Vol 14, No. 1, Spring 2024

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Optimization of waste load allocation in Kor River using trading pollutant discharge permits approach and uncertainty consideration

Hossien Montaseri[1]✉ | Mohsen Alamdari[2] | Mohammad Parvin nia[3] | Reza Khalili[4]

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Water Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: hmontaseri@yu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Water Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: mohsen.alamdari74@gmail.com
3. Department of Civil Engineering, Water Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: mparvinnia@yu.ac.ir
4. Department of Environmental Engineering, Department of Water and Wastewater, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: re_khalili@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 25 September 2023
Received in revised form
8 November 2023
Accepted 21 November 2023
Published online 14 March 2024

Keywords:
Pollution load allocation
Decision-making approaches
Developed ratio-trade system
Uncertainty

ABSTRACT

In this thesis, in order to manage the quality of the river, a structure with the objectives of minimizing the environmental protection costs and providing the river water quality standard according to the implementation aspects of the policies is presented. After identifying the polluting sources in the studied area and grouping them, a number of sewage treatment scenarios were considered for each discharge group, and the cost related to each scenario was calculated.Considering the inherent errors and uncertainties in the estimation of treatment costs and penalty for violating water quality standards, a random method was created by combining decision-making approaches and the Monte Carlo simulation method to identify the best treatment scenarios.The decision-making approaches used to increase the implementation capability of pollution load trading programs and examine the desirability of dischargers include stochastic social choice rules (SSCR), stochastic fallback bargaining (SFB) and stochastic multi-criteria decision-making (SMCDM), each approach includes different methods. Finally, in order to reduce the costs and motivate the dischargers to voluntarily participate in the quality protection of the river, the best option by any approach based on the cost criteria, as the initial permission to discharge the pollution load into the optimization model, the extended trading-ratio system (ETRS).The results of the implementation of the proposed model show that according to the SSCR approach, the costs are reduced by 4/53 Percent and by the SFB approach, the costs are reduced by 1/73 Percent while providing a relative agreement between polluting sources. Also, based on the SMCDM approach, the costs are reduced by 24/5 Percent, but it is less acceptable in terms of polluting sources, because in addition to the optimal distribution of dissatisfaction among the beneficiaries, efforts are made to group the evacuees into one group. Become, that the dynamic state of power existing among groups in real conditions is not considered.

Cite this article: Montaseri, H., Alamdari, M., Parvin nia, M., & Khalili, R. (2024). Optimization of waste load allocation in Kor River using trading pollutant discharge permits approach and uncertainty consideration. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 169-185. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365797.1108

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365797.1108

دوره چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه کر با رویکرد تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی

حسین منتصری[۱]✉ | محسن علمداری[۲] | محمد پروین‌نیا[۳] | رضا خلیلی[۴]

۱ نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران گرایش منابع آب دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: hmontaseri@yu.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران گرایش منابع آب دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: mohsen.alamdari74@gmail.com

۳. گروه مهندسی عمران گرایش منابع آب دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: mparvinnia@yu.ac.ir

۴. گروه مهندسی محیطزیست گرایش آب و فاضلاب دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: re_khalili@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

تخصیص بار آلودگی

رویکردهای تصمیم‌گیری

سیستم نسبت–تجارت توسعه‌یافته

عدم قطعیت

چکیده

در این پژوهش به‌منظور مدیریت کیفی رودخانه کر، روشی باهدف حداقل سازی هزینه‌های حفظ محیط زیست و تأمین استاندارد کیفیت آب رودخانه با توجه به جنبه‌های اجرایی سیاست‌ها ارائه شده است. پس از شناسایی منابع آلاینده در رودخانه کر و گروه‌بندی آن‌ها، برای هر گروه تخلیه‌کننده سناریوهای تصفیه فاضلاب در نظر گرفته شد و هزینه مربوط به هر سناریو محاسبه گردید. با توجه به خطاها و عدم قطعیت‌های ذاتی در برآورد هزینه‌های تصفیه و جریمه نقض استانداردهای کیفیت آب یک روش تصادفی با ترکیب رویکردهای تصمیم‌گیری و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای شناسایی بهترین سناریوهای تصفیه ایجاد شد. رویکردهای تصمیم‌گیری مورداستفاده جهت افزایش قابلیت اجرایی برنامه‌های تجارت بار آلودگی و بررسی مطلوبیت تخلیه‌کنندگان شامل گزینش اجتماعی تصادفی (SSCR)، چانه‌زنی بازگشتی تصادفی (SFB) و تصمیم‌گیری چندمعیاره تصادفی (SMCDM) است که هر رویکرد شامل روش‌های مختلفی است. درنهایت، به‌منظور کاهش هزینه‌ها و ایجاد انگیزه در تخلیه‌کننده‌ها برای مشارکت داوطلبانه در حفاظت کیفی رودخانه، گزینه برتر توسط هر رویکرد براساس معیار هزینه، به‌عنوان مجوز اولیه تخلیه بار آلودگی وارد مدل بهینه‌سازی، سیستم نسبت–تجارت توسعه‌یافته (ETRS) می‌گردد. نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی نشان می‌دهد براساس رویکرد SSCR، هزینه‌ها به میزان ۴/۵۳ درصد و رویکرد SFB، هزینه‌ها به میزان ۱/۷۳ درصد کاهش می‌یابد درحالی‌که توافق نسبی بین منابع آلاینده فراهم می‌کند. هم‌چنین براساس رویکرد SMCDM، هزینه‌ها به میزان ۲۴/۵ درصد کاهش می‌یابد، اما ازنظر منابع آلاینده کم‌تر قابل‌قبول است، زیرا علاوه بر توزیع بهینه نارضایتی در بین ذی‌نفعان، تلاش می‌شود گروه‌های تخلیه‌کننده به یک گروه تبدیل شود که حالت پویای قدرت موجود در بین گروه‌ها در شرایط واقعی در نظر گرفته نمی‌شود.

استناد: منتصری، حسین؛ علمداری، محسن؛ پروین‌نیا، محمد و خلیلی، رضا (۱۴۰۳). بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه کر با رویکرد تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۱)، ۱۶۹–۱۸۵. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365797.1108

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون انسان به آب و پیکره‌های آبی، این عنصر زیستی را روزبه‌روز ارزشمندتر کرده و مالکیت استفاده و بهره‌برداری از آن را پرچالش‌تر نموده است (Ustaoğlu *et al*., 2020). یکی از مهم‌ترین منابع آبی در دسترس رودخانه‌ها است. رودخانه‌ها در پی فعالیت‌های انسانی و با طی مسیر طولانی از میان شهرها، روستاها و مناطق صنعتی و کشاورزی دچار آلوده می‌شوند (Mazlomi Mochani *et al*., 2023). کاهش کیفیت آب به‌عنوان تهدیدی در چرخه هیدرولوژیکی، زندگی ساکنان کره زمین را تهدید می‌کند و هم‌چنین احیای منابع آب نیازمند صرف وقت، هزینه و تلاش فراوان است. امروزه استانداردهای کیفی مختلفی برای مصارف آب تعیین‌شده است (Xu *et al*., 2018). ازآنجایی‌که آلودگی و مشکلات زیست‌محیطی رودخانه‌ها در تمامی کشورها به‌ویژه در کشورهای صنعتی و توسعه‌یافته بیش‌تر بوده است، مدیریت و برنامه‌ریزی جهت بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها و ارائه راه‌کارهای کاهش آلودگی آن‌ها که امروزه از آن با عنوان تخصیص بار آلاینده یاد می‌شود، سهم عمده‌ای از مطالعات انجام‌شده را به خود اختصاص داده است. تخصیص بار آلاینده در یک سیستم رودخانه‌ای را می‌توان یک مدل ریاضی به‌شمار آورد که با حذف درصدهای بهینه‌ای از آلاینده‌های ورودی به رودخانه، سعی می‌کند استانداردهای کیفی آب را رعایت کند (Dash *et al*., 2020; Tian *et al*., 2019). در یک نگاه کلی، در این مدل ریاضی تلاش می‌شود هم مطلوبیت محیط‌زیست یعنی استانداردهای کیفیت آب و هم پایین‌بودن هزینه‌های تصفیه فاضلاب به‌عنوان مطلوبیت تخلیه‌کننده‌ها رعایت شود. از طرفی لازم است سیاست‌های تخصیص با جامع‌نگری کافی و درنظرگرفتن اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجرایی تدوین شوند. یکی از روش‌هایی که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را در نظر می‌گیرد تجارت مجوزهای تخلیه بار آلودگی است. این روش علاوه بر ایجاد انگیزه جهت مشارکت تخلیه‌کننده‌ها در حفاظت کیفی رودخانه‌ها، کاهش هزینه و افزایش میزان مجموع تخلیه را به‌همراه دارد، هم‌چنین در زمینه مدیریت کیفی رودخانه‌ها کاربرد فراوانی دارد (Liu *et al*., 2020). در این روش سازمان محیط‌زیست مجوزی جهت تخلیه بار آلودگی در اختیار تخلیه‌کنندگان قرار می‌دهد که می‌توانند به خریدوفروش آن بپردازند. در مسائل مربوط به تخصیص، مطلوبیت‌های ذی‌نفعان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار و بدیهی است که اهداف طرف‌های درگیر ممکن است در تضاد باشند. به‌گونه‌ای که تخلیه‌کنندگان بار آلودگی خواهان تخلیه بیش‌تر و سازمان محیط‌زیست خواهان حفظ کیفیت رودخانه در سطح مطلوب است. ازاین‌رو لازم است با درنظرگرفتن نظرات ذی‌نفعان، قابلیت اجرایی سیاست‌ها را افزایش داد (Şener *et al*., 2017). در مواردی که ذی‌نفعان دیدگاه‌های متفاوتی دارند با مشکلات تصمیم‌گیری روبه‌رو می‌شویم، جهت بهبود این امر استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری مناسب است، ازجمله این رویکردها ۱- رویکرد گزینش اجتماعی[۱] (SCR) یک روش قدرتمند جهت ایجاد توافق بین تصمیم‌گیران است و مبنای حل اختلاف بر حداکثر آرا تصمیم‌گیران است، ۲- رویکرد چانه‌زنی بازگشتی[۲] (FB) زیرمجموعه نظریه بازی است، هدف دستیابی به گزینه‌ای است که اکثریت یا همه چانه‌زن‌ها بتوانند در مورد آن توافق کنند. این رویکرد سطح مشخصی از مطلوبیت را برای همه چانه‌زن‌ها فراهم می‌کند، ۳- روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[۳] (MCDM) مدت‌هاست که به‌عنوان ابزارهای کارآمد برای تعیین راه‌حل‌های بهینه مشکلات منابع آب در نظر گرفته می‌شوند.

رویکرد تجارت کیفیت آب در هر دو بخش آب‌وهوا، با پیشرفت‌های چشم‌گیری مواجه بوده است، به‌طوری‌که در حوزه آلودگی هوا در اوایل دهه ۹۰ میلادی به‌دنبال تصویب کنگره آمریکا به‌عنوان یک پشتوانه قانونی مناسب برای اعمال این روش در کنترل سریع، مشارکتی و اقتصادی آلودگی هوا در ایالت‌های آمریکا، روش موردنظر در کاهش و کنترل آلودگی شهرهای بزرگ تأثیر به‌سزایی داشته است. در حوزه آب نیز از سال ۱۹۹۶ به بعد به‌دنبال تغییر نگاه در آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا[۴] به موضوع تخصیص بار آلودگی و ارتقای وضعیت کیفی آب‌های آمریکا، به‌تدریج این رویکرد به‌عنوان یک راهبرد جدید مطرح گردیده است (Galderisi *et al*., 2021).

هانگ و شو[۵] (۲۰۰۵) سیستم نسبت–تجارت[۶] را برای تجارت بار آلودگی معرفی نمودند. شورتل و هوران[۷] (۲۰۰۶) در مقاله‌ای با استفاده از سیستم تجارت بار آلودگی در آمریکا اظهار نمودند با طراحی درست این سیستم می‌توان از کیفیت آب‌ها در آمریکا حفاظت نمود و هم‌چنین دلایلی مانند کم‌بودن تعداد منابع تخلیه‌کننده آلودگی خواهان شرکت در تجارت، عدم وجود قوانین و دستورالعمل‌های اجرایی کافی و هزینه بالا معاملات را در عدم موفقیت این سیستم معرفی می‌نماید. مصباح و همکاران (۲۰۰۹) با توسعه سیستم نسبت–تجارت، یک مدل جدید با ترکیب روش عدم قطعیت مونت‌کارلو، روش سیستم نسبت–تجارت توسعه‌یافته و شبکه‌های بیزی[۸]، برای تجارت بار آلودگی در زمان واقعی پیشنهاد دادند. جمشیدی و نیک‌سخن (۲۰۱۵) جهت تخصیص بهینه بار آلودگی مبتنی بر پارامتر BOD در رودخانه سفیدرود، با هدف حداقل‌کردن هزینه‌های کل تصفیه بار آلودگی، از مدل QUAL2Kw جهت شبیه‌سازی کمی و کیفی رودخانه برای تعیین مقدار بار مجاز تخلیه آلودگی روزانه استفاده کردند. ذوالفقاری‌پور و احمدی (۲۰۱۷) به‌منظور تجارت پساب در سیستم‌های رودخانه‌ای از طریق فرایند تصمیم‌گیری غیرقطعی، از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره با همکاری ذی‌نفعان برای تعیین استراتژی تصفیه بهینه و مدل چانه‌زنی بازگشتی، عدم همکاری ذی‌نفعان برای توافق بین تخلیه‌کننده‌های فاضلاب در تجارت پساب، تحت عدم قطعیت استفاده نمودند.

مطالبی[۹] و همکاران (۲۰۱۷) یک برنامه تجارت کیفیت آب در کارولینای شمالی برای رسیدگی به مسائل مربوط به کیفیت آب در حوضه آبخیز دریاچه جردن ارائه دادند.

ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) به‌منظور تجارت پساب و کاربرد آن در مدیریت کیفیت آب، مدل BRISF[۱۰] را جهت تجارت پساب بین منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای برای حوزه آبخیز Xiangxihe در چین موردمطالعه قراردادند. دوک و همکاران[۱۱] (۲۰۲۰) روشی جهت پیش‌بینی مشارکت در یک برنامه تجارت کیفیت آب مبتنی بر عملکرد ارائه دادند. قربانی‌موصلو و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری به‌منظور بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی در سیستم‌های رودخانه‌ای با چندین ذی‌نفع یک روش جدید بااتصال فرا مدل و الگوریتم ژنتیک چندهدفه ارائه دادند. هم‌چنین دریا و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی یک رویکرد جدید تخصیص بار آلودگی برای حوضه رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی–بهینه‌سازی پرداختند (ساداک و همکاران، ۲۰۲۳). بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات زیادی به بررسی وضعیت کیفیت آب رودخانه کر پرداخته‌شده است و شرایط کیفی نامناسب این رودخانه به‌ویژه به حدفاصل زه‌کش کوه سبز و آهوچر عنوان شده است، اما کم‌تر به روش‌های مدیریتی باقابلیت اجرایی در این زمینه پرداخته‌شده است. در این پژوهش به‌منظور مدیریت کیفی رودخانه کر از رویکرد اقتصادی، تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی با درنظرگرفتن قابلیت اجرایی برنامه‌ها به‌کمک رویکردهای تصمیم‌گیری SCR، FB و MCDM استفاده شده است. به‌طورکلی، هدف نهایی این پژوهش، ارائه روشی مناسب جهت بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی با کمک رویکردهای تصمیم‌گیری و روش تجارت مجوزهای تخلیه بار آلودگی در رودخانه کر است. به‌نحوی‌که علاوه بر حفظ کیفیت آب و کاهش هزینه‌های سیستم، قابلیت اجرایی را به‌همراه داشته باشد.

۲. موردمطالعه

۲. ۱. رودخانه کر

رودخانه کر در شمال استان فارس جریان دارد و یکی از منابع حیاتی آب‌های سطحی در استان فارس محسوب می‌شود. این رودخانه با طی مسیر به طول تقریبی ۲۸۰ کیلومتر به دریاچه‌های طشک و بختگان می‌ریزد. رودخانه کر از شمال‌غربی استان فارس و بلندی‌های سلسله جبال زاگرس منشعب و تا جنوب‌شرقی کشیده می‌شود، در این مسیر از

رودخانه‌ها و مسیل‌های فصلی و دائمی متفاوتی نظیر رود دژکرد، رودخانه سفید، رودخانه شور و شیرین، رودخانه تنگ بستانک، رودخانه تنگ شول و رودخانه‌های بزرگی چون مائین و سیوند بهره‌مند شده و در پایین‌دست جریان دائمی از خود عبور می‌دهد (حقیقت اصفهانی و همکاران، ۲۰۲۰). موقعیت کلی محل قرارگیری رودخانه کر در شکل (۱) نشان داده شده است.

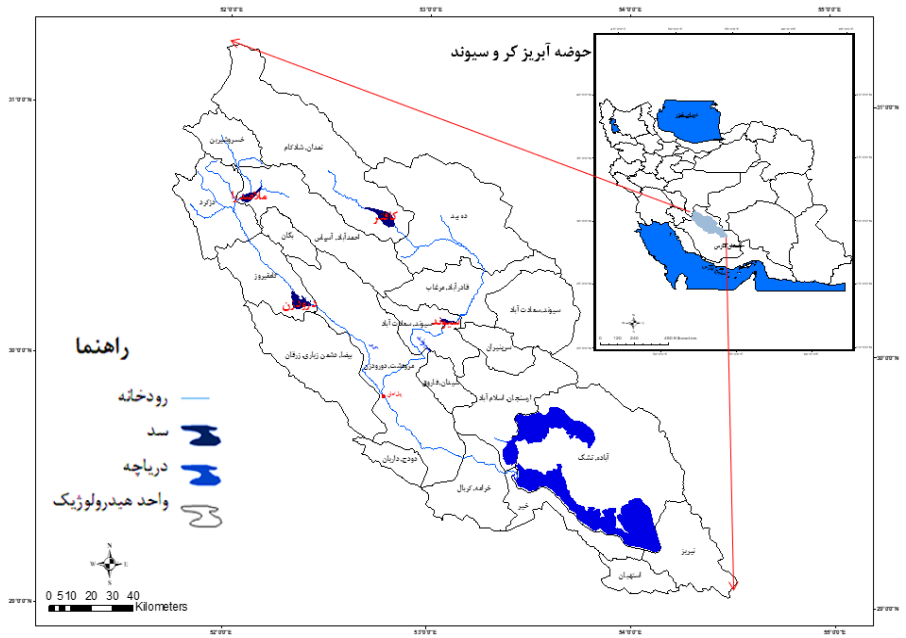

Figure 1. General location of Kor River

۲. ۲. معرفی نوع آلاینده‌های حوزه آبریز کر

رودخانه کر یکی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی، صنعتی و آشامیدنی شهرهای شیراز و مرودشت است. به‌دلیل رونق کشاورزی، تخلیه فاضلاب و استقرار صنایع مختلف در حاشیه رودخانه همواره پذیرنده آلودگی‌ها متنوعی بوده است. طبق پژوهش‌های صورت‌گرفته توسط سازمان محیط‌زیست استان فارس، ورود آلاینده‌های زیست‌محیطی به این رودخانه باعث کاهش قدرت خود پالایی رودخانه شده، به‌طوری‌که در پایین‌دست پل خان در بیش‌تر فصول سال آب رودخانه به لحاظ رنگ، بو و کیفیت به فاضلاب شباهت دارد و به جریان مرده‌ای تبدیل گردیده و هم‌چنین وجود آلاینده‌های پایدار بیش‌ازحد مجاز در رودخانه می‌تواند هشدار جدی برای نابودی حیات طبیعی منطقه باشد.

منابع آلاینده را می‌توان به‌طورکلی به‌دسته‌های زیر طبقه‌بندی کرد:

۲. ۲. ۱. منابع آلاینده صنعتی

از واحدهای مهم و بزرگ صنعتی که در آلودگی رودخانه کر نقش دارند می‌توان به کارخانه چرمینه، مجتمع پتروشیمی، مجتمع صنعتی یک‌ویک، کارخانه آزمایش، کارخانه آرد و بیسکوییت دادلی، کارخانه قند مرودشت، پالایشگاه نفت شیراز، کارخانه شیر منطقه‌ای فارس، شهرک صنعتی آب باریک، کارخانه شیمیایی سینا، کارخانه شیمیایی فارس و کارخانه ریشمک زرقان اشاره نمود (حقیقت اصفهانی و همکاران، ۲۰۲۰).

۲. ۲. ۲. منابع آلاینده کشاورزی و دامی

عمده‌ترین منابع آلوده‌کننده نقطه‌ای در طول رودخانه کر شامل زه‌کش کوه سبز و زه‌کش آهوچر است. زه‌کش کوه سبز قبل از مجتمع پتروشیمی واقع‌شده و آب‌های برگشتی کشاورزی زمین‌های کشت آبی منطقه وارد این زه‌کش شده و از این طریق به رودخانه کر تخلیه می‌گردد. فاضلاب‌های صنعتی دشت زرقان و نیز بخشی از فاضلاب شهر زرقان، از طریق زه‌کش آهو چر که در پایین‌دست بند امیر واقع‌شده، نیز به رودخانه تخلیه می‌گردد. به‌علاوه آب‌های برگشتی حاصل از بخش کشاورزی در دشت‌های بیضا و آهوچر که دارای مزارع کشت آبی است، از این زه‌کش به رودخانه کر هدایت می‌گردد.

۲. ۲. ۳. منابع آلاینده انسانی و منابع آلاینده طبیعی

عمده‌ترین منبع انسانی آلاینده رودخانه‌های کر و سیوند، فاضلاب شهر مرودشت و روستاهای حومه این شهر می‌باشند. علاوه بر آن فاضلاب شهر زرقان نیز از طریق زه‌کش آهو چر به این رودخانه تخلیه می‌گردد. فاضلاب‌های شهری سعادت شهر، سیدان و سیوند نیز از منابع آلاینده این رودخانه می‌باشند (مردانی و همکاران، ۲۰۲۲). هم‌چنین مناطق پیرامون رودخانه کر تحت تأثیر سیلاب‌های جدی و فرسایش خاک است. در قسمت پایین‌دست سد به‌دلیل هموارشدن زمین، اثرات فرسایشی کاهش می‌یابد. رژیم سیلابی رودخانه کر کاملاً برجسته است، به‌نحوی‌که در بعضی مواقع دبی جریان سیلابی چهل برابر دبی عادی است.

محدوده موردمطالعه پژوهش حاضر، قسمتی از رودخانه کر به طول ۹۷ کیلومتر از پایین‌دست سد درودزن تا بعد از پل خان است که شامل پنج ایستگاه پایش و چهار گروه تخلیه‌کننده از نوع آلاینده نقطه‌ای صنعتی است (جدول ۲) که هر گروه، آلاینده خود را به‌طور جداگانه به یک تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی منتقل می‌کنند (شکل ۳). چهار گروه آلاینده به‌ترتیب شامل ۱- زه‌کش کوه سبز، لاگون یک و دو پتروشیمی، ۲- تخلیه مستقیم و لاگون سه تا ده پتروشیمی، ۳- سیوند و ۴- کانال کارخانه قند می‌باشند.

۲. ۳. شبکه آب‌سنجی

به‌منظور اندازه‌گیری و ثبت مشخصه‌های جریان سطحی سیستم رودخانه‌های واقع در حوزه آبریز کر و سیوند ایستگاه‌های هیدرومتری در این حوزه تأسیس گردیده و مورد بهره‌برداری قرارگرفته است. ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه به سه دسته ایستگاه‌های درجه یک شامل دستگاه‌های لیمینوگراف، پل تلفریک و اشل، درجه‌دو مجهز به پل تلفریک و اشل و درجه سه مجهز به اشل تنها تقسیم می‌شوند. قدیمی‌ترین ایستگاه منطقه ایستگاه احمدآباد است که در سال ۱۳۲۹ دایر شد و اطلاعات آماری رودخانه کر را جمع‌آوری می‌کند. پس‌ازآن می‌توان از ایستگاه‌های دشت بال و ضرغام آباد نام برد که هر دو از سال ۱۳۲۸ تأسیس شده‌اند.

۲. ۴. مدل پیشنهادی پژوهش

مدل پیشنهادی به‌منظور بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه کر با رویکرد تجارت مجوز بار آلودگی و لحاظ عدم قطعیت، در شکل (۳) به تصویر کشیده شده است. این فلوچارت به‌طورکلی به چهار بخش اصلی تقسیم گردیده است:

- بخش اول: جمع‌آوری اطلاعات‌پایه
- بخش دوم: شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه
- بخش سوم: تصمیم‌گیری غیرقطعی
- بخش چهارم: بهینه‌سازی

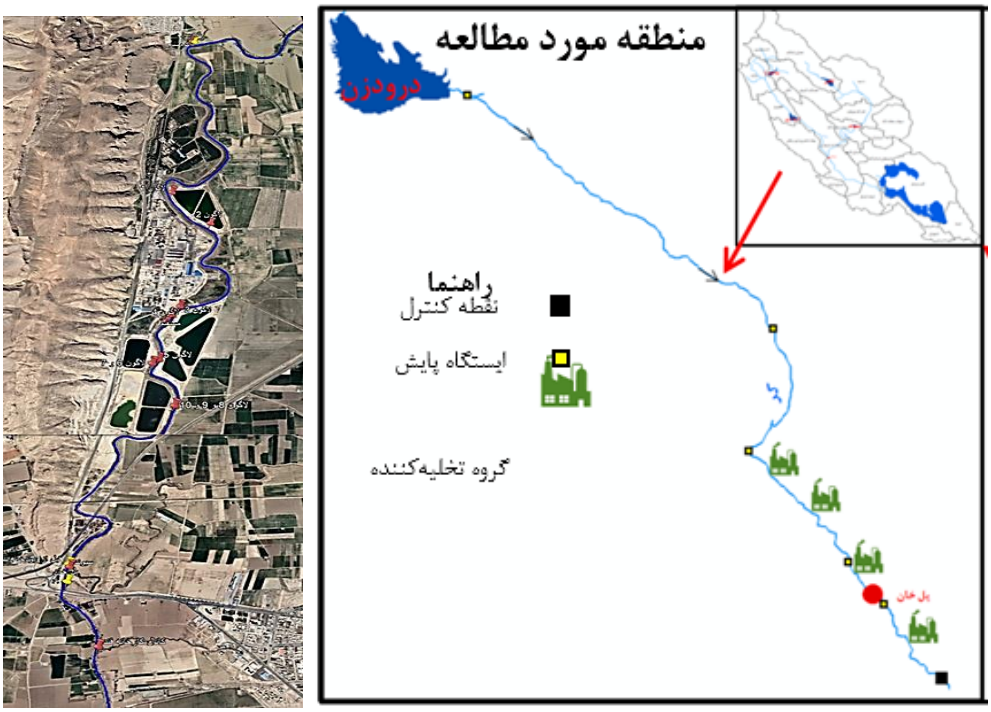

Figure 2. Kor River and sources of pollution

۲. ۴. ۱. جمع‌آوری اطلاعات‌پایه

ابتدا اطلاعات کمی و کیفی رودخانه و منابع آلاینده اثرگذار، مربوط به یک ماه با شرایط بحرانی ازنظر کیفیت آب جمع‌آوری می‌شود و پس از تعیین بازه‌ها و صحت‌سنجی اطلاعات، از این اطلاعات به‌عنوان ورودی مدل شبیه‌سازی استفاده می‌شود. دیگر ورودی‌های مدل شامل داده‌های هندسی، داده‌های هیدرولیک، داده‌های هواشناسی و ضرایب سنتیکی مورداستفاده در معادلات است.

پس از شناسایی و تعیین موقعیت منابع آلاینده‌ها و در صورت لزوم گروه‌بندی آن‌ها، سناریوهای مختلف تصفیه برای هر (گروه) آلاینده مشخص می‌شود. سناریوهای مختلف تصفیه بار آلودگی ممکن با توجه به امکانات موجود، سیستم‌های تصفیه فاضلاب و حدود عملی تصفیه آلاینده‌های مختلف، تعریف و به مدل معرفی شوند. در این پژوهش، بدین منظور چهار سناریو شامل صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد تصفیه فاضلاب در نظر گرفته‌شده است.

در مسائل مربوط به بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی، همواره توابع هزینه مربوط به کنترل انتشار آلودگی یکی از مهم‌ترین توابع مطلوبیت به‌شمار می‌رود. برای تخمین تابع هزینه تصفیه هر یک از تخلیه‌کنندگان از نتایج پژوهش صابری (۱۳۹۳) استفاده می‌شود. ایشان با اخذ اطلاعات از مرکز پژوهش‌های آب و فاضلاب شهری جهت هزینه نهایی ساخت بیش از ۵۰ واحد تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و صنعتی کشور به روش‌های مختلف که عقد قرارداد جهت اجرای آن‌ها بین سال‌های ۱۳۸۸ لغایت ۱۳۹۱ بوده است، برای تخمین این تابع استفاده نموده است. نتایج مرتبط با توابع هزینه تصفیه فاضلاب صنعتی از پژوهش ایشان به‌صورت رابطه (۱) است.

$$Y = 0.5x^3 + 0.73x^2 + 0.09x + 0.02$$ رابطه ۱)

در رابطه فوق، Y نیز هزینه صورت گرفته برای تصفیه یک مترمکعب فاضلاب صنعتی طی یک سال و بر مبنای دلار و هم‌چنین x درصد تصفیه صورت‌گرفته در تصفیه‌خانه است.

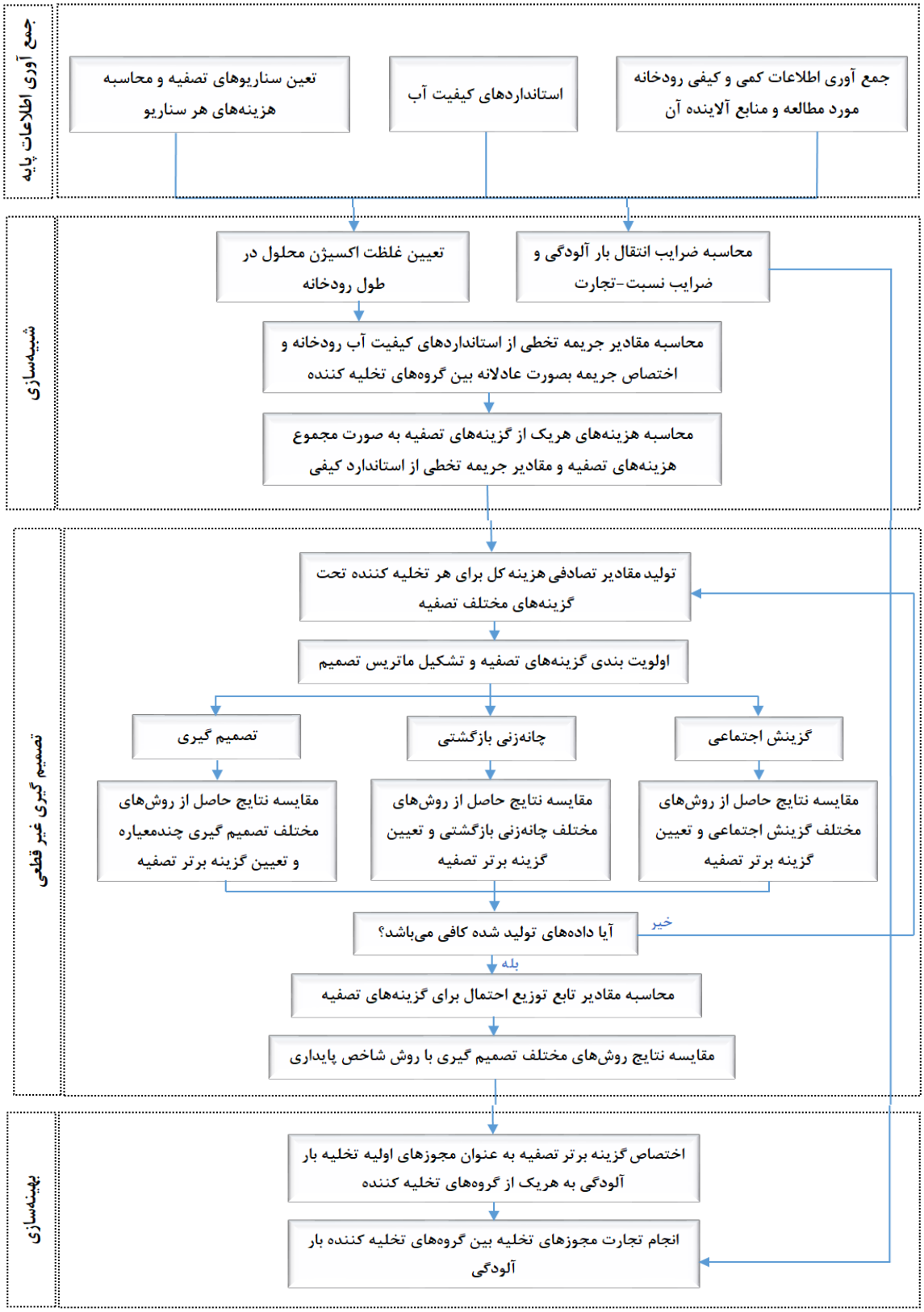

Figure 3. General structure of the proposed model

ازآنجایی‌که منابع محیط‌زیستی محدود بوده و از طرف دیگر گسترش فعالیت‌های تولیدی، موجب کاهش کیفیت منابع آب می‌گردد، لذا ضروری است به‌منظور منطقی‌نمودن استفاده از منابع محیط‌زیستی، سیستم قیمت‌گذاری تعریف‌شده و به‌تناسب آن ابزارهای اقتصادی مرتبط به‌کار گرفته شود. یکی از این راه‌کارها می‌تواند، اعمال جریمه بر تخلیه‌کننده‌هایی باشد که استاندارد تخلیه تعیین‌شده برای آن‌ها را رعایت نمی‌کنند. بدین منظور با توجه به شرایط کمی و کیفی رودخانه، سناریوهای مختلف تصفیه فاضلاب شامل درصدهای مختلف حذف BOD برای هر تخلیه‌کننده در نظر گرفته می‌شود و مدل شبیه‌سازی کیفی به‌ازای این سناریوها اجراشده و مقادیر تخطی از استاندارد کیفی تعیین می‌شود. با توسعه یک مدل رگرسیون خطی بین مقادیر تخطی از استاندارد کیفی و مقادیر هزینه‌های اضافی جهت بهبود کیفیت آب مقادیر جریمه تخطی به‌دست می‌آید. بدین منظور جهت برقراری عدالت تابع جریمه متناسب با درصد تخلیه BOD توسط هر گروه تخلیه‌کننده به‌صورت جداگانه محاسبه شده است و هم‌چنین در تعیین مقدار تخطی از استاندارد، براساس استاندارد کیفیت آب‌های ایران (۱۳۹۵) حداقل میزان DO مجاز در نقطه کنترل ۵ میلی‌گرم در لیتر فرض شده است تا شرایط حداقلی برای آبزی‌پروری و تأمین آب بهداشتی وجود داشته باشد.

۲. ۴. ۲. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه

به‌منظور شبیه‌سازی از مدل QUAL2KW با توجه به قابلیت‌های مهم مدل ازجمله دسترسی آسان و بدون هزینه، سهولت کار با مدل و واسنجی خودکار براساس الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. از این مدل به‌منظور تعیین ضرایب انتقال بار آلودگی، ضرایب نسبت–تجارت و ظرفیت بار آلودگی برای هر منطقه از رودخانه و هم‌چنین جهت شبیه‌سازی، غلظت متغیر کیفی شاخص در نقطه کنترل، براساس جریان رودخانه، تعداد و موقعیت آلاینده‌ها، مقادیر بارهای آلودگی و غیره استفاده می‌شود.

با استفاده از مدل شبیه‌سازی اطلاعات کمی و کیفی جریان بالادست رودخانه و منابع آلاینده ورودی با توجه به سناریوهای مختلف تصفیه، شبیه‌سازی‌شده و غلظت اکسیژن محلول در طول رودخانه تعیین می‌گردد. بر همین اساس میزان تخطی از استاندارد کیفی برای هر سناریو محاسبه می‌گردد سپس هر تخلیه‌کننده گزینه‌های تصفیه را براساس هزینه‌های آن‌ها (مجموع هزینه‌های تصفیه و جریمه تخطی از استاندارد کیفی) در یک سطر به‌ترتیب از چپ به راست اولویت‌بندی می‌کند. به این ترتیب، ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود که تعداد سطرها و ستون‌های این ماتریس به‌ترتیب نشان‌دهنده تعداد تصمیم‌گیران (واحدهای تخلیه‌کننده فاضلاب) و گزینه‌های تصفیه است. پس از واسنجی مدل شبیه‌سازی، محاسبه ضرایب انتقال برای متغیر کیفی انتخابی انجام می‌گیرد. در ادامه با استفاده از رابطه (۲) ضرایب نسبت–تجارت محاسبه می‌گردد.

$$t_{ij} = min\{\frac{r_{ik}}{r_{jk}}\} \qquad i < j \qquad k = \{i+1, \ldots, j\}$$ رابطه ۲)

در این رابطه، t_{ij} نسبت تجارت بین نواحی i و j است. این نسبت نشان می‌دهد که تخلیه‌کننده‌های i و j تا چه میزان می‌توانند به تبادل مجوزهای خود مبادرت کنند، به‌نحوی‌که حداقل غلظت DO در نواحی پایین‌دست از مقدار استاندارد تجاوز ننماید.

۲. ۴. ۳. تصمیم‌گیری غیرقطعی

با توجه به خطاها و عدم قطعیت‌های ذاتی در برآورد هزینه‌های تصفیه و جریمه نقض استانداردهای کیفیت آب، یک روش تصادفی، با ترکیب رویکردهای تصمیم‌گیری و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای شناسایی بهترین سناریوهای تصفیه ایجاد می‌شود در این مطالعه، عدم قطعیت فقط برای شاخص اقتصادی در نظر گرفته شد و از عدم قطعیت سایر

متغیرهای مهم نادیده گرفته شده است. براساس روش پیشنهادی، در برآورد هزینه تصفیه و جریمه تخطی از استاندارد کیفی که به‌ترتیب تحت تأثیر بار آلودگی هر یک از تخلیه‌کننده‌ها و غلظت متغیر کیفیت شاخص قرار می‌گیرند، به‌طور غیرمستقیم و کلی به تأثیر عدم قطعیت سایر پارامترها پرداخته می‌شود. به‌گونه‌ای که با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای هزینه‌های تصفیه نشان می‌دهد که ماهیت تصادفی به‌طور غیرمستقیم برای مقدار بار آلودگی اتخاذ شده است.

در این بخش گزینه‌های مناسب تصفیه براساس رویکردهای تصمیم‌گیری گزینش اجتماعی تصادفی[۱۲] (SSCR)، چانه‌زنی بازگشتی تصادفی[۱۳] (SFB) و تصمیم‌گیری چندمعیاره تصادفی[۱۴] (SMCDM) تعیین می‌شوند. مدل‌سازی غیرقطعی رویکردهای تصمیم‌گیری با کدگذاری در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود و برتری گزینه‌های تصفیه با شاخص اقتصادی اندازه‌گیری می‌شود. بدین منظور، انتخاب‌های تصادفی از بین محدوده عملکرد سناریوهای تصفیه تحت معیار هزینه تعریف و ۱۰۰۰۰ تکرار برای کل فرایند در نظر گرفته می‌شود. پس از هر دور انتخاب تصادفی، هر تخلیه‌کننده سناریوهای تصفیه را اولویت‌بندی می‌کند که یک ماتریس تصمیم‌گیری قطعی به‌دست می‌آید؛ بنابراین، اگر N تعداد انتخاب‌های تصادفی و ni تعداد دفعاتی باشد که یک سناریو تصفیه انتخاب می‌شود، احتمال برنده‌شدن استراتژی i برابر با ni,N خواهد بود.

۲. ۴. ۴. بهینه‌سازی

در این مرحله، بهینه‌سازی توسط روابط سیستم نسبت- تجارت توسعه‌یافته انجام می‌پذیرد. بدین منظور برترین روش حاصل از رویکردهای تصمیم‌گیری SSCR، SFB و SMCDM (براساس معیار هزینه) به‌عنوان مجوز اولیه تخلیه بار آلودگی وارد مدل تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی شده و بین تخلیه‌کننده‌ها مورد تبادل قرار می‌گیرد.

۴. بحث

۴. ۱. شبیه‌سازی کیفی رودخانه کر

در این پژوهش ۹۷ کیلومتر از رودخانه کر مورد شبیه‌سازی قرارگرفته است. بدین منظور بخش عمده‌ای از اطلاعات موردنیاز از اداره کل حفاظت محیط‌زیست و شرکت آب منطقه‌ای استان فارس به‌دست آمده است. اطلاعات به‌دست‌آمده نشان می‌دهد تابستان ۱۳۹۵، رودخانه کر ازلحاظ کیفیت در وضعیت بحرانی قرار داشته است، بنابراین از این اطلاعات برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه استفاده شده است. ارزیابی متغیرهای کیفی اندازه‌گیری‌شده برای این رودخانه بیانگر این است که غلظت BOD و DO بیش‌ازحد استاندارد است، بنابراین این متغیرهای کیفی به‌ترتیب به‌عنوان بار آلودگی و شاخص کنترل کیفیت آب رودخانه در نظر گرفته شده‌اند و به جهت کاهش اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در طول رودخانه از واسنجی خودکار توسط مدل شبیه‌سازی استفاده شده است. سپس به‌منظور ارزیابی خطا با استفاده شاخص درصد مجذور میانگین مربع خطا[۱۵] محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از %RMSE برای پارامترهای کیفی DO و BOD در جدول (۱) نشان داده‌شده است. کانل[۱۶] و همکاران (۲۰۰۷) به‌منظور ارزیابی خطا با شاخص %RMSE، مقدار کم‌تر از ۲۵ درصد را قابل‌قبول گزارش کردند، بنابراین با بررسی شاخص خطا می‌توان عنوان کرد که ضرایب واسنجی مورداستفاده منجر به تخمین نسبتاً مناسبی از تغییرات متغیرهای کیفی می‌شود.

Table 1. %RMSE for two parameters DO and BOD

Parameter	%RMSE
DO	7.53
BOD	18.8

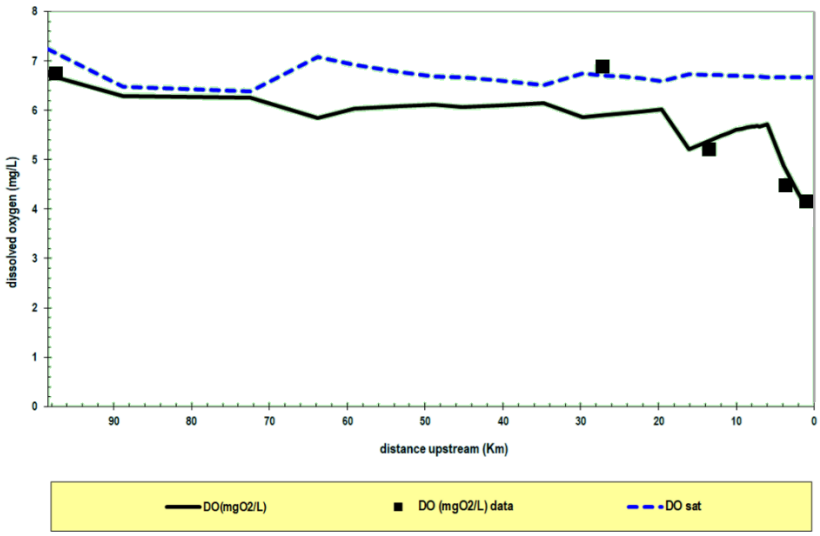

Figure 4. Curve of DO changes in the studied range (mg/l)

مطابق با توضیحات ارائه‌شده، عمده آلودگی در یک‌سوم پایانی مسیر است و با توجه به این‌که منابع آلاینده، بار آلودگی خود را در فواصل تقریباً کوچک به رودخانه تخلیه می‌کنند، رودخانه زمان کافی برای تصفیه خود ندارد و همان‌طورکه در شکل (۴) مشاهده می‌شود، غلظت DO روند کاهشی خود را با شیب نسبتاً تند ادامه می‌دهد.

در محدوده موردمطالعه، به‌دلیل رونق زراعت آبی و شیب عمومی مزارع به سمت رودخانه، زه‌آب‌های کشاورزی تقریباً در تمام‌مسیر وجود دارند که این زه‌آب‌ها به‌دلیل تجمع بالای کودهای شیمیایی غنی از مواد مغذی محلول هستند اما ازنظر BOD به نسبت حجم زه‌آب غلظت پایینی دارند.

با توجه شکل (۵)، مقایسه مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده BOD در امتداد رودخانه نشان می‌دهد که ضرایب استفاده‌شده برای واسنجی تخمین مناسبی از متغیرهای کیفی تولید کرده‌اند و با توجه به اهداف این مطالعه و متغیرهای کیفی استفاده‌شده می‌توان از تأثیر زه‌آب‌های کشاورزی چشم‌پوشی کرد.

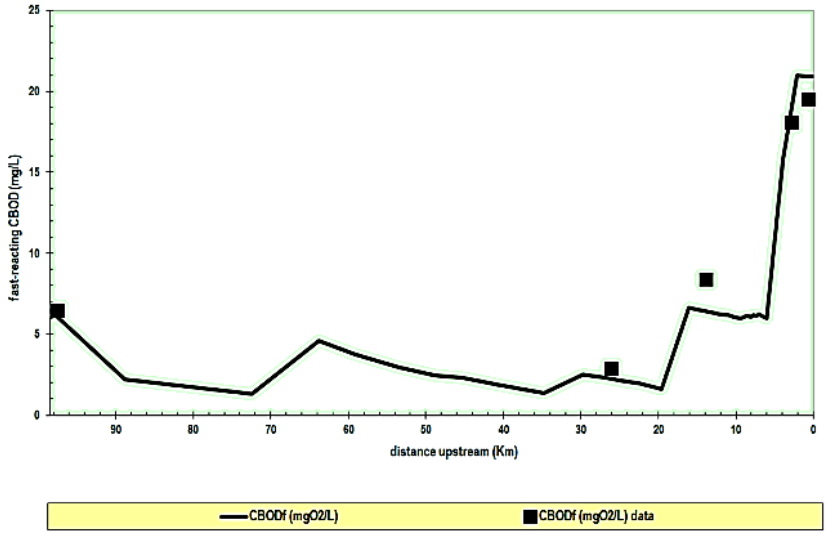

Figure 5. The curve of BOD changes in the studied range (mg/l)

در ادامه، در جدول (۲) ضرایب انتقال بار آلودگی با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2KW به‌دست آمده است و در جدول (۳) ضرایب نسبت–تجارت با توجه به رابطه (۲) محاسبه و ارائه شده است که از این ضرایب برای مدل بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

Table 2. BOD transfer coefficients in (mg,L DO),100kg BOD (rij)

Number of pollution discharge interval	Range number			
	1	**2**	**3**	**4**
1	0.02	0.038	0.194	**0.199**
2	0	0.032	0.437	**0.336**
3	0	0	0.19	**0.337**
4	0	0	0	**0.320**

Table 3. BOD trade-ratio matrix (tij)

Number of pollution discharge interval	Range number			
	1	**2**	**3**	**4**
1	1	0.44	0.59	**0.86**
2	0	1	0.99	**1.463**
3	0	0	1	**1.467**
4	0	0	0	**0.86**

۴. ۲. محاسبه هزینه و رتبه‌بندی گزینه‌های تصفیه توسط تخلیه‌کننده‌ها

مطابق توضیحات قبلی برای هر تخلیه‌کننده چهار سناریو تصفیه شامل حذف صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد بار آلودگی ورودی در نظر گرفته شده است. سناریوی ۱ شامل تخلیه فاضلاب در حالت بدون تصفیه و سناریوهای ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب شامل تخلیه فاضلاب در حالت هدف ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد بار آلودگی اولیه است.

هزینه‌ها شامل هزینه‌های تصفیه و مقادیر جریمه تخطی از استاندارد کیفی است. در سیستم هزینه و جریمه، هر تخلیه‌کننده با انتخاب درصد تصفیه کم‌تر، می‌باید جریمه تخطی بیش‌تری بپردازد، این امر موجب رعایت معیار عدالت در تخصیص هزینه‌ها می‌گردد. در شکل (۴) هزینه سالانه هر گروه تخلیه‌کننده برای سناریوهای تعریف‌شده به‌صورت نمودار نمایش داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود سناریوی ۴ هزینه نسبتاً زیادی را به تخلیه‌کنندگان تحمیل می‌کند و به‌جز گروه ۴ برای بقیه گروه‌ها سناریوهای ۱ و ۲ هزینه کم‌تری را تحمیل کرده است.

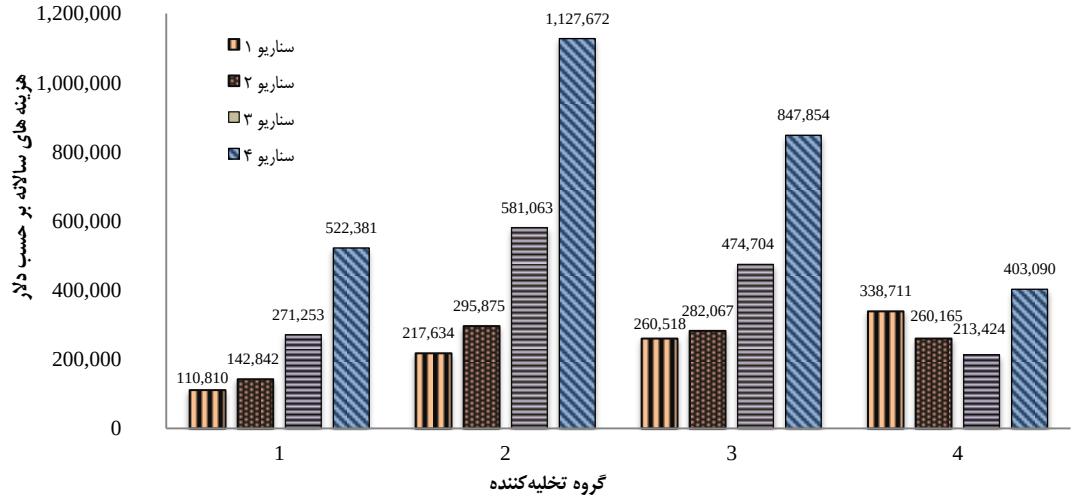

Figure 4. The annual costs of each evacuation group

در ادامه به‌منظور رتبه‌بندی‌کردن گزینه‌های تصفیه و تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، هر تخلیه‌کننده بار آلودگی گزینه‌های تصفیه را براساس معیار هزینه (هزینه‌های تصفیه و مقادیر جریمه تخطی از استاندارد کیفی)، در یک سطر به ترتیب از چپ به راست اولویت‌بندی می‌کند که تعداد سطرها و ستون‌های این ماتریس به‌ترتیب نشان‌دهنده تعداد تصمیم‌گیران (واحدهای تخلیه‌کننده فاضلاب) و گزینه‌های تصفیه است.

۴. ۳. نتایج حاصل از تصمیم‌گیری غیرقطعی

با توجه به خطاها و عدم قطعیت‌های ذاتی در برآورد هزینه‌های تصفیه و جریمه نقض استانداردهای کیفیت آب یک روش تصادفی با ترکیب رویکردهای تصمیم‌گیری و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای شناسایی بهترین سناریوهای تصفیه ایجاد شد. در این حالت بهترین روش، روشی است که هزینه کم‌تری را در پی داشته باشد، سپس روش منتخب توسط هر رویکرد به‌عنوان مجوز اولیه تخلیه بار آلودگی وارد مدل تجارت بار آلودگی می‌گردد تا درصدهای نهایی تصفیه و الگوی بهینه تجارت مجوزهای تخلیه تعیین شود. در ادامه نتایج حاصله از هر رویکرد آورده شده است و به‌عنوان‌مثال، گزینه برتر با شناسه ۱۳۲۴ گزینه‌ای است که شامل سناریوهای ۱، ۳، ۲ و ۴ به‌ترتیب برای تخلیه‌کنندگان ۱ تا ۴ است. در ادامه نتایج حاصل از رویکردهای تصمیم‌گیری (SSCR)، چانه‌زنی بازگشتی تصادفی (SFB) و تصمیم‌گیری چندمعیاره تصادفی (SMCDM) ارائه شده است.

۴. ۳. ۱. خلاصه نتایج حاصل از رویکردهای تصمیم‌گیری

با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌گردد، در رویکرد گزینش اجتماعی تصادفی نتیجه حاصل از روش رأی‌گیری میانه و توافق اکثریت و در رویکرد چانه‌زنی بازگشتی تصادفی نتیجه حاصل از روش چانه‌زنی بازگشتی با بن‌بست با تحمیل هزینه کم‌تر، معیار حفظ کیفیت آب رودخانه را تأمین می‌کنند. مقایسه هزینه‌های تحمیلی هر یک از گروه‌ها توسط رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره تصادفی نشان می‌دهد که گروه‌های تخلیه‌کننده با شرکت در فرایند تصمیم‌گیری نسبت به مقادیر هزینه‌های تخصیص داده‌شده ناراضی می‌باشند. چنانچه از رویکرد پایداری که میزان تمایل به همکاری در فرایند مذاکره را مشخص می‌کند، استفاده شود گروه‌های تخلیه‌کننده به‌منظور اجرای یک راه‌حل کمک‌کننده ادعای خود را اصلاح می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که منابع آلاینده سیاست‌های تخصیص بار آلودگی براساس رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره را در عمل چندان قبول ندارند و بنابراین توجه به پایداری سیاست‌های تخصیص بار آلودگی ضروری است.

Table 4. Summary of the results of different methods of non-deterministic decision-making approaches

Method		Selective option	Cost ($)	Probability of winning (%)
SSCR	Condorst-Score	2243	1,499,995	54
	Median voting - majority agreement	2223	934,208	79
	law of collectivism	-	-	-
	Practical condorst	2143	1,421,754	57
SFB	Unanimously	2333	1,412,033	56
	With the approval of a part of the votes	1143	1,206,239	59
	with a dead end	1123	1,016,573	76
SMCDM	Multi-criteria decision making	2333	1,540,544	43
	Stability index	2222	980,949	79

در ادامه به‌منظور کاهش هزینه و ایجاد انگیزه در تخلیه‌کننده‌ها برای مشارکت داوطلبانه در حفاظت کیفی رودخانه، گزینه تصفیه انتخاب‌شده توسط هر رویکرد به‌عنوان مجوز اولیه تخلیه بار آلودگی وارد مدل تجارت آلودگی شده و بین تخلیه‌کننده‌ها مورد تبادل قرار می‌گیرد.

۴. ۴. اجرای مدل تجارت مجوزهای تخلیه بار آلودگی

در این حالت مدل بهینه‌سازی تجارت مجوزهای بار آلودگی به‌منظور تعیین درصد تصفیه بهینه واحدهای تخلیه‌کننده و تعیین هزینه‌های تصفیه با استفاده از رابطه (۲) و نرم‌افزار MATLAB تدوین و اجرا گردیده است. نتایج حاصل از مدل تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی تهیه‌شده و هزینه هر گروه پس از تجارت مجوزهای تخلیه در جدول (۵) ارائه‌شده است.

Table 5. The results of the pollution discharge permit trade (dollars)

Approach	Pollution source group	Treatment fee based on initial license	The cost of processing in business mode	Change in the amount of annual operating costs compared to the initial license
SSCR	1	142,842	95,610	Decrease 47,232
	2	295,875	270,899	Decrease 24,976
	3	282,067	265,739	Decrease 16,328
	4	213,424	259,584	Increase 46,160
	SUM	934,208	891,832	Decrease 42,376
SFB	1	110,810	81,709	Decrease 29,101
	2	217,634	243,471	Increase 25,837
	3	474,704	45,020	Decrease 22,684
	4	213,424	221,738	Increase 8,314
	SUM	1,016,573	998,938	Decrease 17,635
SMCDM	1	271,253	179,052	Decrease 92,201
	2	581,063	511,963	Decrease 69,100
	3	474,704	384,770	Decrease 89,934
	4	213,424	86,395	Decrease 127,635
	SUM	1,540,445	1,162,181	Decrease 378,264

همان‌طورکه مشاهده می‌شود نتایج حاصل از اجرای برنامه تجارت بار آلودگی براساس رویکرد SSCR، هزینه‌ها به میزان ۴۲،۳۷۶ دلار و رویکرد SFB هزینه‌ها را ۱۷،۶۳۵ دلار کاهش می‌دهد، درحالی‌که توافق نسبی بین منابع آلاینده فراهم می‌کند. در همین حال، رویکرد تجارت بار آلودگی مبتنی بر رویکرد SMCDM هزینه‌ها را ۳۷۸،۲۶۴ دلار آمریکا کاهش می‌دهد، اما از نظر منابع آلاینده کم‌تر قابل‌قبول است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با موضوع بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه کر با رویکرد تجارت مجوز تخلیه بار آلودگی و لحاظ عدم قطعیت، ساختاری با اهداف حداقل سازی هزینه‌های حفظ محیط‌زیست و تأمین معیارهای کیفیت آب و هم‌چنین توجه به جنبه اجرایی سیاست‌ها ارائه شد.

کارایی مدل پیشنهادی با استفاده از اطلاعات رودخانه کر در استان فارس ارزیابی گردید. در این مطالعه موردی، چهار گروه تخلیه‌کننده آلودگی نقطه‌ای مشخص و برای هر گروه چهار سناریوی تصفیه در نظر گرفته شد. هزینه‌های مربوط به هر یک از سناریوهای تصفیه محاسبه شدند. ازآنجاکه ممکن است گزینه‌های مختلف تصفیه براساس نتایج مدل شبیه‌سازی منجر به تخطی از استاندارد کیفی در نقطه کنترل کیفیت در رودخانه شوند، لازم است هزینه‌هایی به‌عنوان جریمه تخطی از استاندارد کیفی برای بهبود کیفیت آب رودخانه تعیین شود. مقادیر جریمه براساس میزان تخطی غلظت متغیر کیفی شاخص از استاندارد کیفی که توسط مدل شبیه‌سازی QUAL2KW تعیین می‌شود و با توجه به هزینه‌های اضافی لازم بابت تصفیه بیش‌تر برای رسیدن به مقدار استاندارد، محاسبه می‌شوند. تابع جریمه متناسب با درصد تخلیه BOD توسط هر گروه تخلیه‌کننده به‌صورت جداگانه محاسبه شد و این مقادیر جریمه به هر گروه تخلیه‌کننده با توجه به درصد تصفیه‌ای که انتخاب می‌کنند، تخصیص داده شد. این امر موجب تأمین معیار عدالت در تخصیص هزینه‌ها می‌شود.

با توجه به خطاها و عدم قطعیت‌های ذاتی در برآورد هزینه‌های تصفیه و جریمه نقض استانداردهای کیفیت آب یک روش تصادفی با ترکیب رویکردهای تصمیم‌گیری و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای شناسایی بهترین سناریوهای تصفیه ایجاد شد. در این مطالعه، عدم قطعیت فقط برای شاخص اقتصادی در نظر گرفته شد و از عدم قطعیت سایر متغیرهای مهم مانند جریان رودخانه، دمای آب، ضرایب واکنش و غیره نادیده گرفته شد. براساس روش پیشنهادی، در برآورد هزینه تصفیه و جریمه تخطی از استاندارد کیفی که به‌ترتیب تحت تأثیر بار آلودگی هر یک از تخلیه‌کننده‌ها و غلظت متغیر کیفیت شاخص قرار می‌گیرند، به‌طور غیرمستقیم و کلی به تأثیر عدم قطعیت سایر پارامترها پرداخته می‌شود. به‌گونه‌ای که با درنظرگرفتن عدم قطعیت برای هزینه‌های تصفیه نشان می‌دهد که ماهیت تصادفی به‌طور غیرمستقیم برای مقدار بار آلودگی اتخاذ شده است. علاوه بر این، مقادیر جریمه براساس غلظت متغیر کیفیت شاخص و با مدل شبیه‌سازی کیفیت آب که تأثیر عوامل مختلفی مانند جریان رودخانه و دمای آب را مشاهده می‌کند، تعیین می‌شود. درنظرگرفتن عدم قطعیت برای مقادیر جریمه، نشان‌دهنده توجه غیرمستقیم به ماهیت تصادفی سایر متغیرهای مهم است.

رویکردهای تصمیم‌گیری استفاده‌شده در این مطالعه جهت افزایش قابلیت اجرای برنامه‌های تجارت بار آلودگی و بررسی مطلوبیت تخلیه‌کنندگان شامل گزینش اجتماعی تصادفی (SSCR)، چانه‌زنی بازگشتی تصادفی (SFB) و تصمیم‌گیری چندمعیاره تصادفی (SMCDM) است که هر رویکرد شامل روش‌های مختلفی است. سپس با مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف هر رویکرد براساس معیار هزینه، گزینه برتر هر رویکرد به‌منظور کاهش هزینه‌ها و ایجاد انگیزه در تخلیه‌کننده‌ها برای مشارکت داوطلبانه در حفاظت کیفی رودخانه، به‌عنوان مجوز اولیه تخلیه بار آلودگی وارد مدل بهینه‌سازی می‌گردد. بدین منظور از سیستم نسبت–تجارت توسعه‌یافته استفاده گردید.

خلاصه نتایج حاصل از اجرای مدل پیشنهادی در جدول (۶) ارائه‌شده است. همان‌طورکه مشاهده گردید براساس رویکرد SSCR، اعمال تخصیص بار آلودگی براساس روش رأی‌گیری میانه و توافق اکثریت مناسب‌تر است و هم‌چنین در صورت اجرای برنامه تجارت بار آلودگی هزینه‌ها به میزان ۴۲،۳۷۶ دلار کاهش می‌یابد. رویکرد SFB، روش چانه‌زنی بازگشتی با بن‌بست را به‌عنوان سیاست مطلوب معرفی می‌کند و با اجرای تجارت، هزینه‌ها به میزان ۱۷،۶۳۵ دلار کاهش می‌یابد، درحالی‌که توافق نسبی بین منابع آلاینده فراهم می‌کند. هم‌چنین براساس رویکرد SMCDM، مجوزهای اولیه تخلیه براساس رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر فاصله تعیین می‌شود و هزینه‌ها به میزان ۳۷۸،۲۶۴ دلار کاهش می‌یابد اما از نظر منابع آلاینده کم‌تر قابل‌قبول است، زیرا علاوه بر توزیع بهینه نارضایتی در بین ذی‌نفعان، تلاش می‌شود گروه‌های تخلیه‌کننده به یک گروه تبدیل شود که حالت پویای قدرت موجود در بین گروه‌ها در شرایط واقعی، در نظر گرفته نمی‌شود.

Table 6. Summarizes the overall results of pollution load trading

Approach	Selective treatment scenario	Costs based on initial permits	Costs in doing business	Change in the amount of annual expenses
SSCR	2223	208,934	891,832	Decrease 42,376
SFB	1133	161,573	998,938	Decrease 17,635
SMCDM	3333	445,540	1,162,181	Decrease 387,264

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد مدل پیشنهادی در منطقه موردمطالعه، علاوه بر حفظ استانداردهای کیفیت آب، کاهش هزینه‌ها و حل اختلاف را به‌دنبال دارد و هم‌چنین با مقایسه با سایر پژوهش‌های صورت‌گرفته در محدوده رودخانه کر، قابلیت اجرایی بیش‌تری را داراست.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Social Choice Rules (SCR)
2. Fallback Bargaining (FB)
3. Multi Criteria Decision Making (MCDM)
4. Environmental Protection Agency (EPA)
5. Hung & Shaw
6. Trading-Ratio System (TRS)
7. Shortel & Horan
8. Bayesian Network
9. Motallebi *et al*
10. Bayesian risk-induced interval stochastic modeling framework (BRISF)
11. Duke *et al*
12. Stochastic Social Choice Rules (SSCR)
13. Stochastic Fallback Bargaining (SFB)
14. Stochastic Multi-Criteria Decision-Making (SMCDM)
15. Root Mean Square Error (RMSE)
16. Kannel *et al*., 2007

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

Dash, S., Borah, S., Singh, K.R., & Kalamdhad, A.S. (2020). Seasonal and Spatial Variation of DO and BOD for Assessment of the Water Quality of Brahmaputra River. *Recent Developments in Waste Management. Springer*, 473-483.

Duke, J.M., Liu, H., Monteith, T., McGrath, J., & Fiorellino, N.M. (2020). A method for predicting participation in a performance-based water quality trading program. *Ecological Economics*, 177, 106762.

Galderisi, S., Mucci, A., Dollfus, S., Nordentoft, M., Falkai, P., Kaiser, S., Giordano, G.M., Vandevelde, A., Nielsen, M.Ø., & Glenthøj, L.B. (2021). EPA guidance on assessment of negative symptoms in schizophrenia. *European Psychiatry*, 64, e23.

Ghorbani M, M., Nikoo, M.R., & Sadegh, M. (2019). A fuzzy multi-stakeholder socio-optimal model for water and waste load allocation. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-16.

Haghighat Esfahani, E., Niko, M.R., Karimi Jashni, A., & Taleb, N. (2020). Developing a multi-objective optimization model for water and waste load allocation in rivers based on Borda bargaining model, A case study: part of Kor river system. *Water resources engineering scientific-research quarterly*, 12, 1-13.

Hung, M.-F., & Shaw, D. (2005). A trading-ratio system for trading water pollution discharge permits. *Journal of Environmental Economics and Management*, 49, 83-102.

Jamshidi, S., & Niksokhan, M.H. (2015). Waste load allocation in Sefidrud using water quality trading. *Water and Irrigation Management*. 5, 243-259.(in PPersian)

Liu, Y., Liang, Y., Ouyang, K., Liu, S., Rosenblum, D., & Zheng, Y. (2020). Predicting Urban Water Quality with Ubiquitous Data-A Data-driven Approach. *IEEE Transactions on Big Data*, 8(2), 564-578.

Mardani, R., Montaseri, H., Fazeli, M., Khalili, R., & Esmaeili, H. (2022). Spatio-temporal variation of meteorological drought and its relation with temperature and vegetation condition indices using remote sensing and satellite imagery in Marvdasht city. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(3), 72-89. (in Persian)

Mazlomi Mochani, M., Hatami, A., Moridi, A., & Khalili, R. (2023). Sensitivity assessment of the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI) and IRan Water Quality Index for Surface Water Resources (IRWQIsc) on the water quality of the Neka River. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 581-592.(in Persian)

Mesbah, S.M., Kerachian, R., & Nikoo, M.R. (2009). Developing real time operating rules for trading discharge permits in rivers: Application of Bayesian Networks. *Environmental modelling & software*, 24, 238-246.

Motallebi, M., Hoag, D.L., Tasdighi, A., Arabi, M., & Osmond, D.L. (2017). An economic inquisition of water quality trading programs, with a case study of Jordan Lake, NC. *Journal of environmental management* 193, 483–490.

Sadak, D., Ayvaz, M.T., Elçi, A., Dilaver, M., & Ayaz, S. (2023). A Novel Wastewater Load Allocation Approach for River Basins Using Simulation-Optimization Models. *Scientific Research Communications*, 3(1).

Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science of the Total Environment 584, 131-144.

Tian, Y., Jiang, Y., Liu, Q., Dong, M., Xu, D., Liu, Y., & Xu, X. (2019). Using a water quality index to assess the water quality of the upper and middle streams of the Luanhe River, northern China. *Science of the Total Environment*, 667, 142-151.

Ustaoğlu, F., Tepe, Y., & Taş, B. (2020). Assessment of stream quality and health risk in a subtropical Turkey river system: A combined approach using statistical analysis and water quality index. *Ecological Indicators*, 113, 105815.

Xu, H., Brown, D.G., Moore, M.R., & Currie, W.S. (2018). Optimizing spatial land management to balance water quality and economic returns in a Lake Erie watershed. *Ecological Economics*, 145, 104-114.

Zhang, J.L., Li, Y.P., Zeng, X.T., Huang, G.H., Li, Y., Zhu, Y., Kong, F.L., Xi, M., & Liu, J. (2019). Effluent trading planning and its application in water quality management: a factor-interaction perspective. *Environmental research*, 168, 286-305.

Zolfagharipoor, M.A., & Ahmadi, A. (2017). Effluent trading in river systems through stochastic decision-making process: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 20655-20672.