

ارزیابی کیفیت آب رودخانه هراز با کاربرد شاخص‌های کیفی IRWQI، NSFQI و CCMEWQI و بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ (RSM)

یاسمن تاج آبادی^۱ | همایون مطیعی^۲ | علی مریدی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست- مهندسی آب و فاضلاب، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: y_tajabadi@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h_motiei@sbu.ac.ir
۳. دانشیار گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_moridi@sbu.ac.ir

چکیده

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب، نقش حیاتی در تأمین نیازهای زیست‌محیطی، کشاورزی و انسانی دارند. بررسی کیفیت آب این منابع با هدف مدیریت پایدار و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی، امری ضروری است. انتخاب شاخص مناسب برای ارزیابی کیفیت آب سطحی، یکی از چالش‌های کلیدی در مدیریت منابع آب است. در این مطالعه، با هدف مقایسه سه شاخص کاربرد کیفیت آب شامل شاخص ملی ایران (IRWQI)، شاخص بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI) و شاخص شورای وزرای محیط زیست کانادا (CCMEWQI)، داده‌های حاصل از نمونه‌برداری در رودخانه هراز (نه ایستگاه در دو فصل زمستان و تابستان) به‌عنوان نمونه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد هر سه شاخص توانایی طبقه‌بندی نسبی کیفیت آب را دارند، اما تفاوت‌هایی در میزان حساسیت و تفکیک‌پذیری آن‌ها مشاهده شد؛ به‌طوری‌که شاخص NSFQI در اغلب موارد نتایج خوش‌بینانه‌تری ارائه داد. همچنین برای تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف بر خروجی هر شاخص و بهینه‌سازی مدل‌سازی کیفی، از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده شد. نتایج بیانگر آن است که در فصل تابستان پارامترهای نیتрат، فسفات، اکسیژن محلول و آمونیوم به ترتیب دارای اهمیت بالاتری می‌باشند و مجموعاً ۸۳ درصد را در بر می‌گیرد و در فصل زمستان پارامترهای اکسیژن خواهی بیولوژیکی و شیمیایی، سختی کل و اسیدیته به ترتیب دارای اهمیت بالایی می‌باشند و مجموعاً ۸۲ درصد را در بر می‌گیرد. وضعیت کیفیت آب بر اساس شاخص NSFQI در فصل تابستان پایینتر از فصل زمستان است. در فصل زمستان ۱۰۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای کیفیت متوسط و خوب می‌باشد ولی در فصل تابستان حدود ۳۴ درصد در وضعیت متوسط و خوب قرار دارند. همچنین بر مبنای این شاخص در امتداد رودخانه شاهد روند کاهش کیفیت آب در هر دو فصل می‌باشیم. این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب شاخص می‌تواند بر تفسیر وضعیت کیفی آب تأثیرگذار باشد و ترکیب آن با روش‌های آماری مانند RSM می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیریت کیفی منابع سطحی در سایر رودخانه‌ها نیز فراهم کند.

کلمات کلیدی: ارزیابی کیفیت آب، روش سطح پاسخ RSM، CCMEWQI، NSFQI، IRWQI

یکی از مسائل اساسی در قرن حاضر، حفظ و پایداری منابع آبی و کنترل اثرات منفی آلودگی‌های زیست‌محیطی بر این منابع است. با رشد سریع جمعیت، توسعه صنعتی، گسترش شهرنشینی و افزایش نیازهای کشاورزی، منابع آب سطحی مانند رودخانه‌ها با فشار روزافزونی مواجه شده‌اند (Parween et al., 2022). ورود آلاینده‌ها از منابع نقطه‌ای نظیر پساب‌های شهری و صنعتی، و همچنین منابع غیرنقطه‌ای همچون رواناب‌های کشاورزی، منجر به کاهش کیفیت آب و افزایش خطرات برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی شده است (Singh et al., 2020). سازمان بهداشت جهانی (WHO) (2004) گزارش می‌دهد که سالانه بیش از ۱.۸ میلیون نفر، عمدتاً کودکان، در کشورهای در حال توسعه به علت بیماری‌های ناشی از آب آلوده جان خود را از دست می‌دهند. این واقعیت ضرورت نظارت مؤثر و نظام‌مند بر کیفیت منابع آب سطحی را آشکار می‌سازد. در ایران نیز با وجود محدودیت منابع آبی و تنوع اقلیمی بالا، پایش کیفی منابع آب، به‌ویژه رودخانه‌ها، به‌عنوان یک اولویت زیست‌محیطی و مدیریتی مطرح است (Aazami et al., 2019; Aghajanoloo et al., 2022).

در این راستا، استفاده از شاخص‌های کیفیت آب (WQIs)^۱ به‌عنوان ابزارهایی ساده، کاربردی و قابل فهم برای ارزیابی وضعیت کیفی منابع آبی، گسترش یافته است. این شاخص‌ها با ترکیب چندین پارامتر فیزیکی، شیمیایی و میکروبی به یک مقدار عددی واحد، امکان تحلیل، مقایسه و تصمیم‌گیری در حوزه کیفیت آب را فراهم می‌کنند (Brown et al., 1970; CCME, 2017). مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان با هدف بررسی و پایش کیفیت آب رودخانه‌ها انجام شده‌اند. به عنوان مثال، Singh et al. (2020) در مطالعه‌ای بر رودخانه کالی در هند، نشان دادند که ترکیب شاخص کیفیت آب (WQI) و تحلیل‌های آماری چندمتغیره می‌تواند به شناسایی منابع اصلی آلودگی، نظیر پساب‌های صنعتی، کمک کند. همچنین Parween et al. (2022) با تحلیل کیفیت رودخانه ماهاناندا در هند، نشان دادند که تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۲ و استفاده از شاخص (NSFWQI)^۳ می‌تواند راهبردی مناسب برای شناسایی نقاط بحرانی در رودخانه‌های شهری باشد. کیفیت آب رودخانه گنگ، که ۲۶ درصد از مساحت هند را در بر می‌گیرد، با بهره‌گیری از نمونه‌برداری فصلی در ۲۰ ایستگاه و سنجش ۲۲ پارامتر هیدروشیمیایی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که شاخص NSFWQI در تمامی فصول، وضعیت کیفی آب را در سطح "متوسط" گزارش می‌کند (Kumar et al., 2021).

در یک مطالعه، شاخص کیفیت آب (CCMEWQI)^۴ برای ارزیابی وضعیت رودخانه کلانی در سریلانکا بر اساس ۱۸ پارامتر فیزیکوشیمیایی و میکروبی در ۲۷ ایستگاه طی یک دوره یک‌ساله (۲۰۱۲-۲۰۱۳) به‌کار گرفته شد. در این ارزیابی، استانداردهای ملی سریلانکا و دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای مصارف آشامیدنی و تفریحی، و همچنین رهنمودهای کیفیت آب کانادا (CWQGs)^۵ برای آبیاری و دامداری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که کیفیت آب در دو شاخص اصلی آشامیدنی (امتیاز ۳۲: ضعیف) و تفریحی (امتیاز ۳۹: ضعیف) در سطح نگران‌کننده‌ای پایین است؛ در مقابل، کیفیت آب برای مصارف آبیاری (امتیاز ۷۷: متوسط) و دامداری (امتیاز ۹۳: خوب) در محدوده قابل قبول قرار دارد (Mahagamage and Manage, 2014). Calmuc et al., (2020) در پژوهشی که در بخش رومانیایی دانوب سفلی انجام دادند، کیفیت رودخانه را با استفاده از ۱۴ پارامتر فیزیکوشیمیایی طی چهار فصل (پاییز ۲۰۱۸ تا تابستان ۲۰۱۹) در مسیر ۱۲۰ کیلومتری با شاخص CCME-WQI ارزیابی کردند. نتایج نشان داد CCME-WQI به پارامترهای فراتر از حد مجاز (مانند BODs, COD و نیترات) حساس بودند و این شاخص متأثر از نوسانات فصلی و تغییرات اکولوژیکی می‌باشد. پژوهشی در سال ۲۰۲۱ بر رودخانه دجله که از استان واسط در کشور عراق می‌گذرد با هدف ارزیابی برای مصرف آشامیدن از طریق سنجش پارامترهای مختلف فیزیکوشیمیایی در چهار ایستگاه در طول یک سال به صورت ماهانه انجام گرفت. بر اساس نتایج شاخص CCMEWQI کیفیت آب رودخانه در تمام مکان‌های مورد مطالعه حاشیه‌ای در نظر گرفته شد و شاخص بین ۵۶ تا ۶۲ متغیر بود (Fatih Ali et al., 2021).

با وجود کاربرد گسترده شاخص‌های کیفیت آب در مطالعات مختلف، نتایج آن‌ها اغلب با تفاوت‌هایی همراه است؛ تفاوت‌هایی که ناشی از تفاوت در تعداد پارامترهای مورد استفاده، نوع وزندهی به متغیرها، نحوه محاسبه و همچنین حساسیت شاخص به شرایط منطقه‌ای است (Ismail and Robescu, 2019). به‌عنوان نمونه، در مطالعه‌ای بر روی رودخانه‌های مکزیک، مشاهده شد که شاخص

CCMEWQI حساسیت بیشتری به تغییرات اکوسیستم دارد، در حالی که NSFQI نتایجی ساده‌تر و در مواردی خوش‌بینانه‌تر ارائه می‌دهد (Gaytán-Alarcón et al., 2022). همچنین، برخی مطالعات نشان داده‌اند که شاخص‌های بومی می‌توانند در مقایسه با شاخص‌های بین‌المللی در شرایط خاص منطقه‌ای عملکرد دقیق‌تری داشته باشند (Aazami et al., 2019؛ Calmuc et al., 2020). با این حال، اغلب پژوهش‌ها تنها از یک شاخص خاص استفاده کرده‌اند و مطالعاتی که مقایسه‌ی هم‌زمان چند شاخص مختلف را با مجموعه داده‌های مشترک انجام دهند، به‌ندرت در دسترس است. این در حالی است که چنین مقایسه‌ای می‌تواند درک عمیق‌تری از عملکرد نسبی شاخص‌ها فراهم کرده و راهنمایی دقیق‌تری برای انتخاب شاخص مناسب در مطالعات آینده ارائه دهد (Zare Garizi et al., 2024). از سوی دیگر، بیشتر ارزیابی‌های کیفی آب بر توصیف وضعیت موجود متمرکز بوده و تحلیل آماری پیشرفته یا مدل‌سازی عوامل تأثیرگذار در خروجی شاخص‌ها را نادیده گرفته‌اند. استفاده از روش‌های طراحی آزمایش مانند سطح پاسخ (RSM)⁶ که امکان شناسایی پارامترهای مؤثر و بهینه‌سازی مدل را فراهم می‌آورد، در ارزیابی کیفیت آب کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Ghadami et al., 2024).

نتایج پژوهش Davoudi Moghaddam et al. (2021) نیز در رودخانه ارداک، نشان دادند که وجود فاضلاب‌های روستایی، دامداری‌ها و پساب‌های کشاورزی نقش کلیدی در افت کیفیت آب دارند، به‌طوری‌که در برخی ایستگاه‌ها شاخص WQI به زیر سطح قابل قبول برای مصرف آشامیدنی رسیده بود. همچنین در مطالعه‌ای بر رودخانه کارون، توسط aghajanloo et al. (2022) با استفاده از شاخص‌های (IRWQI)⁷ و (WAWQI)⁸، الگوی نزولی کیفیت آب از بالادست به پایین‌دست را گزارش کرده و بر لزوم کنترل ورود فاضلاب و پساب‌های صنعتی تأکید کردند. در پژوهشی که بر رودخانه سرداب رود در استان مازندران انجام شده بود با نمونه‌برداری از سه ایستگاه به محاسبه دو شاخص ایران و موسسه ملی بهداشت پرداخته شد و نتایج بیانگر کیفیت بسیار خوب در بهار و بد در زمستان برای شاخص ایران و وضعیت عالی در بهار و بد در تابستان برای شاخص موسسه ملی بهداشت می‌باشد (Bagheri et al., 2024).

همچنین در پژوهشی دیگر، تغییرات مکانی و فصلی کیفیت آب رودخانه لنگرود با استفاده از شاخص NSFQI در هفت ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای کدورت، دما، نیترات، فسفات، pH، TDS و EC در فصل تابستان به بیشینه مقادیر خود رسیده‌اند، درحالی‌که بالاترین مقدار (BOD) در فصل بهار و بیشترین میزان اکسیژن محلول (DO) در زمستان ثبت شده است. بر اساس یافته‌ها، آب رودخانه برای مصارف شرب و کشاورزی بدون انجام فرایندهای تصفیه نامناسب بوده و لزوم مدیریت فوری منابع آلودگی - به‌ویژه کنترل فاضلاب و رواناب‌های کشاورزی - جهت بهبود کیفیت آب مورد تأکید قرار می‌گیرد (kazemi et al., 2018). همچنین در پژوهشی که بر رودخانه نکارود در استان مازندران انجام شده بود به منظور بررسی کیفیت آب از سه ایستگاه نمونه‌برداری انجام شد نتایج به دست آمده از شاخص IRWQI بیانگر کیفیت بد در ایستگاه ۳ و نتایج حاصل از شاخص NSFQI نشان‌دهنده وضعیت متوسط و بد در ایستگاه‌های ۲ و ۳ می‌باشد. از دلایل این اتفاق می‌توان به وجود زمین‌های کشاورزی، صنایع کاغذی، تخلیه فاضلاب‌های شهری و روستایی، وجود دامداری‌ها، مرغداری و مزارع پرورش ماهی در اطراف رودخانه اشاره کرد (Mazlomi Mochani et al., 2023). ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی حوضه گرگانرود با تحلیل داده‌های ۲۵ ایستگاه هیدرومتری و شاخص CCMEWQI نشان داد کیفیت آب از سرشاخه‌ها به سمت خروجی حوضه به‌طور معناداری کاهش می‌یابد، این مطالعه ضرورت پایش تفصیلی‌تر پارامترهای میکروبی و نیترات برای مصارف صنعتی و بهداشتی و همچنین مدیریت یکپارچه حوضه برای کنترل روند افزایشی شوری و آلودگی پایین‌دست را تأکید می‌کند (Zare Garizi et al., 2024).

در ادامه به تعدادی از پژوهش‌های انجام شده با استفاده از روش (DOE)⁹ پرداخته می‌شود. در پژوهشی به بررسی آلودگی فیزیکوشیمیایی پساب یک واحد لبنی در مراکش پرداخته شد که مقادیر پارامترهای کلیدی شامل COD، TKN-N و TSS به‌طور معناداری فراتر از استانداردهای ملی مراکش بود. کارایی تصفیه با کربن فعال تجاری بر اساس حذف COD، TSS و رسانایی، با استفاده از طراحی آزمایش و تحلیل آماری ارزیابی شد. این مطالعه تأثیرپذیری کیفیت پساب از فعالیت‌های صنعتی و ظرفیت کربن فعال در کاهش آلاینده‌ها را تأیید می‌کند (Rachiq et al., 2022). در مطالعه‌ای به ارزیابی یک نانوجاذب مغناطیسی جدید برای حذف مؤثر تراسایکلین از فراوان‌ترین آنتی‌بیوتیک‌های آلاینده منابع آبی پرداخته شد. با بهینه‌سازی پارامترها از طریق روش سطح پاسخ

(RSM)، حداکثر بازده جذب ۹۹/۹۶٪ در شرایط بهینه (دما: ۳۰°C، غلظت جاذب: ۱۰۰۰ mg/L، غلظت تتراسایکلین: ۲۰ mg/L، زمان تماس: ۹۰ دقیقه) حاصل شد. مدل ریاضی درجه دوم با ضریب تعیین $R^2=0.9931$ صحت پیش‌بینی فرآیند را تأیید کرد. خاصیت مغناطیسی نانوجاذب، بازیابی آسان و کارایی بالا را ممکن ساخت، که آن را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای تصفیه آب تبدیل می‌کند (Ghadami et al., 2024). با توجه به کاربردهای گسترده طراحی آزمایش در تصفیه آب و کنترل کیفیت آن، در این تحقیق از روش طراحی آزمایش جهت آنالیز نتایج استفاده گردید.

بر این اساس، پژوهش حاضر با دو هدف اصلی طراحی شده است که عبارتند از: مقایسه عملکرد سه شاخص پرکاربرد کیفیت آب (IRWQI، NSFQI و CCMWQI) با داده‌های حاصل از نمونه‌برداری رودخانه هراز در شمال ایران و تحلیل اثر نسبی پارامترهای کیفی بر نتایج هر شاخص و ارائه یک مدل بهینه‌سازی شده با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، به منظور بهبود دقت در پیش‌بینی وضعیت کیفی منابع آب سطحی و سهولت امر در صورت فقدان پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص‌های متداول.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه هراز، بخشی از حوضه آبریز درجه‌ی دو رودخانه هراز و رودخانه‌های بین هراز و قره‌سو است. حوضه آبریز رودخانه هراز و رودخانه‌های بین هراز و قره‌سو، خود زیرحوضه‌ای از حوضه آبریز درجه‌ی یک دریای مازندران است. حوضه آبریز رودخانه هراز از ارتفاعات استان تهران آغاز می‌شود و بخش عمده آن در استان مازندران قرار می‌گیرد. حوضه آبریز رودخانه هراز در محدوده‌ی طول‌های جغرافیایی ۵۱/۴۳ تا ۵۲/۶۲ درجه و عرض‌های جغرافیایی ۳۵/۷۵ تا ۳۶/۶۵ درجه شمالی واقع شده است (Ministry of Energy Department of Technical Affairs NO.310., 2012).

این حوضه شامل رودخانه‌هایی است که از رشته کوه البرز مرکزی سرچشمه می‌گیرند و به دریای خزر می‌ریزند. رودخانه هراز جریان اصلی است که از این حوضه عبور می‌کند. مساحت حوضه آبریز هراز حدود ۴۰۱۴ کیلومتر مربع می‌باشد که شامل کوه‌ها، تپه‌ها، رودخانه‌ها و نهرها می‌شود (Athari and Motiee, 2025). کمینه دمای هوای زمستان به ۲۵- درجه سانتیگراد و بیشینه دمای تابستان به ۳۶/۵+ درجه سانتیگراد می‌رسد (Salvati et al., 2023). ارتفاع منطقه بین ۳۲۸ تا ۵۶۱۰ متر از سطح دریا متغیر است و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۵۰۰ میلی‌متر است تغییرات مکانی بارندگی بر اساس گزارش اداره هواشناسی ایران نشان می‌دهد که بیشترین حجم بارندگی در دی، بهمن، اسفند رخ می‌دهد (Khosravi et al., 2018).

بیشترین سطح پوشش حوضه آبریز هراز را مراتع و بیشه‌زارهای متراکم و قسمت شمال شرقی حوضه را جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم تشکیل می‌دهد که به علت وجود رودخانه‌های متعددی مثل رودخانه هراز در سراسر حوضه اطراف این رودخانه‌ها را کاربری زراعت آبی و باغات تشکیل می‌دهد و به علت وجود سلسله جبال البرز در منطقه مورد مطالعه، ستیغ‌ها و صخره‌ها اراضی فاقد پوشش گیاهی را تشکیل می‌دهند. مرتفع‌ترین نقطه حوضه هراز، قله دماوند با ارتفاع ۵۶۱۰ متر می‌باشد. بنابراین نقشه کاربری اراضی به هفت کلاس جنگل، زراعت آبی، مخازن آبی، اراضی فاقد پوشش گیاهی، مرتع، باغات و اراضی مسکونی طبقه‌بندی می‌شوند (Fallah Sourki et al., 2016). پوشش گیاهی تأثیر مهمی روی الگو شبکه زهکشی حوضه دارد به علاوه تفاوت پوشش گیاهی تأثیر زیادی روی رطوبت خاک، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق و فرسایش‌پذیری می‌گذارد. مراتع به علت ساختار ریشه‌ای متراکم شدیداً در نگهداشت ذرات خاک به یکدیگر تأثیر می‌گذارد. جنگل‌ها نیز به علت داشتن پوشش تاج، مانع برخورد مستقیم قطرات باران با سطح خاک و متلاشی شدن خاکدانه‌ها و موجب تشدید نفوذپذیری می‌گردند. گسترش اراضی مسکونی باعث افزایش سطوح نفوذناپذیر خاک و افزایش میزان رواناب در نتیجه ایجاد سیل و فرسایش می‌گردد. اراضی فاقد پوشش تأثیر زیادی در فرسایش خاک خواهند داشت چون سطح زمین فاقد هرگونه پوشش گیاهی در برابر عوامل فرسایش آبی و بادی قرار می‌گیرد.

افزایش مساحت اراضی فاقد پوشش گیاهی، زراعت آبی، باغات و اراضی مسکونی فرسایش به علت کاهش نفوذپذیری افزایش پیدا می‌کند (Mahdavy, 2009).

رودخانه هراز تقریباً ۱۸۵ کیلومتر طول دارد و قبل از رسیدن به سواحل جنوبی دریای خزر، از شهر آمل عبور می‌کند. میانگین جریان سالانه در ایستگاه کره سنگ در ۵۴ سال آبی به طور متوسط ۳۰ متر مکعب در ثانیه تخمین زده می‌شود. با این حال، خشکسالی‌های اخیر منجر به کاهش نرخ جریان شده است (Mohseni-Bandpei and Yousefi, 2013). حوزه مورد پژوهش در محدوده‌ای میان کرانه‌های خزر (شمال)، ارتفاعات مرکزی البرز (جنوب) و حوضه آبریز بابلرود (شرق) واقع شده است. رودخانه هراز با منشأ گرفتن از دامنه‌های شمالی-شرقی کوه دماوند و ساختارهای کوهزایی البرز، شامل دو شاخه اصلی می‌باشد که عبارتند از: رودخانه نور (غربی-شرقی) و رودخانه لار و شاخه اصلی هراز (جنوبی-شمالی) که در موقعیت ۴۶ کیلومتری جنوب آمل ادغام شده و کانال اصلی رود را تشکیل می‌دهند که نهایتاً به دریای خزر تخلیه می‌گردد. در طول رودخانه هراز نه ایستگاه نمونه‌برداری انتخاب شده است که در شکل (۱) به ترتیب موقعیت کشور، استان مازندران، حوضه آبریز هراز، رودخانه هراز، نقاط نمونه‌برداری، شهرها، روستاها، مزارع پرورش ماهی، معادن شن و ماسه، رستوران‌ها و دریاچه سد لار نمایش داده می‌شود.

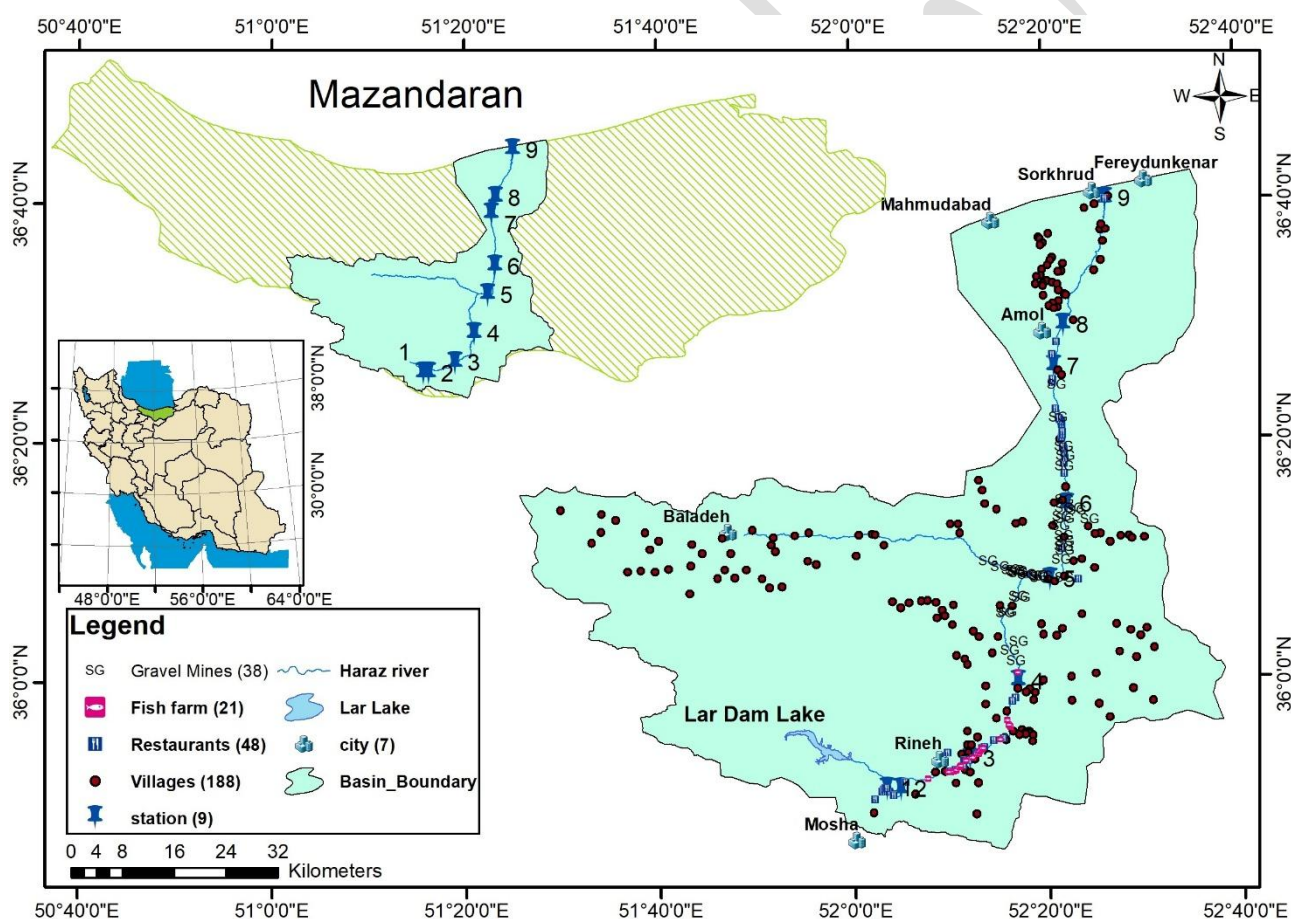


Figure 1. Location of the haraz river and sampling stations

۲-۲- معرفی ایستگاه‌های سنجش کیفیت

در امتداد رودخانه هراز مصرف‌کنندگان متعددی از جمله شهرها و روستاها، مزارع پرورش ماهی، معادن سنگ، شن و ماسه و مجتمع‌های اقامتی و رستوران‌های بسیاری وجود دارد به طوریکه پراکندگی روستاها در تمام سطح حوضه آبریز می‌باشد اما گستردگی مزارع پرورش ماهی از سرشاخه لار تا نیمه رودخانه هراز است. و اکثریت معادن سنگ و شن و ماسه که در حوالی سرشاخه بلده بوده باعث ورود گل و لای به رودخانه می‌شود و این کدورت تا مصب رودخانه ادامه دارد.

با توجه به تنوع و پراکندگی مصرف کنندگان و انواع آلاینده‌هایی که به رودخانه وارد می‌شوند می‌بایست نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای باشد که تأثیرات هر یک از مصرف‌کنندگان لحاظ شود و از لحاظ دسترسی به آن نقطه رودخانه ممکن العبور باشد. با در نظر گرفتن همه این جوانب و بر اساس توپولوژی رودخانه و بررسی‌های میدانی بعمل آمده نه ایستگاه انتخاب گردید و تلاش گردید که ایستگاه‌های انتخابی در مسیر رودخانه تمام معیارهای لازم از جمله: سرشاخه‌های رودخانه در پایین دست سد لار، در برگرفتن بالادست و پایین دست ورودی نقاط آلاینده مانند مراکز پرورش ماهی، فاضلاب شهر بزرگ آمل و روستاهای مهم و پرجمعیت، پساب معادن سنگ و شن و ماسه، زه‌آب‌های کشاورزی حاوی کودهای شیمیایی و سموم را پوشش دهد. نام و مختصات جغرافیایی هریک از نه ایستگاه در جدول (۱) آورده شده‌است.

Table 1. Geographical coordinates of sampling stations

Station	Longitude (degrees-minutes-seconds)	Latitude (degrees-minutes-seconds)
S1	52° 03' 22"	35° 50' 51"
S2	52° 04' 46"	35° 50' 47"
S3	52° 11' 52"	35° 53' 16"
S4	52° 16' 52"	35° 59' 42"
S5	52° 20' 23"	36° 08' 12"
S6	52° 22' 14"	36° 14' 27"
S7	52° 21' 10"	36° 26' 00"
S8	52° 22' 07"	36° 29' 25"
S9	52° 26' 35"	36° 40' 24"

۲-۳- پارامترها و روش‌های اندازه‌گیری

در تحقیق حاضر با هدف اندازه‌گیری ۱۲ پارامتر دما، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، اکسیژن خواهی شیمیایی، نیتрат، فسفات، هدایت الکتریکی، کلیفرم مدفوعی، کدورت، pH، آمونیوم و سختی کل در نه ایستگاه به تواتر دو دوره، زمستان ۱۳۹۹ و تابستان ۱۴۰۰ عملیات نمونه‌برداری با حفظ و تنظیم شرایط برداشت، نگهداری و ارسال نمونه‌ها به یکی از آزمایشگاه‌های مورد اعتماد سازمان حفاظت محیط‌زیست انجام شد. آزمایشات فیزیکوشیمیایی و میکروبیولوژی با استفاده از دستورالعمل‌ها و روش‌های استاندارد توصیه شده توسط مراجع معتبر بین المللی، انجام گردید.

۲-۴- معرفی شاخص‌های کیفی

۲-۴-۱- شاخص کیفیت منابع آب ایران IRWQI_{Sc}

شاخص‌های کیفیت آب ایران در دانشگاه شهید بهشتی و به سفارش سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران تهیه شد. هدف غایی این پژوهش توسعه شاخص‌های بوم سازگار برای سنجش وضعیت کیفی منابع آبی ایران با در نظرگیری همزمان: ۱- ویژگی‌های اکولوژیک و هیدروژئولوژیک بومی و ۲- چالش‌های جاری و محدودیت‌های ساختاری می‌باشد، به گونه‌ای که شاخص‌های تدوین شده بتوانند تصویر جامع تحلیلی از دینامیک کیفی منابع آب در ایران ارائه کنند (Hashemi et al., 2011).

این شاخص‌ها توسط کمیسیون امور زیربنایی و محیط زیست دولت تصویب و توسط سازمان حفاظت محیط زیست ابلاغ شد و اکنون به عنوان شاخص‌های ملی برای ارزیابی کیفیت منابع آب ایران استفاده می‌شوند. این شاخص‌ها بر اساس تحلیل داده‌های کیفیت منابع آب ایران و ترکیبی از روش‌های آماری تحلیل همبستگی بین متغیرها، تحلیل مولفه‌های اصلی و تحلیل عاملی و پرسشنامه برای دریافت نظرات خبرگان تهیه شده‌است. علاوه بر تحلیل آماری؛ مواردی نظیر اشتراک در اغلب ایستگاه‌های پایش کیفیت آب کشور، وجود داده‌های کافی، قابل اندازه‌گیری در آزمایشگاه‌های کشور، هزینه اندازه‌گیری مناسب، و ارتباط با مهمترین مشکلات شناسایی شده در سطح حوضه‌های آبریز در انتخاب متغیرها دخیل بودند.

از آنجا که مسایل کیفیت آب و هم چنین حدود مشاهده‌ای متغیرهای مختلف در پهنه‌های آب سطحی و زیرزمینی متفاوت است و همسان پنداشتن آنها ریسک خطای برآورد میزان آلودگی توسط شاخص را به شدت افزایش می‌دهد، شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی و هم چنین متغیرهای مربوط به آلاینده‌های متداول و سمی ارائه شد (Ministry of Energy Deputy of Water Affairs No.196.,2020) که در این پژوهش از شاخص مربوط به آلاینده متداول آب‌های سطحی استفاده گردید.

مراحل محاسبه شاخص به صورت زیر می‌باشد:

(۱) انتخاب متغیرها و به دست آوردن مقدار زیر شاخص برای هر متغیر با استفاده از منحنی‌های رتبه‌بندی مربوطه

(۲) تعیین وزن هر متغیر با استفاده از جدول مربوطه

(۳) محاسبه مقدار شاخص با استفاده از رابطه میانگین هندسی وزنی

$$IRWQIsc = \left(\prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

رابطه (۱)

$$\gamma = \sum_{i=1}^n w_i$$

که در آن w_i وزن پارامتر i ام، n تعداد پارامترها که ممکن است از ۱۱ پارامتر کمتر باشد رابطه (۱) قابل استفاده می‌باشد و نیازی به هیچگونه تصحیحی نیست. پارامترهای مورد استفاده و وزن هر یک در جدول (۲) آورده شده است و در نهایت متناسب با عددی که برای شاخص به دست آمد در یک طبقه کیفی قرار می‌گیرد که به صورت جدول (۳) می‌باشد.

Table 2. Weights of parameters in the IRWQIsc index

Parameters	Unit	Weight
Fecal coliform	MPN/100ml	0.14
BOD5	mg/l	0.117
Nitrate	mg/l	0.108
Dissolved oxygen	% saturation	0.097
Electrical conductivity	µs/cm	0.096
COD	mg/l	0.093
Ammonium	mg/l	0.09
Phosphate	mg/l	0.087
Turbidity	NTU	0.062
Total hardness	mg CaCO3/l	0.059
pH		0.051

Table 3. Descriptive classification for IRWQIsc index

Descriptive class	colour	Index value
Very bad		<15
Bad		15-29.9
Relatively bad		30-44.9
Medium		45-55
Relatively good		55.1-70
Good		70.1-85
Very good		>85

۲-۴-۲- شاخص کیفیت آب موسسه ملی بهداشت NSFQI

در سال ۱۹۷۰ میلادی سازمان بهداشت جهانی طرحی اجرایی کرد که طی آن ۱۴۲ پژوهشگر از ملیت‌های مختلف، ۳۵ پارامتر کیفیت آب را طی آزمایش‌های گسترده بررسی نمودند. از این میان نه پارامتر به عنوان پارامترهای اساسی تعیین کیفیت آب معرفی شدند. این نه پارامتر شامل اکسیژن محلول (Dissolved Oxygen)، تغییرات دما (T)، کلیفرم مدفوعی (Fecal coliform)، کدورت (Turbidity)، فسفات کل (Phosphate)، نترات (Nitrate)، کل مواد جامد (Total solid)، pH و میزان اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD) می‌باشد. سپس با میانگین‌گیری از داده‌های کارشناسی، منحنی‌های رتبه‌بندی برای هر پارامتر ترسیم شد. در ادامه براساس اهمیت پارامترها مطابق جدول (۴) به هرکدام وزنی اختصاص داده شد. شاخص کیفیت آب با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید (Brown et al., 1970).

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه (۲) I_i = زیر شاخص هر پارامتر، W_i = ضریب وزنی مربوط به آن پارامتر، n = تعداد پارامترها برای محاسبه شاخص

Table 4. Weights of parameters in the NSFQI index (Brown et al., 1970)

Parameters	Unit	Weight
Dissolved oxygen	% saturation	0.17
Fecal coliform	MPN/100ml	0.15
pH		0.12
BOD5	mg/l	0.1
Temperature	C	0.1
Phosphate	mg/l	0.1
Nitrate	mg/l	0.1
Turbidity	NTU	0.08
TDS	mg CaCO3/l	0.08

زیر شاخص کیفیت آب برای هر متغیر با استفاده از منحنی‌های رتبه‌بندی مربوط به هر متغیر، محاسبه و با در نظر گرفتن ارزش وزنی هر متغیر مقدار شاخص با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید و معادل توصیفی کیفیت آب براساس جدول (۵) تعیین می‌شود.

Table 5. Descriptive classification for NSFQI index

Descriptive class	colour	Index value
Very bad		0-25
Bad		25.1-50
Medium		50.1-70
Good		70.1-90
Excellent		90.1-100

۲-۴-۳- شاخص کیفیت آب کانادا CCMEWQI

شاخص مذکور بر مبنای استاندارد کیفیت آب بریتیش کلمبیا (BCWQI) طراحی شده است. ویژگی متمایز این روش، امکان انتخاب پارامترها توسط کاربر بر اساس نیازهای مطالعه می‌باشد. ابتدا چهار مؤلفه اصلی: (۱) نمونه‌های آبی (۲) بازه زمانی (۳) متغیرهای

انتخابی و ۴) هدف ارزیابی، مشخص می‌شوند سپس سه فاکتور کلیدی F1، F2 و F3 که لازمه محاسبه شاخص کیفیت آب کانادایی (CWQI) می‌باشد تعیین می‌گردد. فاکتور F1 (نشان‌دهنده تعداد متغیرهای تخطی کرده) و فاکتور F2 (نشانگر تعداد آزمایش‌های تخطی کرده) مستقیم از داده‌های خام به دست می‌آیند ولی فاکتور F3 (دامنه انحراف معیار) نیازمند طی مراحل تکمیلی می‌باشد (CCME, 2017).

بر اساس مدل مفهومی شکل (۲) و دستورالعمل ارائه شده این شاخص از سه فاکتور محدوده، فراوانی و دامنه تشکیل شده است. و در نهایت عددی بین صفر تا ۱۰۰ برای شاخص کیفی آب ارایه می‌دهد.

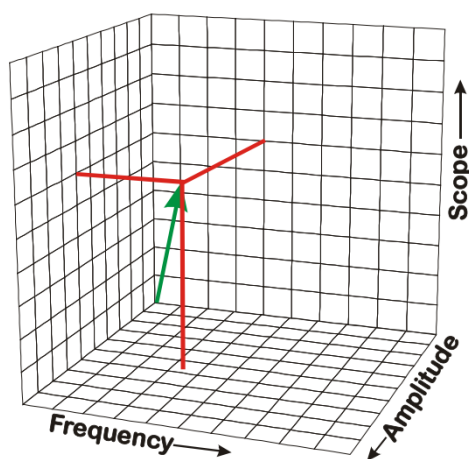


Figure 2. Conceptual model of the CCMEWQI index (CCME, 2017)

محدوده (F1) عبارت است از درصد پارامترهایی که در طول دوره زمانی مورد بررسی از آستانه تعیین شده تجاوز کرده باشند (نسبت به تعداد کل پارامترها) که از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$F1 = \left[\frac{\text{تعداد پارامترها مردود}}{\text{کل تعداد پارامترها}} \right] \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

فراوانی (F2) عبارت است از درصد آزمایش‌هایی که در طول دوره زمانی مورد بررسی از آستانه تعیین شده تجاوز کرده باشند (نسبت به تعداد کل داده) که از رابطه (۴) به دست می‌آید (فراوانی عدم تحقق اهداف)

$$F2 = \left[\frac{\text{تعداد آزمایشات مردود}}{\text{کل تعداد آزمایشات}} \right] \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

دامنه (F3) عبارت است از میزان تجاوز از آستانه تعیین شده که در سه مرحله محاسبه می‌شود (میزان برآورده نشدن اهداف). مرحله اول: محاسبه میزان انحراف (Excursion) با استفاده از رابطه (۵) در زمانی که مقادیر متغیر کیفیت آب نباید از مقادیر استاندارد تجاوز کند.

$$Excursion = \left[\frac{\text{مقدار عددی آزمایش مردود}}{\text{مقادیر استاندارد}} \right] - 1 \quad \text{رابطه ۵}$$

محاسبه میزان انحراف با استفاده از رابطه (۶) در زمانی که مقادیر متغیر کیفیت آب نباید کمتر از مقادیر استاندارد باشند.

$$Excursion = \left[\frac{\text{مقادیر استاندارد}}{\text{مقدار عددی آزمایش مردود}} \right] - 1 \quad \text{رابطه ۶}$$

مرحله دوم: با استفاده از رابطه (۷) نرمال سازی جمع میزان انحرافات صورت می گیرد.

$$nse = \left[\frac{\sum_{i=0}^n Excursion}{\text{کل تعداد آزمایشات}} \right] \quad \text{رابطه ۷}$$

مرحله سوم: با استفاده از رابطه (۸)، محاسبه F3 انجام می شود.

$$F3 = \left[\frac{nse}{0.01nse + 0.01} \right] \quad \text{رابطه ۸}$$

پس از محاسبه هر ۳ فاکتور، شاخص نهایی با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می گردد و توصیف نتایج شاخص به صورت جدول (۶) می باشد.

$$CCMEWQI = 100 - \left[\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1/732} \right] \quad \text{رابطه ۹}$$

Table 6. Descriptive classification for CCMEWQI index

Descriptive class	Index value	Interpretation of water quality conditions
Poor	0-44.9	water quality is almost always threatened or impaired; conditions usually depart from natural or desirable levels
Marginal	45-64.9	water quality is frequently threatened or impaired; conditions often depart from natural or desirable levels
Fair	65-79.9	water quality is usually protected but occasionally threatened or impaired, conditions sometimes depart from natural or desirable levels
Good	80-94.9	water quality is protected with only a minor degree of threat or impairment; conditions rarely depart from natural or desirable levels
Excellent	95-100	water quality is protected with a virtual absence of threat or impairment; conditions very close to natural or pristine levels

لازم به ذکر است برای محاسبه شاخص CCMEWQI بسته به هدف و کاربری مورد نظر از آب، باید از استاندارد مرتبط با آن استفاده شود. از انواع استانداردهای موجود می توان به استاندارد آب آشامیدنی، استاندارد آبیاری و کشاورزی، استاندارد حفظ حیات آبی، استاندارد مختص هر یک از صنایع و استاندارد تفرج و گردشگری اشاره کرد. مسلم است که در کل، حدود قائل شده در استاندارد آب شرب بسیار شدیدتر از مصارف کشاورزی است بنابراین انتخاب این نوع استانداردها می تواند کار طبقه بندی کیفی را دچار مشکل نماید.

۲-۵- طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ

طراحی آزمایش DOE و یک عامل در یک زمان OFAT¹⁰ دو روش مختلف برای بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر روی متغیر وابسته هستند که هر کدام ویژگی ها و مزایای خاص خود را دارند (Montgomery, 2020). طراحی آزمایش به طور همزمان چندین متغیر را بررسی می کند، در حالی که OFAT فقط بر روی یک متغیر تمرکز دارد (Antony, 2023). طراحی آزمایش قدرت تحلیل بالاتری دارد و می تواند تعاملات را شناسایی کند، ولی OFAT به تحلیل جداگانه متغیرها می پردازد. همچنین گزارش شده است که روش OFAT غیرقابل اعتماد و بسیار وابسته به نقطه شروع توالی مدل است (Weissman and Anderson, 2015). هدف اصلی DOE به دست آوردن حداکثر مقدار "اطلاعات" در عین محدود کردن تعداد مشاهدات مورد نیاز است (Lee et al., 2022). بسته به هدف مطالعات، ممکن

است یکی از این روش‌ها مناسب‌تر باشد. برای مطالعات پیچیده، طراحی آزمایش معمولاً انتخاب بهتری است.

طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ (RSM) مبتنی بر فرایندهای مدلسازی ریاضی و کالیبراسیون پارامترهای ورودی از طریق تکنیک‌های آماری است. در این چارچوب، برای هر پارامتر پاسخ (متغیر وابسته) که در این پژوهش کیفیت آب می‌باشد یک مدل رگرسیونی چندجمله‌ای توسعه می‌یابد که قادر به کمی‌سازی اثرات اصلی فاکتورهای مستقل و برهمکنش‌های خطی/غیرخطی بین آن‌ها بر روی متغیر هدف می‌باشد.

مدل چند متغیره به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^n \alpha_{ij} x_i x_j \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در معادله (۱۰) Y پاسخ پیش بینی شده، α_0 ضریب ثابت، α_1 ، α_2 تا α_{11} اثرات خطی، α_{11} تا α_{22} تا α_{11} اثرات مربعات، و α_{12} ، α_{13} تا α_{10} اثرات متقابل می‌باشند. در حالت گد شده مقادیر حداکثر و حداقل به ترتیب به $+1$ و -1 تبدیل می‌شوند و بقیه مقادیر طی رابطه‌ی (۱۱) به مقادیر مابین -1 تا $+1$ تبدیل می‌شوند.

$$\text{Coded } x_i = \frac{x_i - \frac{\max(x_i) + \min(x_i)}{2}}{\frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{2}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در این تحقیق برای بررسی تاثیر پارامترها و اثر همزمان پارامترها از روش سطح پاسخ با نرم افزار متلب استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات پارامترهای کیفی در ایستگاه‌های مورد سنجش در امتداد رودخانه

در این پژوهش به منظور ارزیابی کیفیت آب رودخانه هراز، از نه ایستگاه در طی دو فصل نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری ۱۱ پارامتر فیزیکو شیمیایی انجام شد. که نتایج در قالب نمودار ستونی در شکل (۳) آورده شده است. ایستگاه شماره یک در پایین دست سد لار جایی که سرشاخه لار به رودخانه هراز می‌ریزد قرار دارد و مابقی ایستگاه‌ها در امتداد مسیر رودخانه که حدوداً ۱۴۰ کیلومتر می‌باشد؛ جانمایی گردیدند و آخرین ایستگاه (شماره نه) در مصب رودخانه قرار دارد.

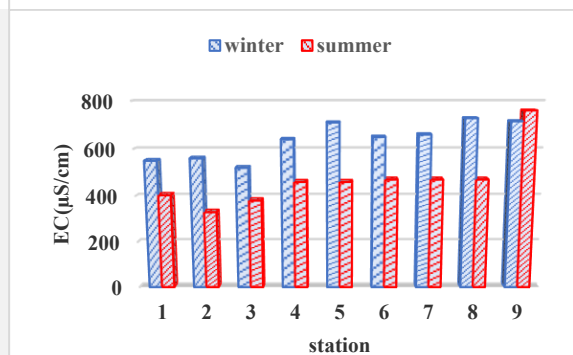
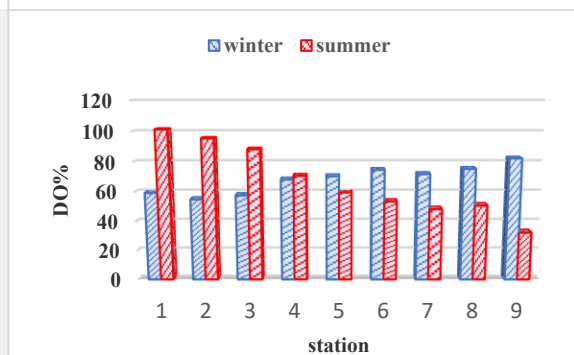
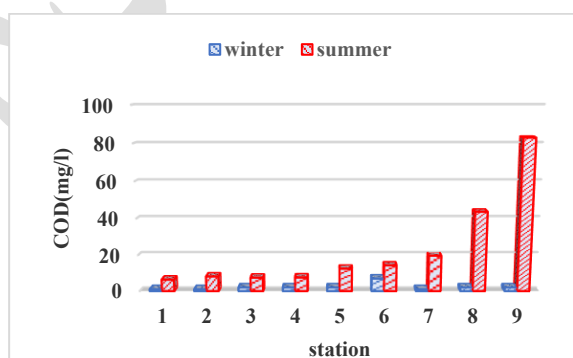
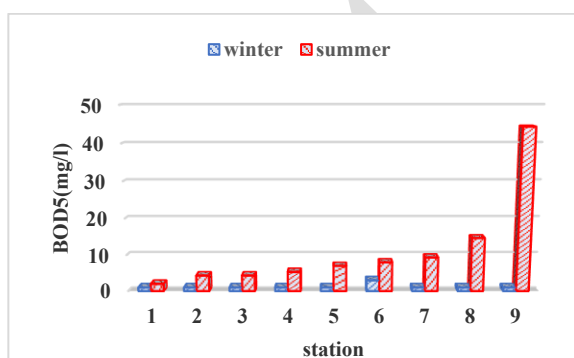
pH آب بیانگر اسیدی و بازی بودن آب می‌باشد و به نوعی فاکتور پایه‌ای اثر گذار در دیگر پارامترها بوده و برای انواع مصارف شرب، آبیاری و کشاورزی، حیات آبریان و استفاده صنایع مهم می‌باشد. میزان pH در نه ایستگاه در فصل زمستان بین شش تا ۸/۴ و در فصل تابستان بین ۸/۳ تا ۸/۹ و به طور میانگین در دو فصل ۸/۲ که نشان دهنده خواص قلیایی در رودخانه می‌باشد همچنین مطابق استاندارد کیفیت آب‌های ایران pH مناسب برای اکوسیستم ماهیان سردآبی شش تا نه بوده که بیانگر این امر است که pH رودخانه در هر دو فصل مناسب برای حیات آبریان می‌باشد.

مقدار اکسیژن حل شده در آب رودخانه مشخص کننده نوع فعالیت بیولوژیکی میکروارگانیسم‌ها اعم از هوازی یا غیر هوازی می‌باشد و همچنین بر روی حیات آبریانی که به طور طبیعی در اکوسیستم رودخانه وجود دارند اثر می‌گذارد. میزان اکسیژن مطلوب مطابق استاندارد مذکور برای حیات آبریان به این صورت است که باید حداقل در ۵۰ درصد مواقع نه میلی گرم بر لیتر یا ۹۰ درصد اشباع و بیشتر و در ۱۰۰ درصد مواقع هفت میلی گرم بر لیتر یا ۷۰ درصد اشباع و بیشتر باشد. نتایج در فصل زمستان بیانگر این است که در ایستگاه دو و سه، مقدار ۶/۷ و ۶/۴۵ میلی گرم در لیتر بوده ولی در بقیه ایستگاه‌ها در حالت مطلوب قرار دارند ولی در فصل تابستان از ایستگاه پنج تا نه در محدوده ۲/۵ تا ۴/۸ میلی گرم در لیتر قرار دارد که هرچه به سمت دریا می‌رود اکسیژن محلول کاهش یافته که این امر ناشی از ورود پساب‌ها و افزایش (BOD) می‌باشد. دمای آب رودخانه در بازه دو تا ۱۲ درجه در فصل زمستان که

کمترین دما مربوط به ایستگاه یک بوده و بازه ۲۲ تا ۲۹ درجه در فصل تابستان می‌باشد و بیشترین دما مربوط به ایستگاه نه می‌باشد. میزان (BOD) در ۱۰۰ درصد ایستگاه‌ها در فصل زمستان در حد مطلوب برای شرب و آبیان می‌باشد ولی در فصل تابستان در ۹۰ درصد ایستگاه‌ها از حد مجاز تجاوز می‌نماید. مقدار جامدات محلول و هدایت الکتریکی اثر مستقیم بر هم دارند و محدوده اعداد در فصل زمستان بزرگتر از فصل تابستان می‌باشد. که می‌تواند ناشی از بارندگی‌ها و شستن خاک و ایجاد رواناب‌های کشاورزی به سمت رودخانه باشد و هر چه از ایستگاه دو به نه (از بالا دست به پایین دست رودخانه) نزدیک شده مقدار هدایت الکتریکی در هر دو فصل افزایش می‌یابد. که ناشی از اثرات تجمعی ورود پساب‌های کشاورزی در امتداد رودخانه می‌باشد.

میزان جامدات معلق و کدورت با یکدیگر ارتباط دارد و محدوده نتایج کدورت در فصل زمستان کوچکتر از بازه اعداد در فصل تابستان بوده که نسبت به استاندارد ۱۰۵۳ که حداکثر مجاز پنج (NTU) می‌باشد اختلاف معناداری دارد همچنین بحث کدورت به دلیل اینکه مانع از نفوذ نور به درون آب می‌باشد حیات و رشد آبیان را با اختلال جدی مواجه می‌سازد و از این منظر هم می‌بایست تحقیقات گسترده‌ای هم در جهت شناسایی و هم در جهت کاهش عوامل کدورت ساز انجام گیرد. لازم به ذکر است افزایش ناگهانی کدورت از ایستگاه پنج تا انتهای مسیر، به دلیل ورود جریان سیلابی از سرشاخه بلده به سمت جریان اصلی هراز می‌باشد همچنین تمرکز جانمایی معادن شن و ماسه حذفاصل ایستگاه‌های چهار تا هفت تشدیدکننده این امر می‌گردد.

نیتрат و فسفات در فصل زمستان در محدوده‌ی تقریباً ثابتی قرار دارد ولی در فصل تابستان روند افزایشی از بالادست تا پایین دست رودخانه را دارد و بازه اعداد نسبت به زمستان بزرگتر می‌باشد.



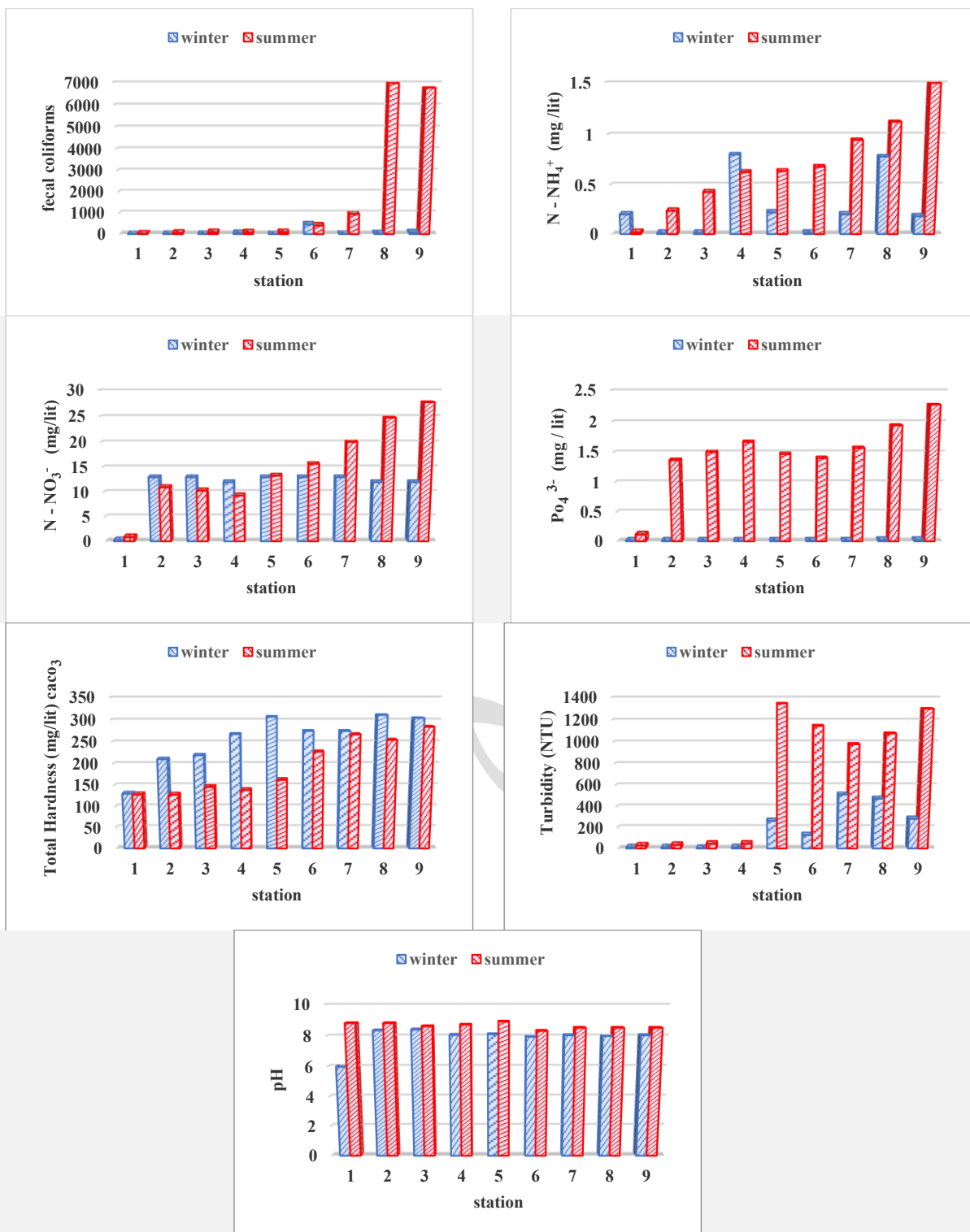


Figure 3. Variations of BOD₅, COD, DO%, EC, Fecal Coliform, Ammonium, Nitrate, Phosphate, Total Hardness, Turbidity, and pH at 9 stations along the river during two sampling seasons (winter vs. summer)

۲-۳- نتایج شاخص‌های کیفی آب

با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از آزمایشات، شاخص‌های کیفی محاسبه گردید و نتایج در جداول (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) بیان شده‌است. همچنین در ادامه نقشه‌های پهنه‌بندی GIS کیفیت آب بر اساس هر شاخص در اشکال (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده‌است.

Table7. Descriptive equivalent of IRWQIsc index in nine sampling stations (season winter vs. season summer)

Stations	IRWQIsc (winter)	Descriptive class	IRWQIsc (summer)	Descriptive class
S1	71.8	Good	81.7	Good
S2	60.0	Relatively good	49.4	Medium
S3	60.6	Relatively good	47.1	Medium
S4	55.2	Relatively good	44.8	Relatively bad
S5	54.3	Medium	32.8	Relatively bad
S6	51.2	Medium	29.2	Bad
S7	52.1	Medium	24.9	Bad
S8	48.8	Medium	19.8	Bad
S9	53.2	Medium	12.7	Very bad

جدول (۷) نمایانگر کاهش کیفیت آب در تابستان نسبت به فصل زمستان می باشد. در فصل زمستان ۱۰۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای کیفیت متوسط و نسبتاً خوب و خوب می باشند ولی در تابستان حدود ۳۴ درصد در وضعیت متوسط و خوب قرار دارند. همچنین در راستای رودخانه کیفیت آب رودخانه به دلیل ورود انواع آلاینده‌ها از جمله پساب مزارع پرورش ماهی، زه آب باغات و زمین‌های کشاورزی و ... کاهش می یابد و در سطوح متوسط و بد قرار می گیرد و هر چه به دریای خزر نزدیکتر می شود شاهد وضعیت نامناسب رودخانه می باشیم. همچنین در شکل (۴) درجات کیفی رودخانه بر مبنای شاخص IRWQI در نرم افزار GIS تهیه و نمایش داده شده است.

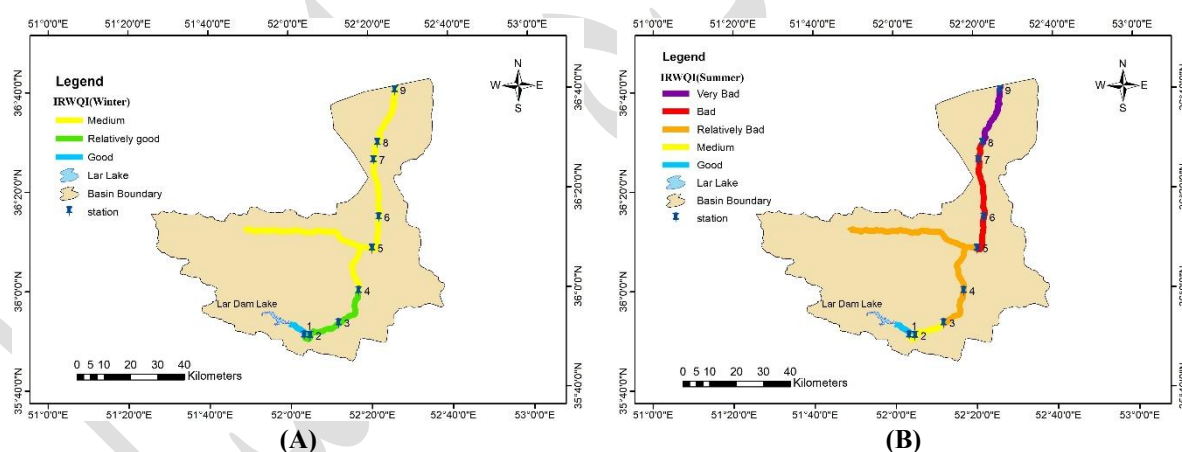


Figure 4. Temporal-Spatial assessment of water quality based on IRWQI index; (A) winter and (B) summer

Table 8. Descriptive equivalent of NSFQWI index in nine sampling stations (season winter vs. season summer)

Stations	NSFWQI(winter)	Descriptive class	NSFWQI(summer)	Descriptive class
S1	77.07	Good	71.07	Good
S2	69.8	Medium	56.48	Medium
S3	69.46	Medium	53.65	Medium
S4	68.37	Medium	49.73	Bad
S5	69.11	Medium	40.96	Bad
S6	56.76	Medium	38.49	Bad
S7	66.54	Medium	35.10	Bad
S8	63.61	Medium	31.37	Bad
S9	62.40	Medium	22.6	Very Bad

در جدول (۸) شاخص NSFQI برای دو فصل آورده شده است و همانند شاخص IRWQI در فصل تابستان وضعیت کیفیت آب، پایتتر از فصل زمستان است. در فصل زمستان ۱۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای کیفیت متوسط و خوب می‌باشد ولی در تابستان حدود ۳۴ درصد در وضعیت متوسط و خوب قرار دارند. همچنین در این شاخص روند کاهش کیفیت در هر دو فصل در امتداد رودخانه دیده می‌شود. همچنین در شکل (۵) درجات کیفی رودخانه بر مبنای شاخص NSFQI در نرم افزار GIS تهیه و نمایش داده شده است.

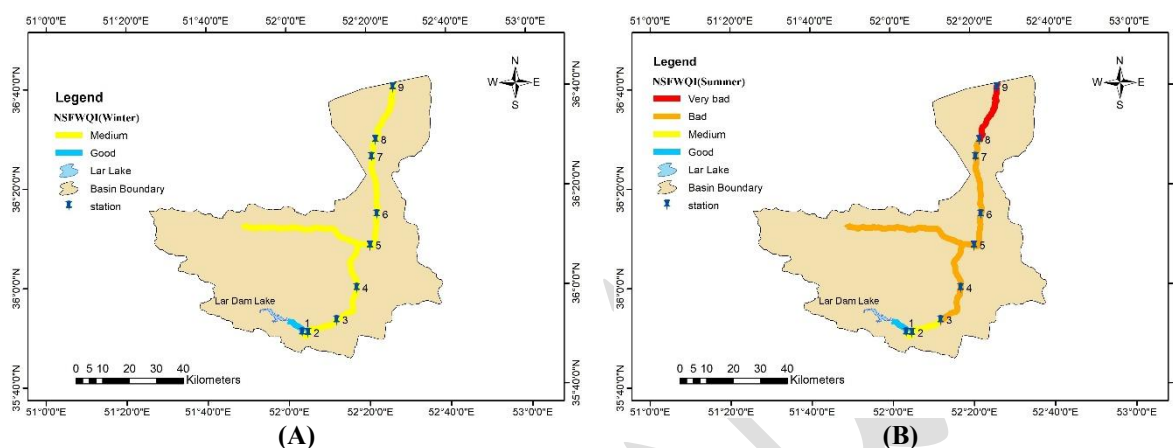


Figure 5. Temporal-Spatial assessment of water quality based on NSFQI index (A) winter and (B) summer

برای محاسبه شاخص CCMEWQI با هدف حفظ بقا آبریزان از استانداردهای کیفیت آب‌های ایران و معاونت توسعه آبی‌پرووری سازمان شیلات استفاده شده است. (Iranian Fisheries Organization, Freshwater Aquatic Office., 2018 ; Iranian Water Quality Standard., 2016) که نتایج به تفکیک فصل زمستان و تابستان در جداول (۹) و (۱۰) آورده شده است. همچنین در شکل (۶) درجات کیفی رودخانه بر مبنای شاخص CCMEWQI در نرم افزار GIS تهیه و نمایش داده شده است.

Table 9. Descriptive equivalent of CCMEWQI index in nine sampling stations (season winter)

Stations	F1(Scope)	F2(Frequency)	F3(Amplitude)	CCMEWQI	Descriptive class
S1	0	0	0	100	Excellent
S2	20	20	25.25	78.11	Fair
S3	20	20	25.48	78.02	Fair
S4	10	10	23.08	84.37	Good
S5	20	20	74.18	54.16	Marginal
S6	30	30	62.02	56.61	Marginal
S7	20	20	84.28	48.67	Marginal
S8	20	20	83.16	49.28	Marginal
S9	20	20	75.18	53.62	Marginal

Table 10. Descriptive equivalent of CCMEWQI index in nine sampling stations (season summer)

Stations	F1(Scope)	F2(Frequency)	F3(Amplitude)	CCMEWQI	Descriptive class
S1	20	20	20.18	79.93	Fair
S2	40	40	71.75	47.24	Marginal
S3	40	40	73.96	46.24	Marginal
S4	50	50	75.74	40.17	Poor
S5	50	50	94.12	32.03	Poor
S6	60	60	93.4	27.14	Poor
S7	60	60	92.96	27.33	Poor
S8	80	80	94.77	14.78	Poor
S9	80	80	95.67	14.45	Poor

در جداول (۹) و (۱۰) شاخص CCMEWQI برای دو فصل آورده شده است در فصل تابستان وضعیت نسبت به زمستان بحرانی تر بوده و بیانگر این است که تخریب محیط زیست و در معرض تهدید قرار گرفتن آبریز در این حوضه آبریز، لزوم به کارگیری رویکردهای مدیریتی سریع، بهینه و کارآمد در بهره برداری از منابع آب، کنترل آب های برگشتی و مدیریت پساب ها را بیش از پیش نمایان می سازد همچنین در شکل (۶) درجات کیفی رودخانه بر مبنای شاخص CCMEWQI در نرم افزار GIS تهیه و نمایش داده شده است.

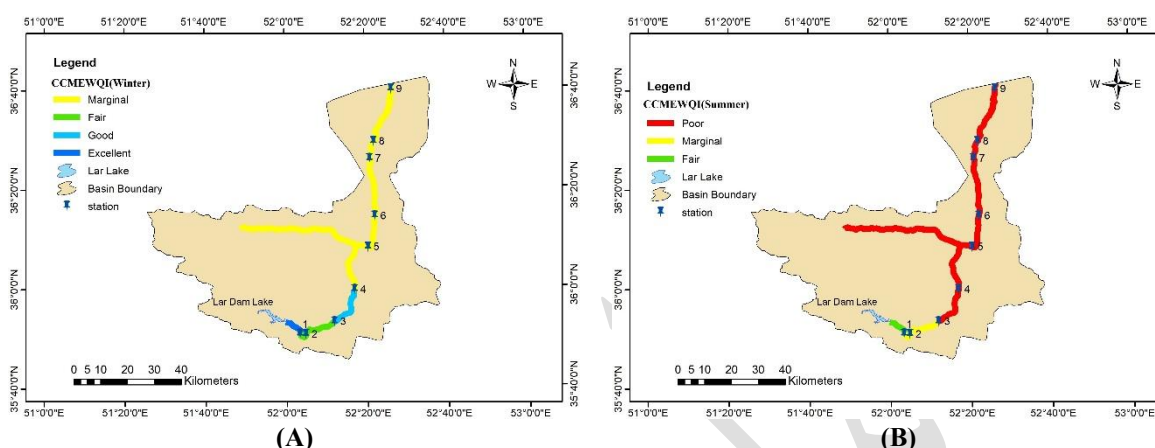


Figure 6. Temporal-Spatial assessment of water quality based on CCMEWQI index (A) winter and (B) summer

۳-۳- نتایج طراحی آزمایش

ابتدا یازده متغیر EC, DO%, COD, BOD, pH, Total hardness, PO43-, N-NO3-, N-NH4+, fecal coliforms, NTU و pH به عنوان متغیرهای مستقل و اثر گذار بر روی متغیر پاسخ (شاخص کیفی آب) در نظر گرفته شدند. متغیرهای مستقل به ترتیب از x1 تا x11 و متغیر وابسته y نامگذاری می شود. مقدار این متغیرها در نه ایستگاه در دو فصل تابستان و زمستان اندازه گیری شد.

آنالیزهای آماری نشان داد که بهترین مدل جهت ایجاد یک همبستگی بین متغیرهای مستقل هم برای فصل تابستان و هم برای فصل زمستان یک رابطه خطی می باشد. طوریکه مقدار p-value برای فصل تابستان و زمستان به ترتیب برابر ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۵ می باشد که نشان دهنده اعتبار و معناداری مدل ها از دیدگاه آماری می باشد. همچنین از رابطه ای که شامل ترم های مربعی باشد به دلیل کم بودن تعداد اندازه گیری ها نمی توان استفاده کرد. زیرا در این حالت Aliasing رخ خواهد داد. واژه Aliasing در طراحی آزمایش به معنای بروز خطا یا اشتباه در تغییرات و نتایج آزمایش است که ممکن است ناشی از نمونه برداری ناکافی یا نادرست از داده ها باشد. Aliasing هنگامی رخ می دهد که اثرات متغیرها در نتایج به طور دقیق شناسایی نشوند و ممکن است با یکدیگر ترکیب شوند یا تأثیر آن ها به دلیل عدم مشاهده مناسب پنهان شود.

ابتدا مقدار کمینه و بیشینه هر یک از متغیرهای مستقل به دست می آید. در ادامه جهت یافتن میزان سهم هر یک از متغیرهای مستقل در پاسخ، ابتدا متغیرهای مستقل با استفاده از رابطه های (۱۲-الف) تا (۱۲-ب) به فرم گد شده تبدیل شدند.

$$\text{Plus}(x_i) = \frac{\max(x_i) + \min(x_i)}{2} \quad \text{رابطه ۱۲-الف}$$

$$\text{Minus}(x_i) = \frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{2} \quad \text{رابطه ۱۲-ب}$$

$$\text{Coded } x_i = \frac{x_i - \text{Plus}(x_i)}{\text{Minus}(x_i)} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

Table11. Values of independent variables coded for summer

x11	x10	x9	x8	x7	x6	x5	x4	x3	x2	x1	Parameters
											Stations
-0.61	-0.71	-0.75	-0.8	-0.86	-0.92	-0.93	-0.91	-0.93	-0.95	-1	S1
-0.38	-0.33	-0.38	-0.42	-0.38	-0.42	-0.78	-1	-0.67	-0.67	0.72	S2
-0.73	-0.79	-0.88	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98	-0.99	-0.99	-1	-1	S3
0.26	-0.01	-0.09	-0.15	-0.19	-0.16	-0.43	-0.69	-0.97	-0.99	-1	S4
0.36	0.33	0.21	0.27	0.27	0.45	0.3	0.18	-1	-0.95	-0.97	S5
0.79	0.93	0.31	-0.49	-0.45	-0.78	-0.69	-0.91	-1	-0.9	-0.99	S6
0	-0.5	-0.5	1	0	0.5	0.25	0.75	-1	0.75	0.5	S7
-0.64	-0.67	-0.7	-0.75	-0.81	-0.83	-0.88	-0.88	-0.91	-0.98	-1	S8
-0.54	-0.48	-0.39	-0.21	-0.12	0.11	0.62	0.83	0.78	1	0.89	S9

Table12. Values of independent variables coded for winter

x11	x10	x9	x8	x7	x6	x5	x4	x3	x2	x1	Parameters
											Stations
-1	-0.94	-0.64	-0.94	1	-0.94	-0.94	-1	-0.94	-1	-1	S1
-0.53	-0.35	-0.57	-0.37	-0.48	-0.6	-1	-0.87	-0.45	1	0.5	S2
-0.98	-0.81	1	-1	-0.98	-0.81	-0.98	-0.98	-0.96	-1	-1	S3
-0.52	-0.77	-1	-0.47	-1	1	-1	-1	-1	-0.52	-1	S4
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	S5
-0.42	-0.15	-0.42	-0.13	-0.3	-0.48	-0.92	-1	-0.88	1	-0.88	S6
0.69	0.68	0.62	0.74	0.74	0.71	1	0.95	0.79	-1	0.84	S7
-1	-1	-0.73	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	S8
0.24	0.21	0.44	0.13	0.17	-0.03	-0.8	-1	-0.55	-0.68	-0.71	S9

رابطه ریاضی خطی که بین متغیرهای مستقل و وابسته به صورت زیر بیان می‌شود:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8 + a_9x_9 + a_{10}x_{10} + a_{11}x_{11} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

با استفاده از رابطه شماره ۱۴ مقدار ضرایب همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته به دست می‌آید:

$$Coeff = [X'X][X'Y]^{-1} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

بعد از اینکه مقدار ضرایب به دست می‌آید می‌توان مقدار سهم هر پارامتر را بر روی پاسخ به صورت درصدی از رابطه ۱۵ به دست آورد:

$$\text{Percent} = \frac{a_i}{\sum_j a_j} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۵}$$

لازم به ذکر است پیرامون موضوع برازش مدل خطی با ۱۱ متغیر و ۱۲ پارامتر بر داده‌های ۹ نقطه از نظر ریاضی به نظر می‌رسد که بیش‌برازش ایجاد نماید. جهت ارزیابی این موضوع از پارامتر Predicted R² استفاده می‌شود. به طوریکه ابتدا نقطه $\hat{i}$ از داده‌ها حذف می‌شود و مدل با داده‌های باقیمانده به دست می‌آید و سپس داده‌ای که حذف شده بود توسط مدل پیش‌بینی می‌گردد. این کار برای تمامی نقاط تکرار می‌گردد و مقدار Predicted R² محاسبه می‌گردد. اگر این مقدار به عدد ۱ نزدیک باشد نشان دهنده این است که بیش‌برازش رخ نداده است. مقدار Predicted R² به ترتیب برای فصل تابستان و زمستان به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۰/۸۴ به دست آمد که توانایی مدل را در پیش‌بینی نتایج را نشان می‌دهد.

با استفاده از روش سطح پاسخ درصد مشارکت هر یک از ۱۱ پارامتر در مقدار شاخص کیفیت آب رودخانه (IRWQIsc) در فصل تابستان و زمستان به ترتیب در جداول (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است.

Table 13. Parameter contribution percentages to quality index during summer

Parameters	Participation Percentage
N - NO ₃ ⁻	28.09
PO ₄ ³⁻	20.96
DO%	17.14
N - NH ₄ ⁺	16.87
COD	8.07
BOD	2.67
Turbidity	2.31
pH	1.56
Total Hardness	1.43
EC	0.57
fecal coliforms	0.29

Table 14. Parameter contribution percentages to quality index during winter

Parameters	Participation Percentage
BOD	38.52
COD	25.47
Total Hardness	10.18
pH	7.46
Turbidity	5.15
fecal coliforms	5.03
DO%	2.82
N - NH ₄ ⁺	2.73
N - NO ₃ ⁻	1.32
PO ₄ ³⁻	0.73
EC	0.52

همچنین این نتایج به صورت نمودار دایره‌ای دو سمتی و نمودار دایره‌ای برای فصل تابستان و زمستان به ترتیب در اشکال (۷) و (۸) نشان داده شده است.

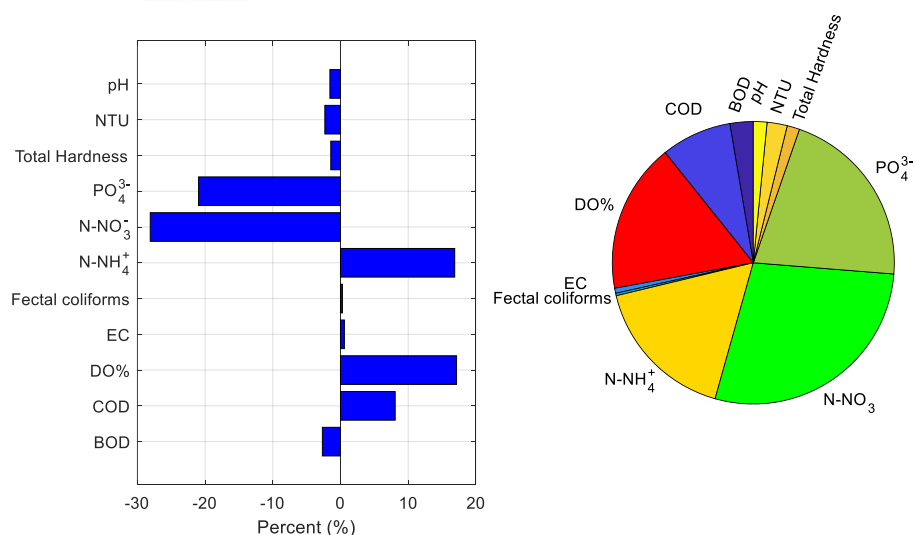


Figure 7. Parameter contributions to the water quality index during summer

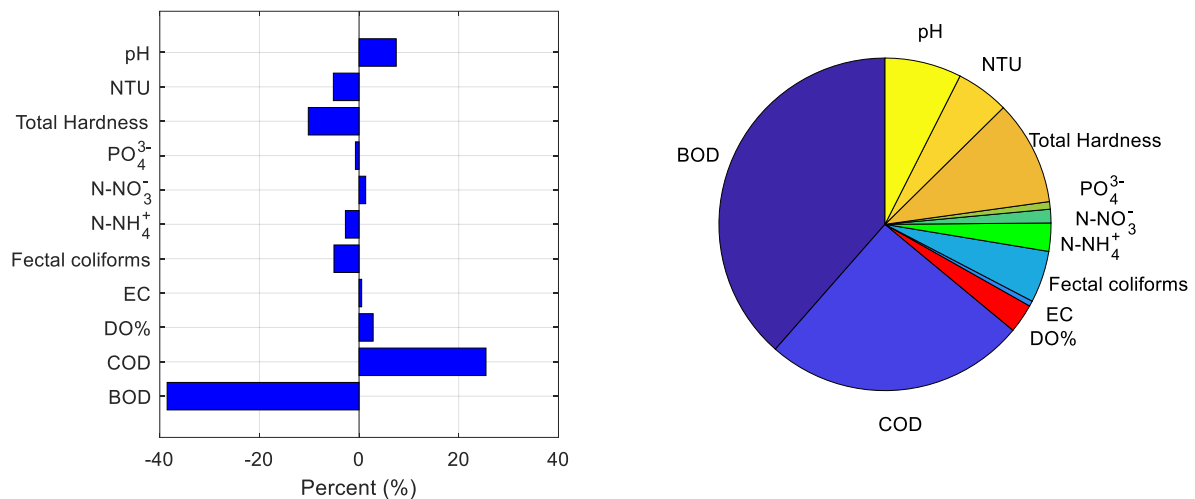


Figure 8. Parameter contributions to the water quality index during winter

جهت ارزیابی تطابق مدل با داده‌های آزمایشگاهی از ضریب تعیین (R^2) استفاده می‌گردد که توسط رابطه (۱۶) بیان شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{(y_{exp,i} - y_{model,i})^2}{(y_{exp,i} - \bar{y}_{exp})^2} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

که در رابطه (۱۶)، مقدار $y_{exp,i}$ ، $y_{model,i}$ و $\bar{y}_{exp}$ به ترتیب نشان دهنده پاسخ تجربی، پاسخ به دست آمده از مدل و متوسط پاسخ آزمایشگاهی می‌باشد. مقدار ضریب تعیین برای فصل‌های تابستان و زمستان به ترتیب برابر است با ۰/۹۹۷۸ و ۰/۹۹۹۰ می‌باشد. همچنین شکل (۹) به ترتیب مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده بر حسب مقدار اندازه‌گیری شده را برای فصل‌های تابستان و زمستان نشان می‌دهد.

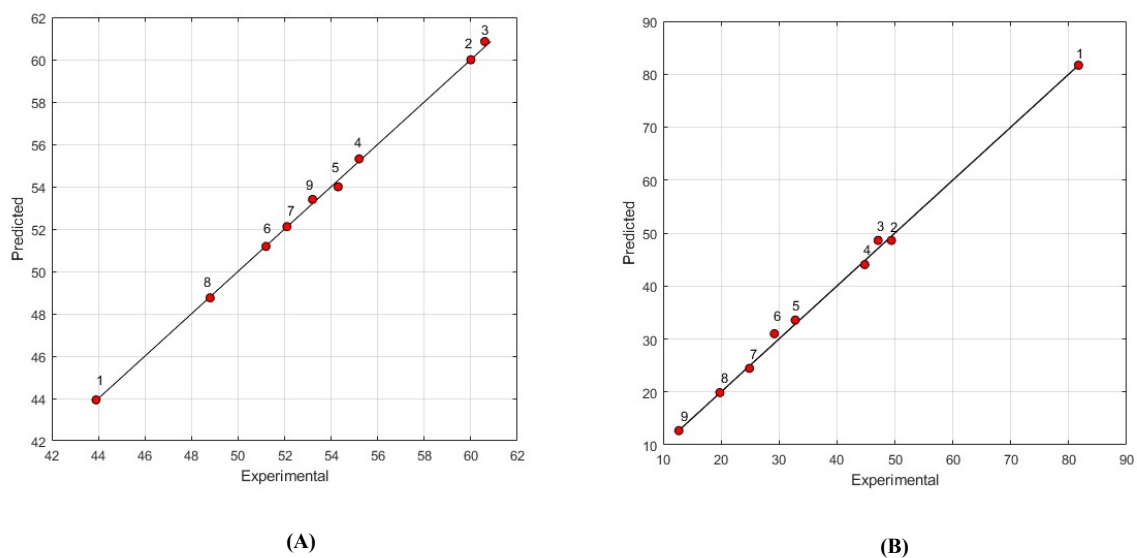


Figure 9. Predicted response values versus measured values, (A) winter and (B) summer

معادلات حاصله از نرم افزار متلب به روش سطح پاسخ بر اساس پارامترهای کیفی به تفکیک برای فصل تابستان و زمستان در روابط (۱۷) و (۱۸) ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \text{IRWQIsc} = & 71.7 - 0.1\text{BOD} + 0.16\text{COD} + 0.4\text{DO} + 0.002\text{EC} + 0.00006\text{Fecal coliform} \\ & + 18.32\text{NH}_4^+ - 1.52\text{NO}_3^- - 15.31\text{PO}_4^{3-} - 0.01\text{Total hardness} \\ & - 0.002\text{NTU} - 3.13\text{pH} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$\begin{aligned} \text{IRWQIsc} = & 38.23 - 2.58\text{BOD} + 0.77\text{COD} + 0.1\text{DO} + 0.0008\text{EC} - 0.001\text{Fecal coliform} \\ & - 3.48\text{NH}_4^+ + 0.166\text{NO}_3^- - 73.53\text{PO}_4^{3-} - 0.046\text{Total hardness} \\ & - 0.01\text{NTU} + 3.11\text{pH} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در ادامه قابل ذکر است که با توجه به مدل‌های ارائه شده برای هر فصل، می‌توان با استفاده از متغیرهای کیفی که سهم بیشتری در متغیر کیفیت آب دارد که قبلاً در جداول (۱۳) و (۱۴) ارائه شده بود به نتایج نسبتاً قابل قبولی دست پیدا کرد. همچنین این راهکار کمک می‌کند تا با تعداد آزمایشات کمتر (به تناسب صرف زمان و هزینه کمتر) به نتایج خوبی رسید.

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی این مطالعه، توسعه یک روش بهبود یافته WQI برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه بود. در ابتدای امر روند تغییرات پارامترها فیزیکوشیمیایی در ایستگاه‌های مورد آزمایش بررسی گردید و نتایج حاکی از آن بود که هر چه به سمت دریای خزر پیش می‌رویم مقدار پارامترها بحرانی تر می‌شود. سپس با استفاده از سه شاخص کیفی IRWQIsc ، NSFWQI و CCMEWQI ارزیابی کیفیت آب رودخانه انجام شد. نتایج بیانگر آن بود که کاهش کیفیت آب در تابستان نسبت به فصل زمستان شدیدتر می‌باشد در فصل زمستان ۱۰۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای کیفیت متوسط، نسبتاً خوب و خوب می‌باشد ولی در تابستان حدود ۳۴ درصد در وضعیت متوسط و خوب قرار دارند. همچنین در راستای رودخانه وضعیت کیفیت آب به دلیل ورود انواع آلاینده‌ها از جمله پساب مزارع پرورش ماهی، زه آب باغات و زمین‌های کشاورزی، معادن شن و ماسه و ... کاهش می‌یابد و در سطوح متوسط و بد قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است با توجه به تمرکز قرارگیری مزارع پرورش ماهی حدفصل ایستگاه‌های دو تا چهار و معادن شن و ماسه حدفصل ایستگاه‌های چهار تا هفت باعث ایجاد کدورت و آلاینده‌گی هر چه بیشتر این مسیر می‌گردد.

وضعیت کیفیت آب بر اساس شاخص NSFWQI در فصل تابستان پایینتر از فصل زمستان است. در فصل زمستان ۱۰۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای کیفیت متوسط و خوب می‌باشد ولی در فصل تابستان حدود ۳۴ درصد در وضعیت متوسط و خوب قرار دارند. همچنین بر مبنای این شاخص در امتداد رودخانه شاهد روند کاهش کیفیت آب در هر دو فصل می‌باشیم.

در ادامه از منظر شاخص CCMEWQI که محاسبات با هدف حفظ بقا آبریان انجام شده بود از ایستگاه یک تا چهار وضعیت نسبتاً مناسبی می‌باشد که مصداق درستی این نتیجه گیری، تمرکز جمعی سایت‌های پرورش ماهی در حاشیه رودخانه می‌باشد ولی حدفصل ایستگاه‌های پنج تا نه وضعیت نسبتاً متوسط و ضعیف برای بقای آبریان رودخانه بوده و همچنین مقدار پارامترهای BOD و DO در فصل تابستان در این محدوده از حداقل مجاز کوچکتر می‌باشد.

با توجه به ارائه نتایج سه شاخص مذکور، نتایج شاخص ایران و سازمان بهداشت جهانی در حد بالایی همپوشانی دارند ضمن اینکه شاخص IRWQIsc که با توجه به شرایط محیطی کشور ایران ابداع شده است و به عنوان شاخص ملی نسبت به دو شاخص دیگر از پارامترهای بیشتری (۱۱ پارامتر) استفاده گردیده است و ملاحظات سختگیرانه تری در نظر می‌گیرد، نسبت به دیگر شاخص‌ها ارجح می‌باشد. ولی در صورت فقدان پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص IRWQIsc می‌توان از شاخص NSFWQI به دلیل همپوشانی بالای نتایج استفاده گردد.

در ادامه به عنوان یک روش بهبود یافته برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه از یکی از روش‌های DOE که RSM نام دارد برای تعیین پارامترهای تاثیرگذار استفاده شد و به ترتیب برای فصل تابستان پارامترهای نیترات، فسفات، اکسیژن محلول، آمونیوم، COD و BOD

مجموعاً حائز ۹۴ درصد وزنی اثرگذاری در میزان متغیر پاسخ (کیفیت آب) می‌باشد و برای فصل زمستان پارامترهای BOD، COD، سختی کل، pH، کدورت، کلیفرم مدفوعی و اکسیژن محلول مجموعاً حدود ۹۴ درصد وزنی اثرگذاری در میزان متغیر پاسخ (کیفیت آب) را دارا می‌باشند. در ادامه برای هر فصل به تفکیک روابط خطی ارائه گردید که می‌توان با اعمال پارامترهای با وزن بیشتر به نزدیکترین پاسخ برای کیفیت آب دست پیدا کرد. که دارای ضریب همبستگی ۰/۹۹۷۸ برای فصل تابستان و ۰/۹۹۹۰ برای فصل زمستان می‌باشد. با این حال، این محدودیت را باید در نظر داشت که مطالعه حاضر به دلیل هزینه‌های سنگین نمونه‌برداری در طول رودخانه و همچنین آزمایشات آزمایشگاهی، از داده‌های پایش یک سال استفاده کرده‌است و ضروری است که شاخص‌ها با تامین هزینه‌های آزمایشات برای تحلیل‌های چند ساله مورد بررسی قرار گیرند.

۵- تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی و سازمان حفاظت محیط زیست کشور برای همکاری در انجام این تحقیق کمال تشکر ابراز می‌گردد.

۷- پی نوشت

1. Water Quality Indices
2. Principle Component Analysis
3. National Sanitation Foundation Water Quality Index
4. Canadian Council of Ministers of Environment Water Quality Index
5. Canadian Water Quality Guidelines
6. Response Surface Methodology
7. Iran Water Quality Index
8. Weighted Arithmetic Water Quality Index
9. Design Of Experiment
10. One Factor at a Time

۸- منابع

- Aazami, J., Kiani Mehr, N., Zamani, A., Abdolahi, Z., Zarein, M., & Jafari, N. (2019). Water Quality Assessment of Ghezeloan River in Zanjan Province Using NSFQI, IRWQI and Liou. *Journal of Environmental Health Engineering*, 6(4), 385-400. (In Persian).
- Aghajanloo, K., Hajizadeh, E., & Ariaeizadeh, S. (2022). Evaluation of karun river water quality based on IRWQI and WAWQI indicators in molasani and ahvaz stations. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 367-380. (In Persian).
- Antony, J. (2023). *Design of experiments for engineers and scientists (3rd ed.)*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Ltd.
- Athari, M. A., & Motiee, H. (2025). Multi-criteria analysis using AHP and GIS for identifying the most polluted sub-basin in a river basin environment. *International Journal of River Basin Management*, 23(4), 1-15.
- Bagheri, h., Mazlomi Mochani, M., Khalili, R., & Moridi, A. (2024). Seasonal changes in the water quality of Sardab river: dual perspectives of the Iran Water Quality Index for Surface Water Resources – Conventional Parameters (IRWQIsc) and the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). *Water and Irrigation Management*, 14(1), 223-234. (In Persian).
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and Sewage Works*, 117(10), 339-343.
- Calmuc, M., Calmuc, V., Arseni, M., Topa, C., Timofti, M., Georgescu, L. P., & Iticescu, C. (2020). A Comparative Approach to a Series of Physico-Chemical Quality Indices Used in Assessing Water Quality in the Lower Danube. *Water*, 12(11), Article 3239.
- CCME. (2017). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life, CCME Water Quality Index, User's Manual – 2017 Update*. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Davoudi Moghaddam, D., Haghizadeh, A., Tahmasebipour, N., & Zeinivand, H. (2021). Spatial and Temporal Water Quality Analysis of a Semi-Arid River for Drinking and Irrigation Purposes Using Water Quality Indices and GIS. *ECOPERSIA*, 9(2), 79-93.
- Environmental Protection Organization, Water and Soil Office. (2016). *Iranian Water Quality Standard*. Retrieved from <https://www.doc.ir/portal/file/?692324/standard-mosavab-ver-1395.docx>. (In Persian).
- Fallah Sourki, M., Kavian, A., & Omidvar, E. (2016). Prioritization of Haraz sub-watersheds in order to Soil and Water

- Conservation Practices Based on Morphometric and Land Use Characteristics . *Journal of Water and Soil Science*, 20(77), 85-99.(In Persian).
- Fatih Ali, S., Hamud Hays, H., & Abdul-Jabar, R. A. (2021). Application of CCME water quality index for drinking purpose in Tigris River within Wasit Province, Iraq. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(5), 781-787 .
- Gaytán-Alarcón, A. P., González-Elizondo, M. S., Sánchez-Ortíz, E., & Alarcón-Herrera, M. T. (2022). Comparative assessment of water quality indices—a case study to evaluate water quality for drinking water supply and irrigation in Northern Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), Article 588 .
- Ghadami, F., Valian, M., Atoof, F., Dawi, E. A., Miranzadeh, M. B., Mahdi, M. A., & Salavati-Niasari, M. (2024). Response surface methodology for optimization of operational parameters to remove tetracycline from contaminated water by new magnetic $\text{Ho}_2\text{MoO}_6/\text{Fe}_2\text{O}_3$ nano adsorbent. *Results in Engineering*, 21(1), Article 101746.
- Hashemi, S.H., Poor asghar, F., Nasr abadi, T., Ramezani, S., & Khoshroo, Gh. (2011). Guide to calculating the quality index of Iranian water resources. Shahid Beheshti University, Environmental Sciences Research Institute. (In Persian).
- Iranian Fisheries Organization, Freshwater Aquatic Office. (2018). Technical regulations and guidelines for issuing licenses for rainbow trout breeding farms. (pp.15). (In Persian).
- Ismail, A. H., & Robescu, D. (2019). Assessment of water quality of the danube river using water quality indices technique. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(8), 1727-1737 .
- Kazemi, P., Shariati, F., & Keshavars Shokri, A. (2018). Langroud River water quality assessment using NSFQI qualitative indicators. *Environmental Sciences*, 16(3), 65-78. (In Persian).
- Khosravi, K., Pham, B. T., Chapi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Revhaug, I., Prakash, I., & Tien Bui, D. (2018). A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran. *Science of The Total Environment*, 627(13), 744-755 .
- Kumar, A., Matta, G., & Bhatnagar, S. (2021). A coherent approach of Water Quality Indices and Multivariate Statistical Models to estimate the water quality and pollution source apportionment of River Ganga System in Himalayan region, Uttarakhand, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 42837-42852 .
- Lee, B. C. Y., Mahtab, M. S., Neo, T. H., Farooqi, I. H., & Khursheed, A. (2022). A comprehensive review of Design of experiment (DOE) for water and wastewater treatment application - Key concepts, methodology and contextualized application. *Journal of Water Process Engineering*, 47(3), Article 102673.
- Mahagamage, M., & Manage, P. M. (2014). Water quality index (CCME-WQI) based assessment study of water quality in Kelani river basin, Sri Lanka. In: *Proceeding of 1st Environment and natural resources International conference*, 6-7 november, The Sukosol hotel, Bangkok, Thailand, 199-204 .
- Mahdavy, M. (2009). *Applied Hydrology* (6th ed., Vol. 2). University of Tehran.
- 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).
- Ministry of Energy Deputy of Water Affairs. (2012). *Guide Lines and Criteria for Classification and Coding Basin and Study Areas in IRAN, No.310*. (In Persian).
- Ministry of Energy Deputy of Water Affairs. (2020). *Review of some water resources quality indices No.196*. (In Persian).
- Mohseni Bandpei, A., & Yousefi, Z. (2013). Status of Water Quality Parameters along Haraz River. *International Journal of Environmental Research*, 7(4), 1029-1038.
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). John Wiley & Sons inc.
- Parween, S., Siddique, N. A., Diganta, M. T. M., Olbert, A. I., & Uddin, M. G. (2022). Assessment of urban river water quality using modified NSF water quality index model at Siliguri city, West Bengal, India. *Environmental and Sustainability Indicators*, 16(4), Article 100202 .
- Rachiq, T., Samghouli, N., Mabrouki, J., El-Moustaqim, K., Rahmani, M., Al-Jadabi, N., El Hajjaji, S., & Rahal, S. (2022). Study and modeling of dairy effluents treatment using design of experiments methodology. *Desalination and Water Treatment*, 261(17), 131-140.
- Salvati, A., Nia, A. M., Salajegheh, A., Ghaderi, K., Asl, D. T., Al-Ansari, N., Solaimani, F., & Clague, J. J. (2023). Flood susceptibility mapping using support vector regression and hyper-parameter optimization. *Journal of Flood Risk Management*, 16(4), e12920.
- Singh, G., Patel, N., Jindal, T., Srivastava, P., & Bhowmik, A. (2020). Assessment of spatial and temporal variations in water quality by the application of multivariate statistical methods in the Kali River, Uttar Pradesh, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6), Article 394 .
- Weissman, S. A., & Anderson, N. G. (2015). Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. *Organic Process Research & Development*, 19(11), 1605-1633.
- World Health Organization. (2004). *World report on knowledge for better health : strengthening health systems*. Geneva: World Health Organization. Retrieved from the Library of Congress, <https://www.loc.gov/item/2021763193/>. W. H. Organization .
- Zare Garizi, A., Shahedi, K., & Matboo, A. (2024). Evaluation of Surface Water Quality of the Gorganrood River Basin for Different Uses with Canadian (CCME) Water Quality Index Approach . *Journal of Water and Soil Science*, 28(1), 127-143 . (In Persian).