

تخصیص بار آلودگی مبتنی بر ریسک فازی با استفاده از سیستم نسبت-تجارت (مطالعه موردی: رودخانه خرم آباد)

علی منفرد^۱، حمیدرضا ربیعی^{۲*} فر^۳ و حسین ابراهیمی^۴

چکیده

امروزه یکی از مهم‌ترین ابعاد برنامه‌ریزی و مدیریت شهری، موضوع حفاظت از محیط‌زیست است. برای دستیابی به توسعه پایدار اقتصادی و صنعتی، لازم است اثرات توسعه شهری بر محیط‌زیست در برنامه‌ریزی شهری مورد توجه قرار گیرد. در این مقاله، یک ساختار برنامه‌ریزی بهینه برای کاهش بار آلودگی رودخانه خرم‌آباد، استان لرستان تدوین شده است. سیستم نسبت تجارت فازی توسعه‌یافته براساس تحلیل فازی برای ۹ تخلیه‌کننده با توجه به پارامتر اکسیژن موردنیاز بیوشیمیایی (BOD) برنامه‌ریزی شد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شد. توابع هدف برای تحلیل فازی نقاط بیشینه و کمینه حدود فازی برای تخمین پاسخ‌های غیرقطعی مدل در نظر گرفته شد. علاوه بر این نرخ تبادل آلاینده بین نقاط کنترل تخلیه آلاینده براساس مدل شبیه‌سازی تعادل کیفی به‌دست آمد. نتایج نشان داد که تبادل BOD در ایستگاه‌های پایین‌دست به‌ویژه در محدوده‌های مجتمع کشت و صنعت و کارخانه الکل‌سازی با نرخ تبادل حدود ۲۰ میلی‌گرم در لیتر در وضعیت بحرانی قرار داشت. بهینه‌سازی برای کاهش هزینه تصفیه فاضلاب نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند از نظر اقتصادی حدود ۱۱ درصد بهبود یابد. دامنه امکان‌پذیر تغییرات ریسک در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد ارزیابی شد که حداکثر مقدار تابع هدف برای کارخانه الکل و حداقل مقدار برای کارخانه آرد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی، منابع آلاینده، تخلیه فاضلاب، پایش کیفی آب سطحی.

ارجاع: منفرد ع. ربیعی فر ح. و ابراهیمی ح. ۱۴۰۱. تخصیص بار آلودگی مبتنی بر ریسک فازی با استفاده از سیستم نسبت-تجارت (مطالعه موردی: رودخانه خرم‌آباد). مجله پژوهش آب ایران. ۴۶:

۱- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
۲- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
۳- گروه علوم و مهندسی آب، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴- گروه مهندسی عمران، واحد بین‌الملل کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش، ایران.
۵- گروه علوم و مهندسی آب، واحد شاهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: h_rabieifar@azad.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

مقدمه

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه محققان و سیاست‌گذاران قرار گرفته است، مدیریت کیفیت سیستم‌های رودخانه‌ای برای استفاده بهینه از منابع آب است (لاله‌زاری و همکاران، ۲۰۱۳). بخش عمده‌ای از چارچوب تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت منابع آب به توسعه مدل‌های مدیریت کمی-کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای اختصاص یافته است؛ علاوه بر این، کنترل کیفیت آب رودخانه با رویکردهای اقتصادی بخش مهمی از مدیریت کیفیت و مسائل زیست‌محیطی است. پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی که به رودخانه‌ها تخلیه می‌شوند، اثرات نامطلوبی بر اکوسیستم رودخانه دارند. این پساب‌ها باعث افزایش مواد جامد معلق در آب شده و اکسیژن محلول در آب را به شدت کاهش می‌دهند و در نتیجه امکان خودپالایی رودخانه را کاهش داده یا به طور کامل مختل می‌کنند. مدیریت کیفیت آب پایدار باید قادر به اندازه‌گیری آلاینده‌ها، پیش‌بینی اثرات آلاینده‌ها بر کیفیت آب و تعیین کیفیت آب باشد.

لیبنم و لین (۱۹۶۶) روش برنامه‌نویسی پویا قطعی را توسعه دادند و لوکس و همکاران (۱۹۶۷)، ریول و همکاران (۱۹۶۸) و اربابی و الزینگا (۱۹۷۵) از روش برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت کیفیت سیستم‌های رودخانه‌ای استفاده کردند. در مطالعات فوق راهکارهایی برای مدیریت کیفی رودخانه‌ها با نگرش قطعی ارائه شده است.

فیضی آشتیانی و همکاران (۲۰۱۵) کاربرد روش الگوریتم ژنتیک را در برنامه‌ریزی کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای در شرایط بحرانی بررسی کردند. در این تحقیق سیاست‌های مدیریت کیفیت رودخانه‌ها با توجه به اهدافی از جمله به حداقل رساندن هزینه‌های تصفیه، به حداقل رساندن مجموع تخلفات استانداردهای کیفی آب رودخانه‌ها و یکسان‌سازی میزان تصفیه آلودگی منابع آلاینده تدوین شده است. مدل پیشنهادی در این تحقیق قطعی و غیرفصلی است و نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب روش الگوریتم ژنتیک در برنامه‌ریزی کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای است. ما و همکاران (۲۰۲۰) ایده مدیریت بار آلودگی فصلی در سیستم‌های رودخانه‌ای را پیشنهاد کردند. آنها فرض کردند که رودخانه در همه فصول دارای حالت ثابتی است و شرایط هر دوره زمانی، مستقل از سایر

دوره‌های زمانی است و می‌توان از مدل‌های کلاسیک مدیریت کیفیت رودخانه برای این شرایط استفاده کرد. استفاده از مدل خطی ارائه‌شده در این روش اهمیت سیاست‌های فصلی را در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری کمی و کیفی رودخانه نشان داد.

علاوه بر این، استفاده از تئوری فازی در مدیریت منابع آب توسط سیاست‌گذاران برای یافتن دامنه پاسخ‌های عملی مورد توجه قرار گرفته است. ماجومدار و سوبارو (۲۰۰۴) یک مدل تخصیص بار آلودگی فازی ارائه کردند که در آن توابع هزینه به‌طور مستقیم مورد بررسی قرار گرفت؛ اما توابع سودمند فازی برای واحدهای تخلیه که به‌طور غیرمستقیم هزینه‌های سیستم را در نظر می‌گیرند، ارائه شد. کارمکار و ماجومدار (۲۰۰۶) مدل بهینه‌سازی فازی خاکستری را برای مدیریت کیفیت سیستم‌های رودخانه‌ای توسعه دادند. این مدل چندهدفه، فاصله بین سطوح حذف آلودگی را به حداکثر و سطح نهایی را به حداقل رساند تا عدم قطعیت سیستم را کاهش دهد. عسگری و همکاران (۲۰۲۱) شاخصی مبتکرانه براساس سیستم استنتاج فازی برای ارزیابی کیفیت آب‌های آشامیدنی استان همدان توسعه دادند. نتایج تحلیل حساسیت با استفاده از تئوری فازی نشان داد که آلاینده‌های نیترات، سدیم و سختی کل بیشترین تأثیر را بر سطح شاخص کیفیت آب دارند.

تانگ و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر پارامترهای اقتصادی بر کاهش آلودگی را با استفاده از سیاست تجارت انتشار گازهای گلخانه‌ای در چین ارزیابی کردند و دی اکسید گوگرد را به‌عنوان آلاینده مدنظر قرار دادند. روش تفاوت-در-تفاوت در-تفاوت‌ها برای تعیین کاهش کیفیت آب و شناسایی مکانیسم تأثیرگذار خاص آن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که سیاست مجوز تخلیه قابل تجارت به‌طور قابل توجهی باعث کاهش انتشار این آلاینده شد. گو و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند کیفیت آب در چین بیشتر تحت تأثیر آلاینده‌های صنعتی است. یک چارچوب عملی بین کنترل انتشار کل، محدودیت‌های پساب و تخلیه آلاینده برای مجوزهای تخلیه آلاینده براساس کیفیت آب پیکربندی شد؛ علاوه بر این، یک تجزیه و تحلیل جامع از پتانسیل کاهش آلاینده برای صنعت آفت‌کش برای تعیین سطح فعلی تصفیه فاضلاب انجام شد.

از آنجایی که آلودگی و مشکلات زیست‌محیطی رودخانه‌ها به‌ویژه در مناطق صنعتی و توسعه‌یافته بیشتر بوده است،

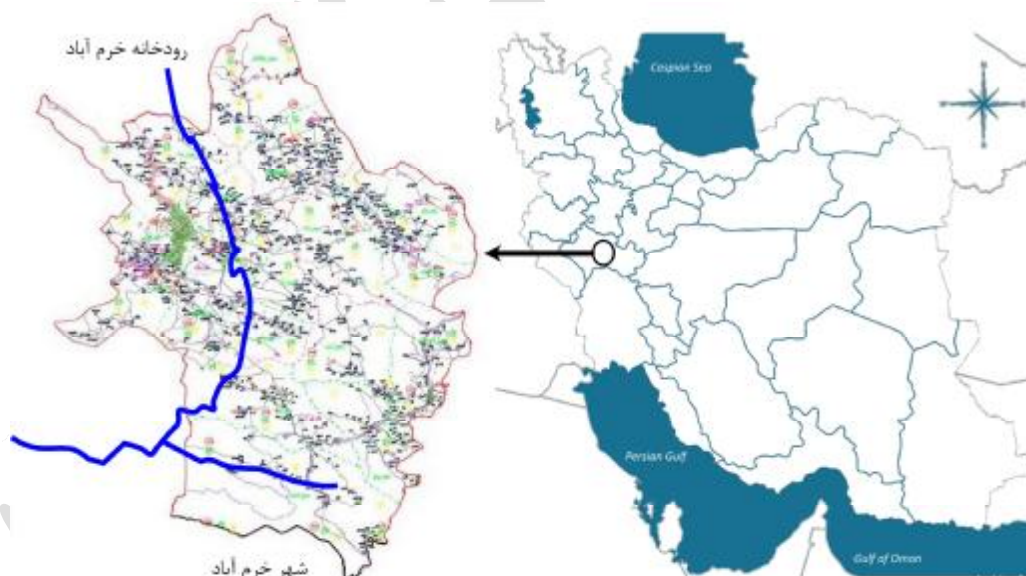
ضمن حفظ کیفیت آب در سطح مطلوب، مدل تجاری بهینه ارائه شده و عدم قطعیت‌های مهم در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

شرح منطقه مورد مطالعه

شهر خرم‌آباد در استان لرستان در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۴۳ دقیقه با ۳۵ کیلومتر مربع مساحت و ۱۱۸۰ متر ارتفاع از سطح دریا واقع شده است. قسمت شمالی شهر کوهستانی و قسمت جنوبی دارای مناظر تقریباً دشتی است. در فاصله بین دشت‌ها و دره‌های شهر، عرض شهر به حداقل رسیده و حدود ۱۱۰۰ متر است. رودخانه خرم‌آباد (جهت شمال به جنوب) از داخل شهر می‌گذرد. رودخانه خرم‌آباد از دو رودخانه رباط و کرگانه تشکیل شده است که در مرکز شهر به هم متصل هستند. در این مقاله از عنوان کلی رودخانه خرم‌آباد برای رودخانه‌های کرگانه و رباط استفاده شده است. شکل ۱ وضعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

بخش عمده مطالعات در زمینه مدیریت کیفی منابع آب به توسعه مدل‌های کمی و کیفی مدیریت اختصاص یافته است. ایران در حال حاضر با بحران زیست‌محیطی و خشکسالی مواجه است و این موضوع اهمیت برنامه‌ریزی در حوزه حفاظت از منابع آب را دو چندان کرده است. امروزه بیشتر شهرهای ایران از جمله خرم‌آباد با مسئله آلودگی محیطی از جمله آلودگی آب‌های سطحی مواجه هستند؛ براین اساس این تحقیق با هدف ارزیابی کیفی سیستم رودخانه با رویکرد مجوز آلودگی مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای اقتصادی ناشی از استفاده بهینه از ظرفیت پذیرش آلودگی سیستم‌های منابع آب و کاهش هزینه‌های تصفیه آلودگی از جمله اهداف اصلی در مدیریت کیفیت منابع آب بوده است؛ بنابراین به منظور توسعه چارچوب تصمیم‌گیری، به هر منبع مجوز تخلیه آلودگی اختصاص داده شد. در این مقاله، ساختار فازی برای بار آلودگی در مدیریت کیفیت رودخانه ارائه شده است تا



شکل ۱- موقعیت رودخانه خرم‌آباد در استان لرستان، ایران

در نقاط مختلف استان لرستان، جنوب این استان جزو مناطق نیمه‌مرطوب (میانگین بارندگی سالانه بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر) و شمال آن مرطوب (میانگین بارندگی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر) است. آب‌وهوای منطقه خرم‌آباد مدیترانه‌ای با زمستان‌های معتدل و تابستان‌های گرم است. بارندگی جوئی اغلب به صورت باران در پاییز و

شرایط اقلیمی و هواشناسی

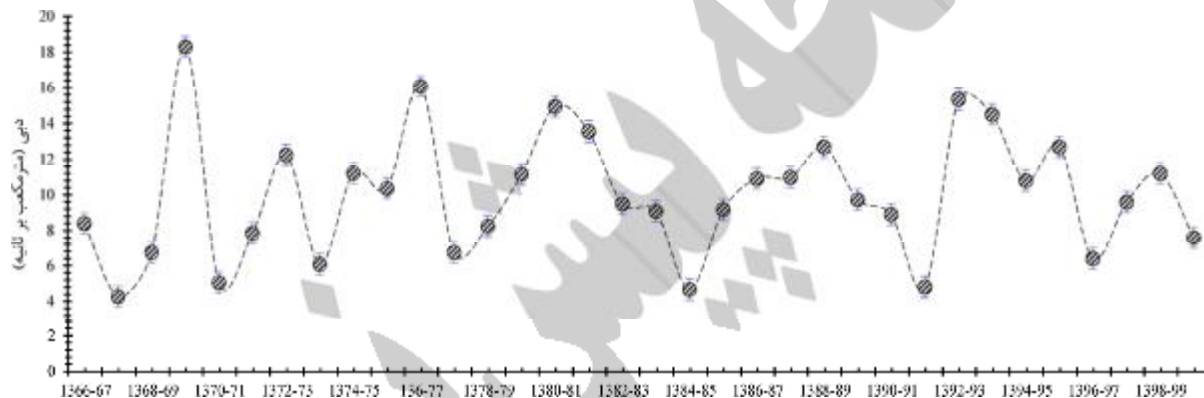
منبع اصلی بارش از مدیترانه و دریای سیاه تا فلات ایران در فصل پاییز و زمستان است و تأثیر ویژگی‌های فیزیوگرافیک و اقلیمی بر این پدیده عامل تعیین‌کننده‌ای در کیفیت - کمیّت و توزیع زمانی و مکانی بارش است. براساس اطلاعات و آمار جمع‌آوری شده از میزان بارندگی

مصرف آب رودخانه خرم‌آباد به چهار دسته مصارف کشاورزی، صنعتی، شهری و روستایی تقسیم می‌شود.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

پارامتر	رابط	خرم‌آباد	کرگانه	چم انجیر
مساحت (کیلومترمربع)	۳۸۱	۵۳۸	۴۰۱	۱۶۵۰
محیط (کیلومتر)	۱۰۰	۱۰۵	۱۰۰	۱۹۲
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۱۷۵۱	۱۶۹۲	۱۶۹۷	۱۶۷۶
طول رودخانه (کیلومتر)	۲۰	۳۴	۳۶	۴۷
شیب (%)	۱/۴۵	۱/۰۳	۲/۶۴	۰/۸۴

متوسط دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری چم انجیر خرم‌آباد در شکل ۲ ارائه شده است. میانگین، حداکثر و حداقل دبی متوسط سالانه این ایستگاه به ترتیب ۱۱/۵، ۱۹/۲ و ۵/۶ متر مکعب بر ثانیه است. متوسط دبی سالانه رودخانه کرگانه ۴/۹ متر مکعب بر ثانیه گزارش شده است.



شکل ۲- میانگین دبی سالانه رودخانه خرم‌آباد (مترمکعب بر ثانیه)

منابع آلودگی صنعتی

شهرستان خرم‌آباد با داشتن ۲۸ درصد از کل صنایع استان لرستان، جزو شهرستان‌های نیمه‌صنعتی محسوب می‌شود. تعداد زیادی واحد صنعتی کوچک و بزرگ در اطراف و نزدیک رودخانه خرم‌آباد و در مسیر آن قرار دارند که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث آلودگی آن می‌شوند. برخی از صنایع فاضلاب را مستقیماً به رودخانه تخلیه می‌کنند، درحالی‌که برخی دیگر پس از تصفیه ناقص، آن را به رودخانه می‌ریزند. در این مقاله، نمونه‌های ترکیبی از آلاینده ۹ صنعت مهم که هم‌اکنون فاضلاب آن‌ها وارد رودخانه می‌شود (با یا بدون تصفیه) تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل

زمستان و به میزان قابل توجهی در بهار رخ می‌دهد و فقط گاهی اوقات در زمستان مقدار کمی برف می‌بارد.

شرایط هیدرولوژیکی منطقه

رودخانه خرم‌آباد که از شهر خرم‌آباد می‌گذرد، از حوزه‌های آبخیز کرگانه، ریمل و بسطام در شمال خرم‌آباد تغذیه می‌شود. خلاصه نتایج فیزیوگرافی حوضه رودخانه خرم‌آباد و سرشاخه‌های آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

مطالعه کمی و کیفی آب رودخانه مستلزم آگاهی از تغییرات و نوسانات میزان آب در ماه‌های مختلف کم‌آبی (تیر، مرداد و شهریور) و پرآبی (دی، بهمن و اسفند) است. برای شناخت علل این نوسانات، لازم است منابع آبی تغذیه‌کننده رودخانه از جمله چشمه‌ها و رواناب به همراه عوامل مؤثر بر این نوسانات مورد مطالعه قرار گیرد. عمده

آلاینده‌های آب

آلاینده‌های ورودی به رودخانه خرم‌آباد به سه دسته شهری، کشاورزی و صنعتی تقسیم می‌شوند. آلاینده‌های شهری و صنعتی می‌توانند بر کیفیت آب رودخانه در منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تأثیر بگذارند. پساب‌های شهری و صنعتی را منابع نقطه‌ای می‌نامند، زیرا از طریق شبکه، لوله یا کانال جمع‌آوری شده و از یک نقطه به رودخانه تخلیه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان منابع آلودگی نقطه‌ای را با تصفیه مناسب فاضلاب قبل از تخلیه به رودخانه تصفیه کرد. علاوه بر این، پساب و رواناب کشاورزی که از طریق مجموعه‌ای از نقاط به رودخانه تخلیه می‌شود، منابع غیرنقطه‌ای نامیده می‌شود.

شیمیایی پساب کارخانه شیر لرستان در جدول ۲ و شکل ۳ آمده است.

کارخانه یخچال‌سازی: میزان فاضلاب تولیدی در کارخانه یخچال‌سازی لرستان ۱۲ مترمکعب در روز فاضلاب انسانی و ۲۵ مترمکعب در روز فاضلاب صنعتی است که در دو سیستم مجزا تصفیه می‌شود. فاضلاب انسانی در سیستم لجن پیوسته با هوادهی مداوم تصفیه و سپس به رودخانه خرم‌آباد تخلیه می‌شود. در سیستم تصفیه فاضلاب صنعتی، ابتدا امولسیون‌های روغن و گریس و سپس مواد معلق در پساب با انعقاد و رسوب از هم جدا می‌شوند و در نهایت پساب پس از تصفیه شیمیایی در محیط تخلیه می‌شود.

شهرک صنعتی: این منبع آلاینده که در جنوب شهر خرم‌آباد قرار دارد، حدود ۱/۵ متر مکعب فاضلاب انسانی با مصرف روزانه ۲ مترمکعب آب تولید می‌کند که در سیستم تصفیه فاضلاب به روش لجن فعال تصفیه می‌شود. پنبیر سفید صنعتی: ۳۶ مترمکعب فاضلاب در کارخانه پنبیر سفید صنعتی تولید می‌شود که بدون تصفیه در زمین‌های کشاورزی تخلیه و پس از آن منبع آلاینده رودخانه خرم‌آباد است.

شرکت کشت و صنعت: حجم فاضلاب تولیدی این مجتمع حدود ۱۱۰ متر مکعب در روز است. جزئیات بیشتر کیفیت فاضلاب در جدول ۲ و شکل ۳ خلاصه شده است. کارخانه الکل: حجم فاضلاب تولیدی کارخانه الکل حدود ۱۵۰ متر مکعب در روز است. حدود ۴۵ متر مکعب در روز فاضلاب با بار آلودگی بسیار بالا بدون تصفیه وارد رودخانه خرم‌آباد می‌شود.

جدول ۲- پارامترهای کیفی آب منابع آلاینده

منابع آلودگی	pH	دما درجه سانتی‌گراد	کدورت NTU	EC میکروزیمنس بر سانتی‌متر	BOD میلی‌گرم در لیتر	COD میلی‌گرم در لیتر	TSS میلی‌گرم در لیتر
PS1 پرورش ماهی	۷/۱	۲۸	۸۴	۴۸۵	۱۴۸	۱۹۵۰	۱۱۰۰
PS2 شرکت پارسیلون	۷/۱	۲۱	۳۱	۵۱۲	۱۲۹	۲۷۵۰	۱۱۲۸
PS3 کارخانه آرد	۶/۲	۱۹	۵۲	۲۳۲۰	۱۹۵	۱۱۵۰	۱۵۱۰
PS4 کارخانه پنبیر	۶/۵	۲۱	۴۵۲	۵۴۹	۱۶۵	۲۹۵	۶۲۰
PS5 شهرک صنعتی	۷/۸	۱۹	۳۸	۸۱۰	۳۶۲	۱۲۷۰	۱۰۵۲
PS6 کارخانه شیر	۶/۹	۲۰	۲۵	۶۲۰	۸۹	۱۶۰	۴۱۲
PS7 کارخانه یخچال	۷/۱	۲۰	۳۲	۱۲۸۰	۸۹	۱۹۲	۶۸۲
PS8 شرکت کشت و صنعت	۶/۲	۱۷	۲۳	۱۲۵۰	۹۵	۱۸۲	۹۲۱
PS9 کارخانه تولید الکل	۵	۵۱	< ۱۰۰۰	۴۱۲۰۰	۴۲۰۰۰	۶۰۵۰۰	۲۴۰۰

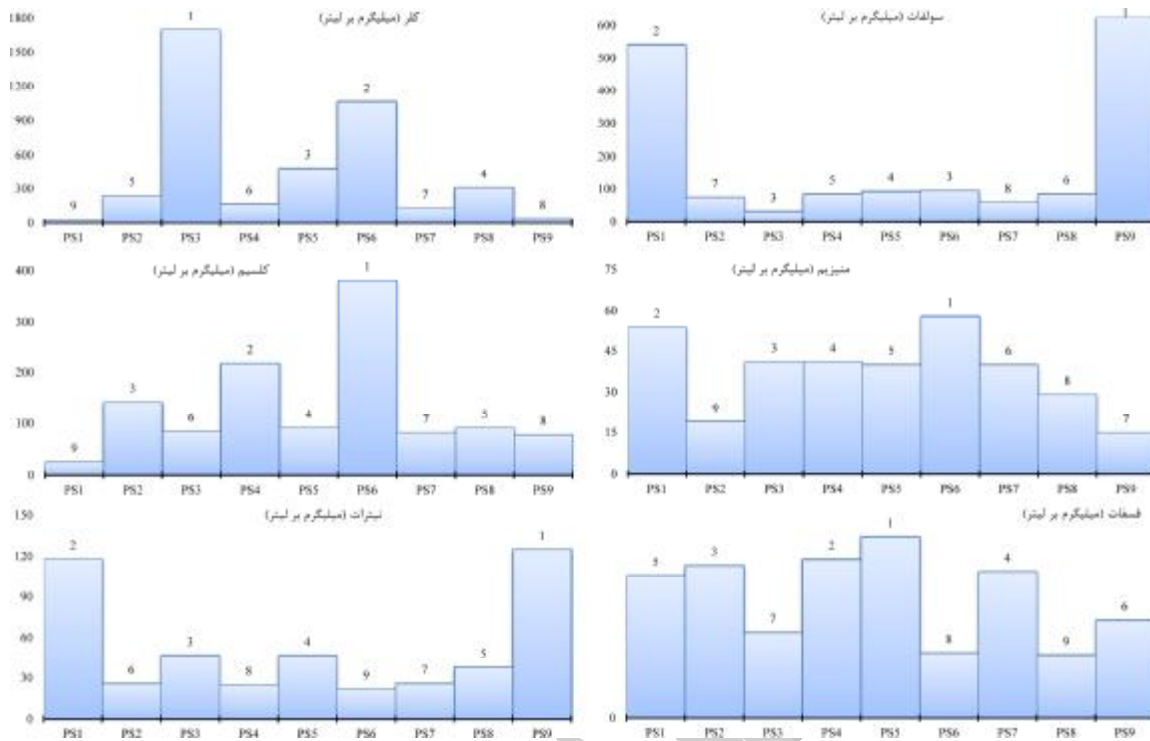
آلودگی این منابع آلاینده در جدول ۲ و شکل ۳ آمده است.

پرورش ماهی: حجم فاضلاب تولیدی در حوضچه ماهی قزل‌آلا حدود ۳۱۰ متر مکعب در روز است.

شرکت پارسیلون: پارسیلون با ۱۴۵۰ نیروی کار سالانه ۱۳۵۰۰ تُن نخ نایلون تولید می‌کند. یک شهرک مسکونی نیز در مجاورت شرکت پارسیلون ایجاد شده است که در حال حاضر ۵۰۰ نفر جمعیت دارد. میزان فاضلاب صنعتی تولیدی در این کارخانه ۶۵۰ متر مکعب در روز است که با فاضلاب انسانی کارخانه و همچنین فاضلاب انسانی یک شهرک مسکونی با سیستم لجن فعال تصفیه می‌شود. میزان فاضلاب انسانی ۱۲۵ متر مکعب در روز است. در مجموع ظرفیت سیستم تصفیه فاضلاب ۷۷۵ متر مکعب در روز است و به‌طور متوسط ۳۲ متر مکعب در ساعت فاضلاب وارد سیستم می‌شود.

کارخانه آرد: با توجه به توسعه خرم‌آباد، کارخانه آرد در داخل شهر قرار دارد. حجم فاضلاب تولیدی کارخانه ۲۰۰ متر مکعب در روز فاضلاب صنعتی و انسانی است. فاضلاب به‌طور مستقیم در رودخانه خرم‌آباد تخلیه می‌شود.

کارخانه شیر: این کارخانه در ۱۰ کیلومتری جاده خوزستان قرار دارد و روزانه ۷۵ تُن انواع لبنیات تولید می‌کند. کارخانه شیر لرستان روزانه ۲۵۰ متر مکعب پساب صنعتی تولید می‌کند که وارد سیستم تالاب هوازی و بی‌هوازی می‌شود. با توجه به ماهیت فاضلاب واحدهای فعال در تولید محصولات لبنی و آلاینده‌گی بسیار بالای آنها، این فاضلاب‌ها در صورت عدم تصفیه مناسب، یکی از منابع مهم آلاینده آب و خاک خواهند بود. نتایج آنالیز



شکل ۳- پارامترهای شیمیایی اندازه‌گیری شده در منابع آلاینده

بنابراین میزان سرانه مواد معلق روزانه ۵۲ گرم برای هر نفر برآورد می‌شود.

کیفیت آب رودخانه

کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات کمی و کیفی رودخانه خرم‌آباد مورد ارزیابی قرار گرفت. محدوده مورد مطالعه بخشی از این رودخانه به طول حدود ۴۵ کیلومتر است که از شهر خرم‌آباد می‌گذرد. منابع آلاینده در منطقه مورد مطالعه شامل ۹ منبع تخلیه آلاینده است که فاضلاب را به رودخانه تخلیه می‌کند. منطقه فقط مطالعه به‌گونه‌ای تقسیم‌بندی شد که در هر منطقه فقط یک منبع تخلیه وجود داشت. پارامترهای کمی و کیفی رودخانه و منابع آلاینده در جدول ۳ خلاصه شده است. سرعت و دبی رودخانه در ایستگاه‌های مختلف تقریباً یکسان است؛ علاوه‌براین، غلظت BOD در رودخانه به‌طور قابل توجهی با منابع آلاینده متفاوت است. بیشترین حجم آلاینده مربوط به PS2 و بیشترین غلظت آلاینده مربوط به PS1 و PS9 است.

شاخص آلاینده‌ی BOD

یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی فاضلاب، وجود مواد آلی در آن است. از آنجایی که این مواد ناپایدار هستند، با جذب اکسیژن و اکسیداسیون به مواد معدنی پایدار تبدیل می‌شوند. برای تعیین میزان دقیق آلودگی فاضلاب شهری، داشتن شبکه جمع‌آوری فاضلاب ضروری است. این امر در شهر خرم‌آباد به دلیل نبود شبکه جمع‌آوری فاضلاب امکان‌پذیر نیست. بار آلی و سایر خصوصیات فاضلاب شهری گاهی حتی برای شهرهای مختلف یک کشور نمی‌تواند یکسان باشد و به نوع تغذیه، شرایط بهداشتی و فرهنگی، آداب و رسوم و عوامل دیگر بستگی دارد. براساس مطالعات انجام‌شده توسط مهندسین مشاور برای طراحی و تحقیقات آب و فاضلاب، میزان سرانه BOD حدود ۴۵ گرم در روز برای هر نفر برآورد شده است. بسته به جمعیت، مقدار متوسط BOD و وزن آن را می‌توان به‌دست آورد. میزان سرانه جامدات معلق در فاضلاب شهری خرم‌آباد حدود ۱/۱۵ برابر BOD برآورد شده است؛

جدول ۳- کمیت و کیفیت رودخانه خرم‌آباد در مرداد ماه سال ۱۳۹۹

منبع شماره	رودخانه				تخلیه کننده		
	اکسیژن محلول میلی گرم بر لیتر	BOD میلی گرم بر لیتر	سرعت متر بر ثانیه	دبی جریان مترمکعب بر ثانیه	دبی تخلیه مترمکعب بر روز	BOD میلی گرم بر لیتر	دما درجه سانتی گراد
PS1	۵/۲	۶/۴	۲/۷	۴	۴۵	۴۸۰۰۰	۵۱
PS2	۳/۸	۹/۸	۲/۶	۳/۹	۷۷۵	۱۲۹	۲۱
PS3	۴/۲	۹/۵	۲/۶	۳/۸	۲۰۰	۱۹۵	۱۹
PS4	۴	۹/۹	۲/۵	۳/۸۵	۱/۵	۱۶۵	۱۹
PS5	۳/۵	۹/۳	۲/۱	۳/۶	۳۶	۳۶۲	۲۱
PS6	۴/۵	۷/۸	۲/۲	۳/۶۵	۲۵۰	۸۹	۲۰
PS7	۴/۷	۹/۹	۲/۳	۳/۷	۳۷	۸۹	۲۰
PS8	۵	۷	۲/۷	۳/۹۵	۱۱۰	۹۵	۱۷
PS9	۴/۸	۱۱/۹	۲/۴۶	۳/۷۵	۱۵۰	۴۲۰۰۰	۵۱

مدل شبیه‌سازی

برای پیش‌بینی رفتار سیستم، از مدل شبیه‌سازی استفاده شد که به چهار مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول اطلاعات لازم برای ورود به مدل کالیبراسیون جمع‌آوری و خلاصه شد. در مرحله بعد معادلات حاکم بر سیستم توسط برنامه‌نویسی متلب فرموله شد. مدل براساس اطلاعات جمع‌آوری شده کالیبره و تأیید شد. در نهایت می‌توان از آن برای شبیه‌سازی اثرات طرح‌های مختلف بر استراتژی‌های تخصیص آب استفاده کرد. ادغام مدل‌های شبیه‌سازی به‌طور گسترده‌ای برای مدیریت کیفیت رودخانه‌ها استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا رودخانه به چند بازه تقسیم شد که می‌توان آن‌ها را به دوره‌هایی که تغییر ناگهانی در سرعت جریان یا کیفیت رودخانه وجود دارد تقسیم کرد (شکل ۴). براساس این طبقه‌بندی، پارامترهای موردنظر در معادلات حاکم در هر بازه محاسبه شده و معمولاً در طول آن ثابت در نظر گرفته می‌شوند. سپس معادلات بهینه‌سازی ریاضی برای دستیابی به اهداف بهینه شامل به حداقل رساندن هزینه‌های تصفیه به همراه محدودیت‌های موجود برای متغیرهای کیفیت ارائه و با الگوریتم ژنتیک حل شد و مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری به دست آمد.

مدل شبیه‌سازی با تأکید بر میزان اکسیژن محلول (DO) و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD) توسعه یافته است. معادله زیر تعادل جریان در رودخانه را نشان می‌دهد.

$$Q_i = Q_{i-1} + q_i \quad (1)$$

که، $i =$ عدد فاصله رودخانه؛ $Q_i =$ دبی رودخانه در i ؛ و $q_i =$ تخلیه شعبه فرعی است. معادله (۲) معادله تعادل BOD است.

$$L_i \times Q_i = Q_{i-1} \times N_{i-1} + q_i \times F_i \quad (2)$$

که، $L_i =$ غلظت در ابتدای i ؛ $N_i =$ تمرکز در انتهای محدوده؛ و $F_i =$ غلظت BOD در زیرشاخه در ابتدای i است. همچنین معادله تعادل اکسیژن محلول توسط معادله ذیل به دست می‌آید:

$$C_i \times Q_i = Q_{i-1} \times M_{i-1} + q_i \times G_i \quad (3)$$

که در آن C و M کمبود اکسیژن در ابتدای i و M مقدار کمبود اکسیژن در انتهای i است. تغییرات در میزان کمبود اکسیژن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$M_j = \frac{k_c \cdot L_c}{k_r - k_c} (e^{-k_c t} - e^{-k_r t}) + D_j e^{-k_r t} \quad (4)$$

که در آن $k_c =$ ضریب تخریب BOD؛ و $k_2 =$ ضریب هوادهی است. برای تخمین زمان شرایط بحرانی کیفیت آب (t_c) بر حسب غلظت اکسیژن محلول، معادله (۵) فرموله شد:

$$t_c = \frac{1}{k_r - k_c} \ln \left[\frac{k_r}{k_c} \left(1 - D_j \times \frac{k_r - k_c}{k_c \cdot L_j} \right) \right] \quad (5)$$

علاوه بر این، معادله کمبود اکسیژن بحرانی، معادله حذف BOD و معادلات راندمان تصفیه آب در معادلات ذیل خلاصه شده است.

$$D_c = \frac{k_c}{k_r} L_c \cdot e^{-k_c t} \quad (6)$$

$$N_j = M_j \cdot e^{-k_c t} \quad (7)$$

$$\bar{T}_i = E_i - \sum_{k=1}^{i-1} t_{ki} \bar{T}_k \quad (9)$$

در آن t_{kj} = ضریب تخریب آلاینده از k به j است. معادله (۱۰) در شرایط بحرانی استفاده شد.

$$\bar{T}_{i-1} = \frac{E_i}{t_{(i-1)i}} - \sum_{k=1}^{i-2} t_{ki} \bar{T}_k \quad (10)$$

تابع هدف در مدل بهینه‌سازی هزینه مورد نیاز برای کاهش بار آلودگی در سیستم را به حداقل می‌رساند. جزئیات روابط بهینه‌سازی به شرح زیر است:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i (e_i - e_i) \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

که محدود می‌شود به:

$$e_i - \sum_{k=1}^{j-1} t_{ki} \bar{T}_{ki} + \sum_{k>i} \bar{T}_{ik} \leq \bar{T}_i \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$\bar{T}_{ik}, \bar{T}_{ki} \geq 0 \quad \forall i, k$$

$$e_i \in [0, e_i] \quad \forall$$

جایی که c_i = هزینه کاهش آلودگی برای منبع i ؛ و $e_j =$ تخلیه آلاینده منبع i است. پس از تجارت عبارت اول سمت راست در این رابطه میزان بار آلودگی خریداری شده توسط واحد را براساس نسبت‌های تجاری بیان می‌کند. \bar{T}_{ki} = مقدار بار آلودگی است که منبع i از منبع k خریداری می‌کند. جمله دوم سمت راست در معادله (۱۲) مقدار بار آلودگی است که منبع i به منابع دیگر می‌فروشد. لازم به ذکر است که منابع بالادستی به دلیل جهت جریان نمی‌توانند آلودگی را از منابع پایین‌دستی دریافت کنند.

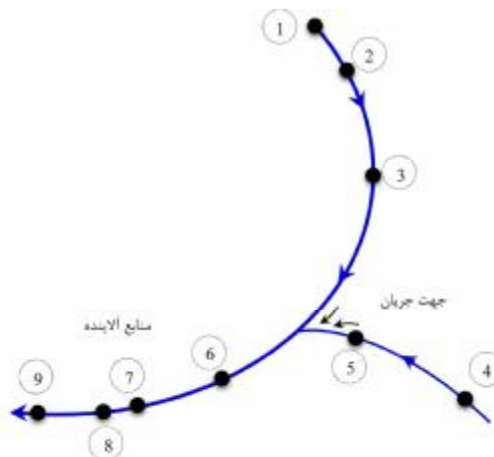
برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی، از چهار پارامتر ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (معادله (۱۳))، میانگین خطای مطلق (MAE) (معادله (۱۴))، درصد بياس (معادله (۱۵))، و ضریب نش-سایتکلیف (معادله (۱۶)) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (o_m - o_s)_i^2 / n} \quad (13)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n |o_m - o_s|_i / n \quad (14)$$

$$E_i = 1 - F_i / R_i \quad (8)$$

که D_c = مقدار کمبود اکسیژن محلول بحرانی؛ E_i = کارایی تصفیه موردنیاز در زیرشاخه در ابتدای بازه i ؛ و $R_i =$ غلظت BOD فاضلاب در شاخه فرعی در ابتدای بازه i است.



شکل ۴- شماتیک منابع آلاینده در مناطق رودخانه خرم‌آباد

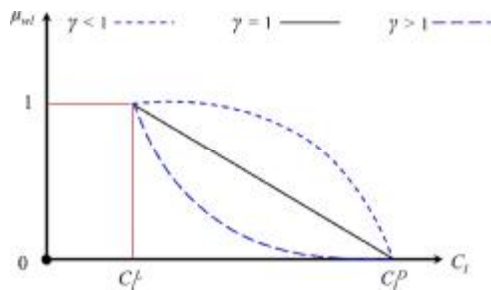
سیستم نسبت تجارت

یکی از روش‌های مؤثر در زمینه مدیریت کیفیت رودخانه که با رویکرد اقتصادی به آن پرداخته می‌شود، مجوز تخلیه قابل‌تجارت است. در این مطالعه، سیستم نسبت تجارت (TRS) پیشنهاد شده توسط هانگ و شاو (۲۰۰۵) برای تخلیه بار مجاز آلودگی استفاده شد. این سیستم مقادیر TRS را با در نظر گرفتن میزان خودپالایی رودخانه و الگوی توزیع آلاینده‌ها تعیین می‌کند تا مدل بهینه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه دهد. این سیستم دارای سه ویژگی اصلی است که عبارت‌اند از: ۱- ظرفیت پذیرش بار آلودگی هر منطقه که با در نظر گرفتن بار انتقال از مناطق بالادست محاسبه می‌شود. ۲- ضرایب تجارت بین مناطق که با توجه به ضرایب انتقال تعیین می‌شود. ۳- سیستم نسبت تجارت‌هزینه کل سیستم را به حداقل می‌رساند. در سیستم نسبت معاملات، لازم است رودخانه به چند بخش از بالادست به پایین‌دست تقسیم شود. مراحل زیر در چارچوب نسبت معاملات در نظر گرفته شد. دبی مجاز برای هر بازه (\bar{T}_i) براساس استاندارد کیفیت آب و مشخصات جریان تعیین شد.

حداقل و حداکثر غلظت به دست آمده از شبیه سازی NSGAI. تابع عضویت فازی به صورت زیر بیان می شود:

$$\mu_{W_i}(c_i) = \left[\frac{\frac{D}{c_i} - c_i}{\frac{D}{c_i} - \frac{L}{c_i}} \right]^{\gamma_1} \quad (18)$$

که، μ_{W_i} تابع عضویت فازی است. γ_1 یک عدد مثبت غیر صفر است که شکل تابع عضویت را در نقطه ۱ نشان می دهد و مقدار آن می تواند توسط تصمیم گیرندگان بر اساس درک آن ها از کیفیت آب با توجه به مقدار معین انتخاب شود (شکل ۵).



شکل ۵- تابع عضویت برای مجموعه فازی

الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب

نقاط حدی دامنه امکان پذیر پاسخ های فازی هستند که توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGAI) برآورد شده اند. NSGAI یک تکنیک بهینه سازی چندهدفه است که بر اساس تئوری غلبگی و الگوریتم ژنتیک توسط دب و همکاران (۲۰۰۲) توسعه یافته است؛ بنابراین روشی جذاب است که تاکنون کاربرد محدودی در مسائل تخصیص بار آلودگی داشته است. الگوریتم های ژنتیک به ویژه برای حل مسائل بهینه سازی چندهدفه مناسب هستند و می توانند به راحتی منحنی تبادل بین اهداف مختلف را با یک اجرا و با زمان محاسبات قابل قبول محاسبه کنند.

الگوریتم های ژنتیک-تکنیکی برای جست و جوی راه حل های بهینه- اولین بار توسط هالند (۱۹۷۵) ارائه شد. منطق پشت الگوریتم ژنتیک ساده است. ابتدا یک مجموعه اولیه از راه حل های مسئله ایجاد می شود. در مرحله بعد چندین راه حل برتر انتخاب شده و با ترکیب آن ها با استفاده از عملگرهای خاصی به نام جهش و تقاطع، مجموعه جدیدی از راه حل ها ایجاد می شود. فرایند انتخاب معمولاً یک فرایند تصادفی است که شانس بیشتری برای انتخاب راه حل های بهتر می دهد. هنگامی که تولید یک

$$PBIAS = \sum_{i=1}^n 100 \cdot (o_m - o_s)_i / \sum_{i=1}^n (o_m)_i \quad (15)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_m - o_s)_i}{\sum_{i=1}^n (o_m - \sum_{i=1}^n (o_m)/n)_i} \quad (16)$$

در آن O_m و O_s مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده کیفیت آب هستند، n تعداد منابع آلاینده و A شماره ایستگاه رودخانه است.

تحلیل عدم قطعیت

مدل های شبیه سازی قطعی سیستم های منابع آب، عدم قطعیت ها در پارامترها و متغیرهای هیدرولوژیکی را در نظر نمی گیرند. این مدل ها برای تصمیم گیری های اولیه و مقایسه های کلی بین گزینه های مختلف مورد استفاده قرار می گیرند و برای تصمیم گیری های دقیق تر باید از مدل های غیر قطعی استفاده کرد. مدل های شبیه سازی نامشخص، در نظر گرفتن ویژگی های احتمالی برخی از متغیرهای سیستم (مانند دبی رودخانه و بارهای آلودگی) را ممکن می سازد. یکی از روش های دقیق شبیه سازی نامشخص سیستم های منابع آب، بهینه سازی چندهدفه است. در این روش، مقادیر اولیه به صورت تصادفی برای هر متغیر تولید می شود. بر اساس نظریه غلبگی و الگوریتم ژنتیک ایجاد می شود. خروجی مدل پیشنهادی دو نقطه بهینه است که با بهینه سازی و کمینه سازی تابع هدف به دست می آید.

مدل فازی تخصیص بار آلودگی یک جزء مهم در مدیریت کیفیت بهینه سیستم های رودخانه ای است. این مدل ها از مفاهیم پایه نظریه تصمیم گیری فازی (بلمن و زاده، ۱۹۷۰)، برنامه ریزی ریاضی فازی (زیمرن، ۱۹۷۸)، (۲۰۰۱) و تخصیص منابع فازی (کیندلر، ۱۹۹۲) و غیره استفاده می کنند. در این مقاله، خطر نقض استانداردهای کیفیت آب با استفاده از تئوری مجموعه فازی محاسبه شده است. سطوح غلظت مربوط به کیفیت پایین آب به عنوان مجموعه فازی تعریف می شود. به هر سطح غلظت در مجموعه فازی یک مقدار عضویت در محدوده $[0, 1]$ اختصاص داده می شود. از نظر ریاضی، مجموعه به صورت زیر تعریف می شود:

$$miW_{il} = c_{il} \quad 0 \leq \mu_{W_d}(c_{il}) \leq 1 \quad (17)$$

مقدار عضویت $\mu_{W_d}(c_{il})$ نشان داد که سطح غلظت با مفهوم کیفیت پایین آب مطابقت دارد. اینجا، c_{il} غلظت متغیر در ایستگاه A است.

توابع هزینه دارای پیچیدگی‌هایی است، در این تحقیق با استفاده از رگرسیون فازی عدم قطعیت‌ها در برآورد توابع هزینه مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله با توجه به غیرخطی بودن توابع هزینه آلاینده‌ها، توابع هزینه با استفاده از رگرسیون خطی کلاسیک، برای هر سری از متغیرهای ورودی، تنها یک مقدار مشخص برای متغیر خروجی محاسبه می‌شود، در حالی که رگرسیون فازی محدوده مقادیر ممکن را برای متغیر خروجی تخمین می‌زند. این مقادیر توسط یک توزیع ممکن که توسط تابع عضویت نشان داده می‌شود، تعیین می‌شوند؛ بنابراین، برخلاف رگرسیون‌های معمولی که تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده را به خطای مدل نسبت می‌دهند، در رگرسیون فازی این تفاوت به درجه فازی بودن مربوط می‌شود. رگرسیون فازی غیرخطی اولین بار توسط جیو و تاناکا (۲۰۰۶) معرفی شد.

پاسخ‌های فازی هزینه تصفیه

سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد برای تصفیه فاضلاب در هر منبع آلاینده تعریف و پاسخ‌های فازی مدل توسعه یافته برای حداقل و حداکثر هزینه مقایسه شد. جدول ۴ محدوده تغییرات فازی هزینه را براساس معیارهای ذکر شده مقایسه می‌کند. کارخانه الکل و شرکت پارسیلون به ترتیب بیشترین تغییرات را دارند. نتایج نشان داد که تحلیل فازی قادر به تخمین ریسک بالقوه برای ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها است. ریسک اقتصادی به دست آمده از شبیه‌سازی فازی ۳۰/۲ درصد است.

تخمین ضریب سیستم جیره‌بندی تجارت فازی

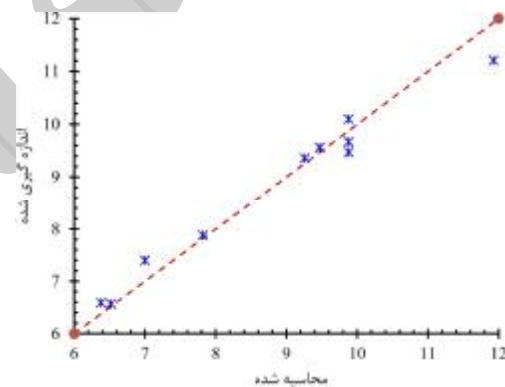
ضرایب نسبت مبادله فازی (\tilde{t}_{ij}) برای هر بازه E_i و اعداد فازی اولیه \bar{T}_i با استفاده از مدل کالیبره شده محاسبه شده است و به ترتیب در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است؛ علاوه بر این، مقادیر اعداد مثلثی فازی a_i به دست آمده از رگرسیون فازی در جدول ۷ آورده شده است.

پس از به دست آوردن مدل تجارت بهینه توسط TRS، هزینه تصفیه فاضلاب قبل و بعد از معامله با هم مقایسه شد (جدول ۸). نتایج نشان داد که استفاده از مدل نسبت تجارت مبتنی بر ریسک می‌تواند هزینه تصفیه آب را تا بیش از ۱۱ درصد کاهش دهد.

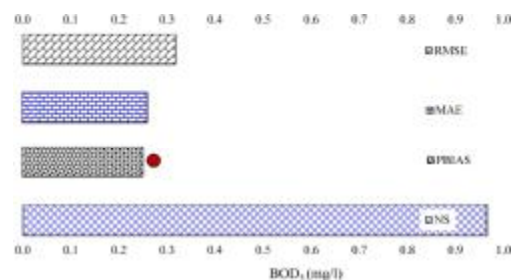
جمعیت جدید کروموزوم کامل شد، این مجموعه جایگزین جمعیت موجود می‌شود. این روند تا زمانی تکرار می‌شود که بهبود قابل توجهی در بهترین کروموزوم مجموعه مشاهده نشود.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی رودخانه کالیبراسیون ضریب زوال BOD و ضریب هوادهی رودخانه در طول رودخانه و به منظور به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر پیش‌بینی شده این پارامتر انجام شد. نتایج گرافیکی کالیبراسیون نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده برای رودخانه قابل قبول است؛ علاوه بر این، از ضرایب خطای زیر برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود که نتایج آن در شکل ۶ خلاصه شده است. همچنین مقایسه معیارهای خطا در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمودار پراکندگی فرآیند کالیبراسیون



شکل ۷- شاخص‌های ارزیابی به دست آمده برای فرآیند کالیبراسیون

تجزیه و تحلیل هزینه‌های تصفیه فاضلاب

یکی از پارامترهای مؤثر در مدل‌های تخصیص بار آلودگی، هزینه‌های تصفیه بار آلودگی است. با توجه به عدم دقت در محاسبه توابع هزینه آلاینده‌ها و با توجه به اینکه برآورد

جدول ۴- حداقل و حداکثر هزینه مربوط به درصدهای مختلف تصفیه

	۹۰ درصد		۶۰ درصد		۳۰ درصد	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
PS1	۹/۵	۶/۳	۵/۲	۳/۵	۳/۹	۱/۳
PS2	۱۶/۶	۱۱	۱۱/۲	۷/۵	۴/۴	۳
PS3	۳/۱	۲	۱/۲	۱/۵	۰/۸	۰/۶
PS4	۵/۶	۳/۷	۳/۵	۲/۳	۱/۴	۰/۹
PS5	۳/۵	۲/۳	۲/۳	۱/۵	۰/۸	۰/۶
PS6	۱۲/۷	۸/۴	۸/۷	۵/۸	۳/۶	۲/۴
PS7	۱۰/۷	۷/۱	۷/۷	۵/۲	۳/۳	۲/۲
PS8	۶/۷	۴/۵	۴	۲/۷	۳/۴	۲/۳
PS9	۲۵	۱۶/۶	۱۷/۳	۱۱/۵	۷/۸	۵/۲

جدول ۵- ضرایب نسبت مبادله فازی (\bar{t}_{ij}) برای فواصل مختلف

شماره بازه	شماره بازه								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۱۷	۰/۰۴۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۸
۲	.	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۷
۳	.	.	۰/۰۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹
۴	.	.	.	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۳
۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۶
۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۷
۷	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۴
۸	۰/۰۲	۰/۰۸
۹	۰/۰۴

جدول ۶- راندمان تصفیه و تخلیه مجاز برای منابع مختلف آلاینده

فاصله شماره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
E_i	۲/۴۶	۲/۳۰	۲/۳۸	۲/۱۰	۱/۱۰	۲/۷۶	۲/۸۷	۳/۱۰	۳/۵۴
\bar{T}_i	۱۹/۳	۵۳	۸/۵	۱۲/۷	۱۶/۴۶	۶/۸	۱۱/۴	۹/۷	.

جدول ۷- ضریب فازی عضویت مثلثی برای تابع هزینه

ضریب تابع هزینه	شماره تخلیه کننده									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
α	۲/۰۲	۲/۲۵	۱۰/۷	۳/۶۴	۸/۳۶	۷/۰۲	۱۶/۴	۴/۴۲	۱۶/۹	۱۵/۸
c	۱/۴۱	۱/۵۷	۷/۴۶	۲/۵۴	۵/۶۴	۴/۶۴	۱۱/۵	۲/۹۸	۱۱/۴	۹/۷۵

جدول ۸- مقایسه هزینه های تصفیه فاضلاب

	هزینه کل (میلیون ریال)	کاهش هزینه (درصد)
قبل از تجارت	۱۰۵۷	.
تجارت مبتنی بر ریسک	۹۳۹	۱۱/۲

شهرک های صنعتی به دلیل کنترل آلودگی نقش مؤثری در افزایش تبادل نداشته اند. منابع آلاینده نقطه ای می توانند در زمان کوتاه تر و سریع تر بر جریان آلودگی تأثیر بگذارند. قسمت انتهایی رودخانه (منابع آلاینده ۶، ۷، ۸ و ۹)

تبادل BOD

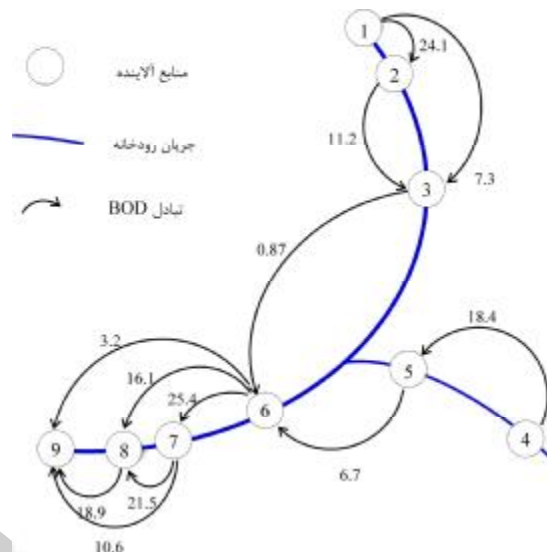
نرخ تبادل BOD بین منابع آلاینده در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مکان، فاصله و سرعت جریان در تبادل BOD به طور معنی داری اهمیت دارند.

گسترده‌تری برای آلاینده‌ها دارد و به‌ویژه قرارگرفتن کارخانه‌الکل در انتهای شبکه باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها در مناطق پایین‌دست روستایی شده است. تحقیق به‌شمار می‌رود که قابلیت بررسی بیشتری دارد.

شرایط پیچیده‌تری برای آلاینده‌ها دارد و به‌ویژه قرارگرفتن کارخانه‌الکل در انتهای شبکه باعث افزایش غلظت آلاینده‌ها در مناطق پایین‌دست روستایی شده است.

منابع

1. Arbabi M. and Elzinga J. 1975. A general linear approach to stream water quality modeling, *Water Resources Research*. 4(2): 191-195.
2. Asgari G. Komijani E. Seid-Mohammadi, A. 2021. Assessment the Quality of Bottled Drinking Water Through Mamdani Fuzzy Water Quality Index. *Water Resour Manage*. 35: 5431-5452.
3. Bellman R. and Zadeh L. A. 1970. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Scie*. 17: 141-164.
4. Deb K. Pratap A. Agarwal S. and Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*. 6: 181-197.
5. Feizi Ashtiani E. Niksokhan M. H. and Ardestani M. 2015. Multi-objective Waste Load Allocation in River System by MOPSO Algorithm. *International journal of Environmental Research*. 9(1): 69-76.
6. Guo X Shi M. Ni N. Zhang X. Yuan W. and Wang N. 2022. China pollutant discharge permits as a link between total emission control and water quality: a pilot study of the pesticide industry. *Water Policy* 1 January. 24(1): 19-30.
7. Guo P. and Tanaka H. 2006. Dual Models for Possibilistic Regression Analysis. *Computational Statistics & Data Analysis*. 51: 253-266.
8. Holland J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
9. Hung M. F. and Shaw D. 2005. A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits. *J. Environ. Econ. Manage*. 49: 83-102.
10. Karmaker S. and Mujumdar P. P. 2006. Grey Fuzzy Optimization Model for Water Quality Management of a River System. *Advances in Water Resources* 29(7): 1088-1105.
11. Kindler J. 1992. Rationalizing Water Requirements with Aid of Fuzzy Allocation Model. 118: 3(308).



شکل ۸- تبادل BOD بین منابع آلاینده

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش مبتنی بر ریسک فازی برای تخصیص بار آلودگی از منبع آلاینده رودخانه خرم‌آباد توسعه داده شده است. پارامتر BOD به‌عنوان شاخص آلودگی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل نسبت تجارت توسعه‌یافته قادر است مقدار بهینه تخلیه فاضلاب را با توجه به شرایط جریان و میزان آلاینده‌ها در قالب یک مدل بهینه‌سازی تعیین کند؛ علاوه‌براین، استفاده از مدل عدم‌قطعیت حداکثر و حداقل، احتمال هر رویداد را براساس دامنه ممکن پیش‌بینی کرد. نتایج این پیش‌بینی می‌تواند حداکثر ریسک موجود برای هر استراتژی را تعیین کند و انتخاب مدل تصمیم را بدهد. ارزیابی اقتصادی تصفیه فاضلاب نشان داد که در مدل پیشنهادی، هزینه‌های تصفیه، حداقل ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. یک پیامد مهم این مطالعه، توسعه یک مدل تصمیم‌گیری است که می‌تواند برای سایر آلاینده‌های شیمیایی نیز استفاده شود. تحقیقات آینده را می‌توان در قالب یک مدل پیش‌بینی احتمالی برای مشارکت رژیم‌های مختلف جریان رودخانه در فرایند تصمیم‌گیری توسعه داد. ارزیابی این مدل نشان می‌دهد که به‌دلیل کمبود اطلاعات و

12. Lalehzari R Tabatabaei SH. And Kholghi M. 2013. Simulation of nitrate transport and wastewater seepage in groundwater flow system. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 10: 1367-1376.
13. Liebman J. C. and Lynn W. R. 1966. The optimal allocation of stream dissolved oxygen, *Water Resour. Res.* 2(3): 581-591.
14. Loucks D. P. Reville C. S. and Lynn W. R. 1967. Linear programming for water pollution control. *Mgmt. Sci.* 14(4): B166-B181.
15. Ma B. Dong F. Peng W.Q. Liu X. B. Ding Y. Huang A. P. and Gao, X. W. 2020. Simulating the water environmental capacity of a seasonal river using a combined watershed-water quality model. *Earth and Space Science*, 7, e2019EA001008.
16. Mujumdar P. P. and Subbarao Vemula V. R. 2004. Fuzzy Waste Load Allocation Model: Simulation-Optimization Approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 18(2): 120-138.
17. Reville C. S. Loucks D. P. and Lynn W. R. 1968. Linear programming applied to water quality management. *Water Resource Research*. 4(1): 1-9.
18. Tang M. Li Z. Hu F. Wu B. and Zhang R. 2021. Market failure, tradable discharge permit, and pollution reduction: Evidence from industrial firms in China, *Ecological Economics*. 189: 107180.
19. Zimmerman B. J. 2001. Theories of self-regulated learning and academic achievement: An overview and analysis. In B. J. Zimmerman & D. H. Schunk (Eds.), *Self-regulated learning and academic achievement: Theoretical perspectives* (pp. 1-37). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
20. Zimmermann H. J. 1978. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *FSS* 1. 45-55.

Research paper

Fuzzy risk-based allocation of pollution load using extended trading-ratio system

A. Monfared¹, H. R. Rabieifar^{2,3*} and H. Ebrahimi^{4,5}

Extended Abstract

A major part of the decision-making framework in the field of water resources management was dedicated to the development of quantitative-qualitative management models of river systems. In addition, control of river water quality with economic approaches is an important part of quality management and environmental issues. Urban, industrial and agricultural wastewaters discharged into rivers with various pollutants are associated with adverse effects on the river ecosystem. These effluents increase the suspended solids in water and drastically reduce the dissolved oxygen in the water, thereby reduce or completely disrupt the possibility of river self-purification. Sustainable water-quality management should be able to measure pollutants, predict the effects of pollutants on water quality, and determine the quality of water. Since the pollution and environmental problems of rivers have escalated in all countries, especially in industrialized and developed countries, a major part of the studies in the field of water resources management has been devoted to the development of quantitative and qualitative management models for river systems. Accordingly, in this research, the management of the river system with the approach of pollution permit clearance was studied. Moreover considering the necessity of planning for the future, Iran is currently facing an environmental crisis which doubles the importance of planning in the field of environmental protection. Today, most cities in Iran, including Khorramabad, face environmental pollution issues, including surface and underground pollution. The optimization of utilization of water resources with the acceptable pollution capacity, and reduction of pollution treatment costs are among the main objectives in the quality management of water resources. Optimal economic conditions in the quality management of river systems were considered among the pollution sources in the decision model. Therefore, in order to develop the decision framework, each source was assigned a permit to discharge the pollution. Trading theory provides incentives for pollution discharge sources in the sustainable river system and for technological initiatives to reduce wastewater discharge and reduce treatment costs. In this paper, a new structure for real-time pollution load in river quality management was presented so that while maintaining water quality at the desired level, the optimal trade model was determined and important uncertainties were considered.

The city of Khorramabad in Lorestan province, Iran, is located at 48° 21" longitude and 30° 43" latitude with 35 km² area and 1180 m height above sea level. Khorramabad city is considered as a semi-industrial city with 28% of all industries in Lorestan province. Many small and large scale industrial units are located around and near the Khorramabad River and along its route, which directly and indirectly cause it polluted. Some industries discharge their

1- Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran.

3- Dept. of Water Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4- Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran.

5- Department of Water Science and Engineering, Shahr-Ghods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* Corresponding Author: h_rabieifar@azad.ac.ir

Received: 2022/04/10

Accepted: 2022/07/13

wastewater directly into the river without treatment, while others have incomplete treatment. In this paper, combined samples were prepared and analyzed from the pollutant of nine important industries whose wastewater currently enters the river (with or without treatment). Simulation model was used to predict the behavior of the system which was divided into four stages. In the first step, the necessary information was collected and summarized to enter the calibration model. In the next step, the governing equations of the system were formulated by MATLAB software. The model was calibrated and verified based on the collected information. Finally, the effects of different plans on the water allocation strategies were simulated. In this study, the Trading-Ratio System (TRS) was used to trade pollution discharge permits. This system determines the TRS values considering the rate of river self-purification and the pattern of pollutant distribution to present the optimal trade model with the application of genetic algorithm. Through uncertain simulation models, the probabilistic properties of some system variables (such as river discharge and pollution loads) could be considered. Multi-objective optimization is among the accurate methods for uncertain simulation of water resource systems. In this method, initial values are randomly generated for each variable and the system is established based on the non-dominated theory and genetic algorithm. The output of the proposed model is two extreme points that are obtained by maximization and minimization of the objective function.

Results of calibration showed that the simulated BOD values were acceptable. The rate of BOD exchange between pollutant sources showed that location, distance and flow rate were significantly important in this parameter. Industrial towns have not played an effective role in increasing BOD exchange due to pollution control. Point pollutant sources can affect the flow of pollution in a shorter time and more quickly. The developed ratio-trade model is able to determine the optimal amount of wastewater discharge according to the flow conditions and the amount of pollutants in the form of an optimization model. In addition, the application of the maximum and minimum uncertainty model predicted the probability of each event based on the possible domain. The results of this forecast can determine the maximum risk available for each strategy and give the choice to the decision model. The economic evaluation of wastewater treatment showed that in the proposed model, treatment costs could be reduced by at least 11%. An important consequence of this study is the development of a decision model that can be used for other chemical contaminants as well. Future research can be developed in the form of a probabilistic prediction model to involve different river flow regimes in the decision-making process.

Keywords: Biochemical oxygen demand, Pollution source, Surface water quality monitoring, Wastewater depletion.

Citation: Monfared A. Rabieifar H. R. and Ebrahimi H. 2022. Fuzzy risk-based allocation of pollution load using extended trading-ratio system. Iranian Water Research Journal. 46: