects of chromium (VI) in environment as evidenced by the impact on larvae of amphibian *Rana tigrina*: Implications in the environmental management of chromium. *Int J Environ Stud* 23(2):131-137.
- Abbasi T, Abbasi SA (2012) *Water-Quality Indices Elsevier*.
- Ali, U., Mahmood, A., Syed, J.H., Li, J., Zhang, G., Katsoyiannis, A., Jones, K.C., Malik, R.N., (2015a) Assessing the combined influence of TOC and black carbon in soil-air partitioning of PBDEs. *Environmental Pollution*. 201, 131-140.
- Ali, U., Riaz, R., Sweetman, A.J., Jones, K.C., Li, J., Zhang, G. and Malik, R.N., (2018b) Role of black carbon in soil distribution of organochlorines in Lesser Himalayan Region of Pakistan. *Environmental Pollution*, 236, pp.971-982.
- Ali, U., Sweetman, A.J., Jones, K.C., Malik, R.N., (2018a) Higher atmospheric levels and contribution of black carbon in soil-air partitioning of organochlorines in Lesser Himalaya. *Chemosphere*. 191, 787-798.
- Ali, U., Sweetman, A.J., Riaz, R., Li, J., Zhang, G., Jones, K.C. and Malik, R.N., (2018c) Sedimentary black carbon and organochlorines in Lesser Himalayan Region of Pakistan: Relationship along the altitude. *Science of The Total Environment*, 621, pp.1568-1580.
- Ali, U., Syed, J.H., Mahmood, A., Li, J., Zhang, G., Jones, K.C., Malik, R.N., (2015b) Influential role of black carbon in the soil-air partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Indus River Basin, Pakistan. *Chemosphere*. 134, 172-180.
- Cairns Jr (1977) Aquatic ecosystem assimilative capacity. *Fisheries* 2:5-13.
- Colman JA, Massey AJ, Levin SB (2011) Determination of Dilution Factors for Discharge of Aluminum Containing Wastes. Public Water-Supply Treatment Facilities into Lakes and Reservoirs in Massachusetts. Prepared in cooperation with the Massachusetts Department of Environmental Protection Scientific.
- De Andrade LN, Mauri GR, Mendonça ASF (2013) General multi-objective model and simulated annealing algorithm for waste-load allocation. *J Water Resour Plann Manage* 139(3).
- Dehghani Darmian, M., Hashemi Monfared, S.A., Azizyan, G., Snyder, S.A. Giesy, J.P., 2018. Assessment of tools for protection of quality of water: Uncontrollable discharges of pollutants. *Ecotox Environ Safe* 161, 190-197.
- De Smedt F, Brevis W, Debels P (2005) Analytical solution for solute transport resulting from instantaneous injection in streams with transient storage. *J Hydrology*. 315:25-39.

- Farhadian M, Bozorg Haddad O, Seifollahi Aghmiuni S, Loáiciga AH (2014) Assimilative capacity and flow dilution for water quality protection in rivers. *J Hazard Toxic Radioact Waste* 19(2).
- Fischer HB (1975) Discussion of simple method for predicting dispersion in streams. By McQuiver, R. S. and Keefer, T. N. *J Environ Eng* 101:453-455.
- Glasoe S, Steiner F, Budd W, Young G (1990) Assimilative capacity and water resource management: four examples from the United States. *landscape and urban planning* 19:17-46.
- Hashemi Monfared SA, Dehghani Darmian M (2016) Evaluation of Appropriate Advective Transport Function for One-Dimensional Pollutant Simulation in Rivers. *Int J Environ Res* 10 (1):77-84.
- Hashemi Monfared, S.A., Dehghani Darmian, M., Snyder, S.A., Azizyan, G., Pirzadeh, B., Azhdary Moghaddam, M., 2017. Water Quality Planning in Rivers: Assimilative Capacity and Dilution Flow. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99 (5), 531-541.
- Hashemi Monfared SA, Mirbagheri SA, Sadrnejad SA (2014) A three-dimensional, integrated seasonal separate advection diffusion model (ISSADM) to predict water quality patterns in the chahnimeh reservoir. *Environ Model Softw* 19(1):71-83.
- Karamouz M, Kerachian R, Mahmoodian M (2003) Seasonal waste-load allocation model for river water quality management: Application of sequential dynamic genetic algorithms. *World Water and Environmental Resources Congress*, ASCE, Reston, VA.
- Khorsandi, M., Bozorg Haddad, O., Marino, M., (2014) Application of Data-Driven and Optimization methods in Identification of Location and Quantity of Pollutants. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*. 04014031(9).
- Keeling AM (2007) M, Charting marine pollution science: oceanography on Canada's Pacific coast, 1938-1970 33:403-428.
- Landis WG (2008) Defining Assimilative Capacity Application of Assimilative Capacity to the TMDL Process. USEPA (1999) Protocol for Developing Nutrient TMDLs, Elsevier B.V. All rights reserved. 264-268.
- Mahmoudi, N., Orouji, H., Fallah-Mehdipour, E., (2016) Integration of Shuffled Frog Leaping Algorithm and Support Vector Regression for Prediction of Water Quality Parameters. *Water Resour Manage*. 30(7), 2195-2211.
- GESAMP. (1986) Environmental capacity. An approach to marine pollution prevention. No. 30.
- Seo IW, Cheong TS (1998) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *J Hydraul Eng* 124(1).
- Shokri A, Bozorg Haddad O, Marino M (2014) Multi-Objective Quantity-Quality Reservoir Operation in Sudden Pollution. *Water Resour Manage* 28:567-586.
- Spanou M, Chen D (2000) An object-oriented tool for the control of point-source pollution in river systems. *Environ Model Softw* 15:35-54.
- The United Nations Conference on the Human Environment, having met at Stockholm from 5 to 16 June 1972.
- van Genuchten MTh, Alves WJ (1982) Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin, 1661:1-151.
- Wu, X., Wang, S., Chen, H., Jiang, Z., Chen, H., Gao, M., Bi, R., Klerks, P.L., Wang, H., Luo, Y. and Xie, L., (2017) Assessment of metal contamination in the Hun River, China, and evaluation of the fish *Zacco platypus* and the snail *Radix swinhoei* as potential biomonitors. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7), pp.6512-6522.
- Zhang, K., Su, F., Liu, X., Song, Z., Feng, X., (2017) Heavy metal concentrations in water and soil along the Hun River, Liaoning, China. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99:391-398.

Research Article

Analysis and Calculation of the Required Tools for Water Quality Protection in order to Minimize Environmental Hazards

Mohsen Dehghani Darmian¹, Gholamreza Azizyan*², Seyed Arman Hashemi Monfared³

Received: 21-10-2018

Revised: 04-11-2018

Accepted: 05-12-2018

Abstract

The occurrence of factors such as decreasing atmospheric precipitation, population growth, and industry progress has increased the importance of paying attention to the proper quality management of water resources. Pollution sources are categorized in different aspects. In this research, controllable and uncontrollable pollutant management is considered. To manage and control the damages caused by each of these types of pollutants, a certain qualitative tool is employed. Assimilation capacity is suggested when the pollution source is controllable and dilution flow is the proposed tool of this investigation to uncontrollable pollution management. To analyze and calculate the above mentioned qualitative tools, the simulation process is used by the analytical solution of the advection-diffusion equation. The case study considered in this research is an area with specific characteristics, which has been investigated by many previous types of research. Efficient indices in the determination of qualitative tools including the mean area of unallowable concentration (\bar{c}_a), affected distance (X) and duration of unallowable pollution concentration contact with the river (T) was calculated in each simulation process loop. The results demonstrated that 94.1% variation of river-reservoir flow discharge can change the assimilation capacity up to 99.3%. Moreover, by applying a suitable dilution flow, 10 and 20 tons of sudden contaminants arrived at the permitted concentrations of 0.5 and 1 mg / l over the river. In this process, the values of the crucial quality parameters of the river (\bar{c}_a , X, T) change up to 96.6%, 92.2% and 53.7%, respectively.

Keywords: Water quality management, Abrupt pollution control, Assimilation capacity, Dilution flow, a Quality simulation model.

¹- Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Iran.

^{2*}- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Iran
Email: g.azizyan@eng.usb.ac.ir

³- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Iran

References

References (in Persian)

- Hashemi Monfared SA, Dehghani Darmian M, Pirzadeh B, Azhdary Moghaddam M (2016) Water quality prediction in one-dimensional flow by means of new advective transport function and convergence criteria modification. *J of Water and Soil Conservation* 23(2):147-162. [In Persian]
- Moghimi Nezaad S, Ebrahimi K, Kerachian R (2018) Investigation of seasonal self-purification variations of Karun river, Iran. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 49(4):621-634. [In Persian]

References (in English)

- Abbasi SA (1976) Extraction and spectrophotometric determination of vanadium (V) with N-[p-N, Ndimethylanilino-3-methoxy 2-naphtho] hydroxamic acid. *Anal Chem* 48(4):714-717.
- Abbasi SA, Soni R (1983) Stress-induced enhancement of reproduction in earthworm *Octochaetus pattoni* exposed to chromium (VI) and mercury (II) - implications in environmental management. *Int J Environ Stud* 22(1):43-47.
- Abbasi SA, Soni R (1984) Teratogenic effects of chromium (VI) in environment as evidenced by the impact on larvae of amphibian *Rana tigrina*: Implications in the environmental management of chromium. *Int J Environ Stud* 23(2):131-137.
- Abbasi T, Abbasi SA (2012) *Water-Quality Indices* Elsevier.
- Ali, U., Mahmood, A., Syed, J.H., Li, J., Zhang, G., Katsoyiannis, A., Jones, K.C., Malik, R.N., (2015a) Assessing the combined influence of TOC and black carbon in soil-air partitioning of PBDEs. *Environmental Pollution*. 201, 131-140.
- Ali, U., Riaz, R., Sweetman, A.J., Jones, K.C., Li, J., Zhang, G. and Malik, R.N., (2018b) Role of black carbon in soil distribution of organochlorines in Lesser Himalayan Region of Pakistan. *Environmental Pollution*, 236, pp.971-982.
- Ali, U., Sweetman, A.J., Jones, K.C., Malik, R.N., (2018a) Higher atmospheric levels and contribution of black carbon in soil-air partitioning of organochlorines in Lesser Himalaya. *Chemosphere*. 191, 787-798.
- Ali, U., Sweetman, A.J., Riaz, R., Li, J., Zhang, G., Jones, K.C. and Malik, R.N., (2018c) Sedimentary black carbon and organochlorines in Lesser Himalayan Region of Pakistan: Relationship along the altitude. *Science of The Total Environment*, 621, pp.1568-1580.
- Ali, U., Syed, J.H., Mahmood, A., Li, J., Zhang, G., Jones, K.C., Malik, R.N., (2015b) Influential role of black carbon in the soil-air partitioning of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the Indus River Basin, Pakistan. *Chemosphere*. 134, 172-180.
- Cairns Jr (1977) Aquatic ecosystem assimilative capacity. *Fisheries* 2:5-13.
- Colman JA, Massey AJ, Levin SB (2011) Determination of Dilution Factors for Discharge of Aluminum Containing Wastes. Public Water-Supply Treatment Facilities into Lakes and Reservoirs in Massachusetts. Prepared in cooperation with the Massachusetts Department of Environmental Protection Scientific.
- De Andrade LN, Mauri GR, Mendonça ASF (2013) General multi-objective model and simulated annealing algorithm for waste-load allocation. *J Water Resour Plann Manage* 139(3).
- Dehghani Darmian, M., Hashemi Monfared, S.A., Azizyan, G., Snyder, S.A. Giesy, J.P., 2018. Assessment of tools for protection of quality of water: Uncontrollable discharges of pollutants. *Ecotox Environ Safe* 161, 190-197.
- De Smedt F, Brevis W, Debels P (2005) Analytical solution for solute transport resulting from instantaneous injection in streams with transient storage. *J Hydrology*. 315:25-39.
- Farhadian M, Bozorg Haddad O, Seifollahi Aghmuni S, Loáiciga AH (2014) Assimilative capacity and flow dilution for water quality protection in rivers. *J Hazard Toxic Radioact Waste* 19(2).
- Fischer HB (1975) Discussion of simple method for predicting dispersion in streams. By McQuiver, R. S. and Keefer, T. N. *J Environ Eng* 101:453-455.
- Glase S, Steiner F, Budd W, Young G (1990) Assimilative capacity and water resource management: four examples from the United States. *landscape and urban planning* 19:17-46.
- Hashemi Monfared SA, Dehghani Darmian M (2016) Evaluation of Appropriate Advective Transport Function for One-Dimensional Pollutant Simulation in Rivers. *Int J Environ Res* 10 (1):77-84.
- Hashemi Monfared, S.A., Dehghani Darmian, M., Snyder, S.A., Azizyan, G., Pirzadeh, B., Azhdary Moghaddam, M., 2017. Water Quality Planning in Rivers: Assimilative Capacity and Dilution Flow. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99 (5), 531-541.
- Hashemi Monfared SA, Mirbagheri SA, Sadrnejad SA (2014) A three-dimensional, integrated seasonal separate advection diffusion model (ISSADM) to predict water quality patterns in the chahnimeh reservoir. *Environ Model Softw* 19(1):71-83.
- Karamouz M, Kerachian R, Mahmoodian M (2003) Seasonal waste-load allocation model for river water quality management: Application of sequential dynamic genetic algorithms. *World Water and Environmental Resources Congress*, ASCE, Reston, VA.
- Khorsandi, M., Bozorg Haddad, O., Marino, M., (2014) Application of Data-Driven and Optimization methods in Identification of Location and Quantity of Pollutants. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*. 04014031(9).
- Keeling AM (2007) M, Charting marine pollution science: oceanography on Canada's Pacific coast, 1938-1970 33:403-428.
- Landis WG (2008) Defining Assimilative Capacity Application of Assimilative Capacity to the TMDL Process. USEPA (1999) Protocol for Developing Nutrient TMDLs, Elsevier B.V. All rights reserved. 264-268.
- Mahmoudi, N., Orouji, H., Fallah-Mehdipour, E., (2016) Integration of Shuffled Frog Leaping Algorithm and Support Vector Regression for Prediction of Water Quality Parameters. *Water Resour Manage*. 30(7), 2195-2211.
- GESAMP. (1986) Environmental capacity. An approach to marine pollution prevention. No. 30.

- Seo IW, Cheong TS (1998) Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *J Hydraul Eng* 124(1).
- Shokri A, Bozorg Haddad O, Marino M (2014) Multi-Objective Quantity–Quality Reservoir Operation in Sudden Pollution. *Water Resour Manage* 28:567-586.
- Spanou M, Chen D (2000) An object-oriented tool for the control of point-source pollution in river systems. *Environ Model Softw* 15:35-54.
- The United Nations Conference on the Human Environment, having met at Stockholm from 5 to 16 June 1972.
- van Genuchten MTh, Alves WJ (1982) Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin, 1661:1-151.
- Wu, X., Wang, S., Chen, H., Jiang, Z., Chen, H., Gao, M., Bi, R., Klerks, P.L., Wang, H., Luo, Y. and Xie, L., (2017) Assessment of metal contamination in the Hun River, China, and evaluation of the fish *Zacco platypus* and the snail *Radix swinhoei* as potential biomonitors. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(7), pp.6512-6522.
- Zhang, K., Su, F., Liu, X., Song, Z., Feng, X., (2017) Heavy metal concentrations in water and soil along the Hun River, Liaoning, China. *Bull Environ Contam Toxicol*, 99:391–398.

