تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۵، زمستان ۱۴۰۲
Volume 19, No. 5, Winter 2024 (IR-WRR)
۹۹-۱۱۳

نمونه‌برداری و بررسی متغیرهای کیفیت آب رودخانه ارس در پایین‌دست و بالادست سد ارس

محمدتقی ستاری[۱]، محمد بابایی[۲]، هوشنگ غلامی[۳]، محمد پیرحیاتی[۳]، فریبرز معصومی[۴] و محمد مسافری[۵*]

چکیده

ماحصل ورود انواع ترکیبات شیمیایی معدنی و آلی به مخازن سدها، افت کیفیت آب و مشکلات بعدی ناشی از آن است. در چنین شرایطی توجه به پایش کیفی و حفاظت از منابع آب سطحی از اصول توسعه پایدار منابع آب هر کشور است. هدف مطالعه حاضر ارزیابی تغییرات کیفی آب سد ارس در دو ایستگاه ورودی و خروجی به مخزن سد طی دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ است. در این مطالعه طی هشت مرحله ۱۶ نمونه آب از ورودی و خروجی برداشت شد و پارامترهای کیفی آب مورد واکاوی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که سد ارس به عنوان یک واحد ته‌نشینی عمل می‌کند. طبق نتایج بیشترین مقدار مجموع کلیفرم، BOD_5، نیترات و فلزات سنگین از جمله سرب، آرسنیک و کادمیوم به ترتیب معادل (MPN/100ml) ۱۸۰۰۰، ۹، ۰/۰۰۸، ۰/۰۳ و ۰/۰۱ میلی‌گرم بر لیتر و متوسط میزان EC در ورودی و خروجی سد به ترتیب معادل ۱۲۷۹/۳ و ۱۳۹۶/۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. افزایش EC می‌تواند ناشی از تأثیر تبخیر و نیز ورود جریان‌های آلوده کننده باشد. به منظور ارزیابی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خوردگی از شاخص‌های LSI و RSI استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که رسوب‌گذاری پدیده غالب در این سد است. در نهایت از شاخص $IRWQI_{SC}$ برای تعیین وضعیت کیفیت آب سد ارس استفاده شد که طبق شاخص مذکور وضعیت کیفیت آب این سد در طبقه متوسط تا نسبتاً بد قرار دارد.

کلمات کلیدی: آلودگی آب، WQI، رسوب‌گذاری، مخزن سد، شمال‌غرب ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۹/۱۵

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- کارشناس دفتر رودخانه‌های مرزی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران.
۴- دانشیار، گروه آموزشی مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۵- استاد، مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.

Sampling and Evaluating the Water Quality Variables in Aras River Downstream and Upstream of Aras Dam

M.T. Sattari[1] , M. Babaei[2], H. Golami[3], M. Pirhayati[3],F. Masoumi[4], and M. Mosaferi[5]*

Abstract

Various mineral and chemical compounds entering into the reservoirs of the dams result in the consumption of dissolved oxygen in the water, which leads to the creation of numerous environmental problems. The aim of the present study is to evaluate the water quality changes in Aras dam reservoir in two stations representing the reservoir inlet and outlet during the study period of water year 1400-1401 (Iranian calendar). In this study, 16 water samples were taken from the inlet and outlet during eight stages and the quality parameters of the water were analyzed. The results indicated that Aras Dam acts as a sedimentation unit. According to the results, the maximum total amount of coliform, BOD5, nitrate and heavy metals including lead, arsenic and cadmium is 18000 (MPN/100ml), 9, 0.008, 0.03 and 0.01 mg/liter, respectively. Also, the average amount of EC at the inlet and outlet of the dam was estimated as 1279.3 and 1396.4 µs/cm, respectively. The increase in EC can be caused by the effect of evaporation as well as the entry of polluting currents. LSI and RSI indexes were used to evaluate the tendency of water for scaling and corrosion. According to the obtained results, scaling is the dominant phenomenon for the reservoir water. Finally, the $IRWQI_{SC}$ index was used to determine the water quality status in Aras Dam reservoir. According to this index, the water quality status in this reservoir lies in the category of medium to relatively bad.

Keywords: Water Pollution, WQI, Deposit, Dam Reservoir, Northwest Iran.

Received: July 11, 2023
Accepted: December 6, 2023

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3- Expert, Border Rivers Office, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran.
4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
5- Professor, Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran. Email: mosaferim@tbzmed.ac.ir
*- Corresponding Author
Doi: 10.22034/IWRR.2024.184659

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر یکی از مهمترین دغدغه‌ها به‌خصوص در کشورهای واقع در مناطق خشک از جمله ایران مسئله آب است که از نظر کمی و کیفی نیاز آن‌ها را تأمین نمی‌سازد. همچنین، با افزایش آگاهی‌ها و حساسیت‌های عمومی در مورد محیط زیست مانند حفظ کیفیت آب و بحث توسعه پایدار در زمینه منابع آبی که به نگاه همه جانبه به احداث سدها و فواید و ضررهای آن تأکید دارد، به نظر می‌رسد که باید موازنه‌ای بین اهداف قبلی و شرایط زیست‌محیطی برقرار کرد. لذا نگرش جامع به کیفیت آب در کنار کمیت آن امری اجتناب‌ناپذیر است. طبق بررسی مطالعات انجام شده، یکی از مهمترین عوامل مؤثر در برنامه‌ریزی‌های کارآمد بهره‌برداری از منابع آب سطحی چه در مقیاس زمانی بلندمدت و چه در مقیاس کوتاه مدت، اندازه‌گیری و برآورد قابل اطمینان از مقادیر آلاینده‌های موجود در پیکره‌های آبی است (Vogel et al., 1995; Poonam et al., 2013; Uddin et al., 2021). بنابراین، آگاهی از چگونگی تغییرات پارامترهای کیفی آب در دوره‌های مختلف سال و در سطوح بالاتر در سال‌های مختلف از لحاظ وضعیت آبدهی رودخانه، می‌تواند کمک مؤثری در مدیریت علمی و عملی کیفی آب نماید (Lumb et al., 2011; Banda and Kumarasamy, 2020; Uddin et al., 2023). مطابق با بررسی مطالعات انجام شده شواهد حاکی از این امر است که پایش و بررسی آلودگی‌ها در پیکره‌های آبی، کمّی‌سازی تأثیر آن‌ها و همچنین شناخت این سامانه‌ها به منظور مقابله با آلودگی‌ها ضروری است که گامی مثبت در جهت ارتقاء کیفیت منابع آبی است (Sirunda et al., 2022). مطالعات متعددی در زمینه پایش، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی منابع آب سطحی صورت پذیرفته است که در ادامه که به چند نمونه از این مطالعات اشاره می‌شود.

به منظور پایش کیفی آب رودخانه‌های آمازونی موروکوپی و آراپیرانگا در منطقه پاروا در برزیل از شاخص WQI[1] بر اساس ۹ متغیر استفاده شده است. بر اساس WQI کیفیت آب رودخانه آراپیرانگا در رده خوب و رودخانه موروکوپی در رده خوب تا بد بوده است. نتایج حاکی از آن بوده که تأثیرات انسان‌زاد بر روی رودخانه موروکوپی بیشتر بوده که عمدتاً ناشی از پسماندهای خانگی شهری و پسماندهای صنعتی در بالادست این رودخانه است. اما رودخانه آراپیرانگا به دلیل دور بودن از مناطق شهری و صنعتی دارای آلودگی نبود (Medeiros et al., 2017). همچنین، چندین تکنیک از جمله شاخص کیفیت آب CCME-WQI[2]، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی PCA[3] و تجزیه و تحلیل عاملی FA[4]، خوشه‌بندی K-means، و تحلیل حداقل مربعات معمولی OLS[5] برای انجام یک ارزیابی جامع از کیفیت آب در سد بنی‌هارون به‌کار گرفته شد. مقادیر متوسط شاخص‌های CCME در این سد به ترتیب برای مصارف شرب، آبیاری، صنعت و آبزیان ۱۷، ۴۰، ۴۲ و ۳۲ بود که بر اساس طرح طبقه‌بندی CCME نشان‌دهنده کیفیت پایین آب است. در نهایت، تجزیه و تحلیل OLS، همراه با آزمون Mann-Kendall، روند مثبت کیفیت آب سد بنی‌هارون را برجسته کرد (Soltani et al., 2020). در مطالعه دیگر با هدف ارزیابی تغییرات مکانی و فصلی کیفیت آب سطحی در مخزن سد پالدانگ، واقع در حوضه رودخانه هان در کره جنوبی از تکنیک‌های MSTs[6] همراه با شاخص TSI[7] و شاخص TSID[8] استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که بسیاری از پارامترها (به جز pH، DO[9] و TCB[10]) تغییرات مکانی معنی‌داری را نشان دادند که نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی است (Mamun et al., 2021).

به منظور تجزیه و تحلیل خصوصیات هیدروشیمیایی و عوامل کنترل کننده آن‌ها در رودخانه فن در چین از نمونه‌های آب سطحی و زیرزمینی در دو فصل تر و خشک مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌های اولیه تیپ کلی آب در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ به ترتیب سدیم- بی‌کربناته و کلسیم- بی‌کربناته نشان داد که غلظت کلسیم و بی کربنات در طول جهت جریان کاهش یافته، در حالی که غلظت یون‌های دیگر افزایش یافته است. همچنین املاح محلول به طور عمده از هوازدگی سنگ‌ها ناشی شده‌اند که انحلال و تبخیر ۳۸-۴۳ درصد، هوازدگی سیلیکات ۷-۳۴ درصد و هوازدگی کربنات ۱۷-۴۴ درصد سهم داشتند (Hua et al., 2020). همچنین، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی (pH، دما، کدورت، ORP[11]، EC[12]، نمک‌ها، سختی کل، قلیایی کل، کربنات‌ها، کلریدها، کلسیم، منیزیم، کلیفرم کل و مدفوع) با هدف تعیین کیفیت آب مخزن سد راول پاکستان نشان داد که علیرغم اینکه اکثر پارامترهای بالادست تا سد اصلی فراتر از استانداردها بوده است، اما اکثر پارامترهای نمونه سد و تمامی پارامترهای نمونه آب در محدوده مجاز ارائه شده توسط WHO[13] و PAK-EPA[14] بوده است (Shoukat et al., 2022).

به طور کلی شناسایی ویژگی‌های مختلف آب از جهت مسائل آلودگی و دامنه کیفیت آن حائز اهمیت زیادی است؛ زیرا احتمال انتقال عناصر مختلف از طریق آب و قرار گرفتن انسان در معرض آلودگی وجود دارد از طرفی برخی ترکیبات آلاینده پس از راه یافتن به منابع آب سطحی به‌خصوص مخازن و سدها، وارد بدن انسان شده و آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Ji et al., 2020). بنابراین ضروری است در اتخاذ تصمیمات و برنامه‌ریزی‌ها، کیفیت آب مورد استفاده ارزیابی شده و

حدود مجاز عناصر آلاینده در شرایط مختلف منظور شود. کمبود آب در مناطق خشک و نیمه خشک از یک طرف و استفاده نادرست و بی‌رویه از منابع آب و خاک و آلودگی آن‌ها از طرف دیگر تهدیدی جدی برای حفاظت محیط زیست و توسعه پایدار به شمار می‌رود. بطوری‌که عدم توجه به بهره‌برداری و مدیریت مناسب می‌تواند مخاطرات اساسی در سلامت و رفاه انسان، امنیت غذایی، توسعه صنعتی و محیط‌زیست به وجود آورد. طرح‌های توسعه و مدیریت منابع آب مثل بهره‌برداری از سدهای کشور با توجه به تأثیرپذیری از عوامل مختلفی همچون تغییر اقلیم، آلودگی فعالیت‌های غیرمجاز انسانی و مسائل زیست‌محیطی و رقابت بین مصرف‌کنندگان از پیچیدگی زیادی برخوردار بوده و بدون پشتوانه مطالعاتی کمی و کیفی و بررسی‌های فنی و علمی مطلوب نه تنها اقتصادی نبوده، بلکه توسعه پایدار را نیز تضمین نمی‌کند (Boelee et al., 2019).

بررسی و مرور مطالعات انجام شده بیانگر این است که شاخص‌های مهم کیفیت آب با استفاده از تکنیک‌های مختلف مانند آنالیز مؤلفه‌های اصلی (Chakravarty and Gupta, 2021; Fadel et al., 2021; Khan et al., 2022)، تکنیک‌های همبستگی (Saingam, 2020; Tampo et al., 2021)، نظرات متخصص (Medeiros et al., 2017; Sutadian et al., 2018)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Juwana et al., 2020)، در دسترس بودن داده‌ها (Sutadian et al., 2017) و غیره برآورد می‌شوند.

هدف از این مطالعه ارزیابی کیفیت آب سد ارس در دو ایستگاه ورودی و خروجی به مخزن سد می‌باشد. به‌طور کلی در این مطالعه ۱۶ نمونه آب از دو ایستگاه ورودی و خروجی طی هشت مرحله در دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ برداشت شد و برای سنجش طیف زیادی از پارامترهای کیفی آب مثل EC، $HCO3^-$، SO4، CL، K، Na، Mg، Ca، Fe، TDS[15]، pH، NO_3، NO_2، DO، BOD[16]، COD[17] مورد واکاوی قرار گرفت. همچنین، به منظور ارزیابی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خوردگی از شاخص‌های LSI[18] و RSI[19] استفاده می‌شود. در نهایت از شاخص $IRWQI_{SC}$[20] برای تعیین وضعیت کیفیت سد ارس استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

مخزن سد پلدشت (سد ارس) مخزنی به طول حدوداً ۲۷ کیلومتر با عرض ۵ کیلومتر است که مخزنی پهن و کم عمق (بیشترین عمق ۱۵ متر) است. مطابق شکل ۱ رودخانه ارس در داخل یک حوضه فرامرزی است که از کشورهای ترکیه، ارمنستان، آذربایجان و ایران عبور می‌کند. در سمت شمال مخزن، شهر نخجوان و نهرام مشرف بر مخزن سد است که بواسطه شیب موجود کلیه جریان‌های سطحی و فاضلاب شهر نخجوان از طریق کانال موجود و نیز نخجیوان‌چای وارد مخزن این سد می‌شود. در سمت چپ مخزن نیز مناطق مسکونی از جمله شهرک آراز قرار دارد. در این بازه، برداشت‌های قابل توجهی از مخزن سد برای اراضی کشاورزی اطراف میلادشهر انجام می‌شود. وسعت زیاد مخزن (حدود ۱۳۵۰۰ هکتار) همراه با عمق کم فرآیند تبخیر را تقویت نموده و می‌تواند به افزایش املاح کمک کند. ضمنا پرورش و برداشت ماهی در مخزن سد بر کیفیت مؤثر خواهد بود که همراه با رشد جلبکی در ماه‌های مختلف به‌ویژه گرم سال کیفیت آب مخزن را متأثر می‌نماید. دو عامل تبخیر و ورود جریان‌های سطحی و پساب‌ها به مخزن سد در تغییر کیفیت آب در این بازه همراه با پرورش ماهی و رشد جلبکی نقش قابل توجهی در کیفیت آب دارند. تخلیه آب از بخش‌های تحتانی سد، کیفیت آب ایستگاه خزانگاه را در پایین دست سد متأثر می‌نماید.

بر اساس اطلاعات موجود در ارتباط با پرورش ماهی در دریاچه سد ارس در سال ۱۴۰۰، ۳۷۰۰ تن انواع ماهیان استخوانی از دریاچه پشت سد ارس صید شده که در مقایسه با مدت مشابه سال گذشته ۱۰۰ تن افزایش یافته و گونه‌های که در این دریاچه صید می‌شوند شامل صوف، کپور، امور، بیک هد، فتوفاک و سیم برگ هستند. صید ماهیان استخوانی همه ساله از دریاچه پشت سد ارس شهرستان پلدشت از ۲۰ شهریور شروع و تا آخر فروردین ماه ادامه می‌یابد و از ۴ فروردین ماه به منظور حفظ و بازسازی ذخایر و زاد ولد ماهیان صید در این دریاچه ممنوع اعلام می‌شود.

۲-۲- نمونه‌برداری و آنالیز

نمونه‌های آب از ورودی سد ارس در روستای قارقلوق علیا و خروجی سد ارس در ایستگاه خزانگاه طی شهریور ۱۴۰۱ تا مرداد ۱۴۰۲ در هشت مرحله تهیه شد. برای انجام آزمایشات فیزیکوشیمیایی از ظروف پلاستیکی چهار لیتری اسیدشویی شده استفاده شد. برای نمونه‌های میکربی از ظروف شیشه ای استریل استفاده شد و محتمل‌ترین تعداد MPN[21] کل کلیفرم و کلی‌فرم‌های مدفوعی با استفاده کشت میکربی تعیین شد. کلیه نمونه‌های جهت حفظ کیفیت در کولدباکس در دمای چهار درجه سانتیگراد نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شد. آزمایشات فیزیکوشیمیایی مطابق با "روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب (نسخه ۲۰۱۸)" در آزمایشگاه مرجع شرکت آب و فاضلاب به انجام رسید.

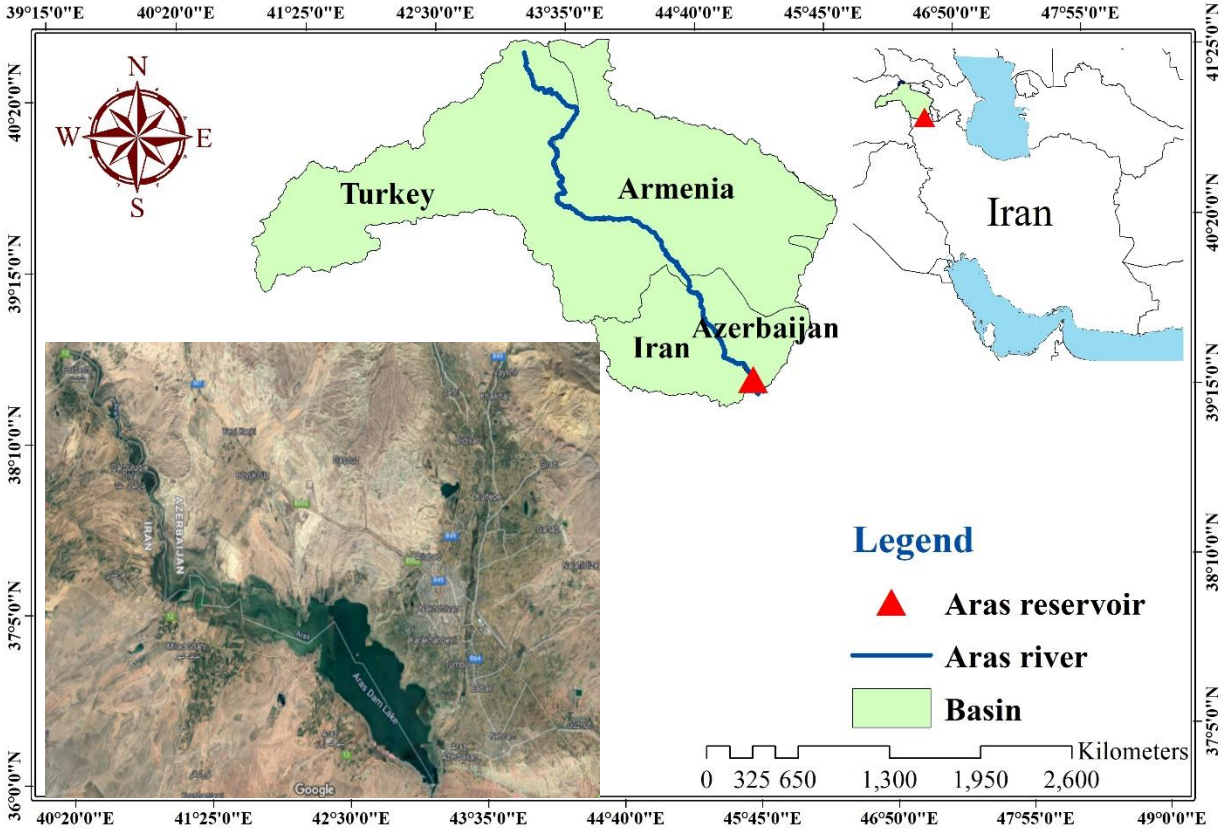

Fig. 1- The location of the Aras dam and river in the transboundary basin

شکل ۱- موقعیت سد و رودخانه ارس در حوضه فرامرزی

پارامتر دما و اکسیژن محلول با استفاده از دستگاه پرتابل شرکت هک در محل نمونه برداری تعیین شد. فلزات سنگین بعد از انجام مرحله پیش هضم و تغلیظ، با دستگاه جذب اتمی آنالیز شد. آزمایش COD با روش رفلاکس و آزمایش BOD نیز با روش زیست‌آزمونی، انکوباسیون نمونه و تعیین DO باقیمانده انجام شد. برای نیترات از روش طیف‌سنجی و برای آلودگی میکروبی از روش کشت ۱۵ لوله‌ای استفاده شد. برای کنترل کیفی آنالیزها QC[22]، ضمن آنالیز محلول‌های استاندارد، درصد خطای آنالیز کاتیون‌ها و آنیون‌ها محاسبه و خطای کمتر از ۵٪ قابل قبول درنظر گرفته شد. همچنین، بر حسب مورد نمونه‌های یکسان دو تایی با نام‌های متفاوت آنالیز و نتایج حاصل جهت اطمینان از تکرارپذیری آنالیزها با هم مقایسه شد.

۲-۳- شاخص کیفی $IRWQI_{SC}$

شاخص IRWQI شاخصی تلفیقی از NSFWQI[23] و BCEQI[24] است که براساس نظریات کارشناسی حفاظت محیط زیست ایران مطرح شده و با استفاده از این شاخص می‌توان وضعیت کیفیت آب را به صورت کمی ارائه داد به‌طور کلی یک شاخص عمومی و کاربردی در بیان کیفیت منابع آب سطحی است. شاخص IRWQI ابزاری ساده و مناسب برای تعیین وضعیت و شرایط کیفیت آب با توجه به شرایط طبیعی و مسائل و مشکلات منابع آب ایران است که در آن داده‌های کیفیت آب برای منابع آبی از جمله مخازن در یک فرمول ریاضی که با یک عدد میزان سلامتی آب را نشان می‌دهد، شرکت داده می‌شوند. به‌طور کلی عدد موردنظر با یک مقیاس نسبی که گویای کیفیت آب از بسیار بد تا عالی است مطابق جدول ۱ طبقه‌بندی می‌شود (Hashemi et al., 2011).

در این روش برای ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی از رابطه ۱ استفاده می‌شود که برای به دست آوردن آن به سه عامل مقدار کیفی و شاخص رتبه‌بندی (جهت هم‌مقیاس‌سازی) و وزن‌دهی (جدول ۲) پارامترهای مدل $IRWQI_{SC}$ نیاز دارد.

$$IRWQI = \left[\prod_{i=1}^{n} I_i^{W_i}\right]^{\frac{1}{\gamma}} \qquad (۱)$$

Table 1- Water resources quality classification based on $IRWQI_{SC}$ index

جدول ۱- طبقه‌بندی کیفیت منابع آبی بر اساس شاخص $IRWQI_{SC}$

Descriptive equivalence	Index value
Very bad	<15
Bad	15-29.9
Relatively bad	30-44.9
Normal	45-55
Relatively good	55.1-70
Good	70.1-85
Very good	85<

در رابطه فوق $\gamma = \sum_{n=1}^{n} W_i$ و W_i: وزن پارامتر iام، n: تعداد پارامترها، I_i: مقدار شاخص برای پارامتر iام از منحنی رتبه‌بندی است (Hashemi et al., 2011).

Table 2- Weights of parameters in $IRWQI_{SC}$ index

جدول ۲- پارامترهای شاخص $IRWQI_{SC}$ و وزن‌های آن‌ها

Weight	Parameter
0.140	Coliform
0.117	**BOD_5**
0.108	N
0.097	DO
0.096	EC
0.093	COD
0.090	Amonium
0.87	P
0.062	TUR
0.059	Total hardness
0.051	pH

۲-۴- شاخص‌های پایداری آب

در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خوردگی از شاخص‌های LSI و RSI استفاده شد. شاخص اشباع (LSI)، به‌منظور پیش‌بینی تمایل آب به رسوب یا انحلال کربنات کلسیم ($CaCO_3$) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Choi et al., 2015).

$CaCO_3$ یکی از عمده‌ترین مواد معدنی موجود در آب است که همچنین به عنوان مهمترین عنصر شرکت‌کننده در تشکیل رسوبات شناخته می‌شود (Antony et al., 2011). دامنه تغییرات LSI از بین مقادیر مثبت و منفی است. درصورتی که $pH < pH_C$ باشد، این شاخص منفی بوده و باعث حل شدن $CaCO_3$ خواهد شد و از لحاظ رسوب‌گذاری مشکل‌ساز نیست و اگر $pH > pH_C$ باشد، شاخص LSI مثبت بوده و آب از $CaCO_3$ اشباع خواهد بوده که این حالت منجر به رسوب‌گذاری می‌شود. شاخص LSI از رابطه ۲ برآورد می‌شود (Rafferty, 2000):

$$LSI = pH - pH_C \quad (۲)$$

pH اسیدیته اندازه‌گیری شده در آب و pH_C اسیدیته محاسبه شده براساس نتایج تجزیه شیمیایی آب است و از رابطه ۳ برآورد می‌شود:

$$pH_C = (PK_2 - PK_C) + P(Ca + Mg) + P(CO_3 + HCO_3) \quad (۳)$$

در رابطه فوق PK_2 لگاریتم منفی ضریب ثابت یونیزاسیون دوم H_2CO_3 و PK_C ضریب حلالیت $CaCO_3$ که هر دو برحسب قدرت یونی تصحیح شده‌اند. $P(Ca + Mg)$ منهای لگاریتم غلظت مولار $Ca + Mg$ و $P(CO_3 + HCO_3)$ منهای لگاریتم غلظت معادل $CO_3 + HCO_3$ است. هریک از پارامترهای رابطه pH_C با استفاده از جدول راهنمایی که آیرز و وستکات (Ayers and Westcot, 1989) در نشریه شماره ۲۹ آبیاری و زهکشی فائو، برمبنای مفهوم ارائه شده (Suarez, 1981)، برای اصلاح نسبت جذب سدیم ارائه نمودند، تعیین شده است.

شاخص پایداری رایزنر RSI، یک روش تجربی برای ارزیابی پتانسیل آب در تشکیل رسوب $CaCO_3$ است (Alsaqqar et al., 2014; World Health Organization, 2017).

به عبارت دیگر شاخص RSI نوعی اصلاح شده شاخص LSI است که تمایل به رسوب‌گذاری و خوردگی شدید را بهتر برآورد می‌کند (Rafferty, 2000). برخلاف شاخص LSI مقادیرشاخص RSI همواره مثبت است و مقدار این شاخص در صورتی که بیشتر از شش باشد، آب خورنده و در غیر این صورت آب رسوب‌گذار است. شاخص RSI از رابطه ۴ برآورد می‌شود:

$$RSI = 2(pH_C) - pH = pH_C - LSI \quad (۴)$$

۳- نتایج و تحلیل نتایج

در مطالعه حاضر به منظور تجزیه و تحلیل تغییرات پارامترهای کیفی آب دریاچه سد ارس از داده‌های اندازه‌گیری‌شده کیفیت آب سد ارس در ورودی و خروجی سد ارس برای دوره زمانی سال آبی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ استفاده شد. به‌طور کلی با توجه به محدودیت‌های موجود امکان دسترسی و نمونه‌برداری در مناطق مختلف از سد و رودخانه ارس فراهم نبوده است. به همین جهت ورودی و خروجی از سد ارس به عنوان دو ایستگاه اصلی در مطالعه حاضر درنظر گرفته شده است. از این رو در جدول ۳ تغییرات میانگین پارامترهای کیفی آب رودخانه ارس در

ورودی و خروجی سد ارس طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ و تغییرات پارامترهای کیفی آب قرار داده شده است. مطابق آزمون T-TEST کاهش معنی‌دار کدورت در سطح ۰/۰۱ درصد نشان می‌دهد که مخزن سد ارس به عنوان یک مخزن ته‌نشینی عمل نموده و کدورت ناشی از مواد معلق و کلوئیدی در آن ترسیب می‌یابد و آب خروجی از سد کیفیت مناسبی از نظر کدورت دارد. متوسط TDS و EC در خروجی سد نسبت به ورودی آن افزایش یافته است که می‌تواند ناشی از نقش تبخیر آب در مخزن سد و تغلیظ املاح باشد. قاعدتاً ورود جریان‌های آلوده همانند زه‌آب‌های کشاورزی زمین‌های اطراف و فاضلاب‌های شهری و انحلال مواد از رسوبات کف بستر می‌تواند در این افزایش مؤثر باشد. میزان تغییرات متوسط BOD و COD در خروجی سد ارس نسبت به ورودی آن کاهش نشان می‌دهد که ناشی از فرآیند خود پالایی مواد آلی در مخزن سد با نرخ ۲۸/۷ درصد است. جدول ۴ نشان‌دهنده ماتریس همبستگی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب است. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن حاکی از همبستگی معنی‌دار متغیرهای EC و TDS در سطح ۰/۰۱ است. مطابق با ارزیابی‌های صورت گرفته، افزایش مقدار TDS ناشی از نمک‌های غیر آلی مانند کربنات‌ها، بی‌کربنات‌ها، کلریدها، سولفات‌ها، فسفات‌ها و نیترات‌های منیزیم، کلسیم، پتاسیم، سدیم، آهن و مقداری مواد آلی است. همچنین مطابق جدول ۴ بیشترین میزان همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ بین متغیرهای EC و CL، $HCO3^-$ و Ca، SO_4 و Na، CL و Na، K و Na، Mg و SO_4، Fe و CL، NO3 و $HCO3^-$ برقرار است.

Table 3- The average amount of changes in the water quality parameters in Aras Dam reservoir at the inlet and outlet during the study period of water year 1400-1401 (Iranian calendar)

جدول ۳- تغییرات میانگین پارامترهای کیفی آب سد ارس در ورودی و خروجی طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۱-۱۴۰۰

Parameter		Temp	Turbidity	TSS	EC	TDS	pH	Alkalinity	Total hardness	Temporary hardness	Permanent hardness	HCO_3	SO_4	Cl
Unit		(C°)	(NTU)	(mg/L)	(µs/cm)	(mg/L)	-	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Inlet	Mean	16.7	829.5	645.1	1279.3	805.9	8.02	276.5	393.5	274.0	118.3	333.7	180.9	144.8
	±SD	8.3	2151.7	1071.4	55.8	35.0	0.19	22.6	44.4	20.7	28.1	26.2	48.4	15.6
Outlet	Mean	16.0	11.4	42.0	1396.4	879.8	8.26	245.3	399.1	249.4	149.8	304.4	238.2	171.5
	±SD	8.0	11.5	60.7	125.7	79.2	0.19	21.1	48.1	25.4	33.9	31.0	51.4	11.3
Variations		▼	▼	▼	▲	▲	▲	▼	▲	▼	▲	▼	▲	▲

Parameter		Ca	Mg	Na	K	NO_3	NO_2	NH_4	PO_4	DO	DO	BOD	COD	RSI
Unit		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(%)	(mg/L)	(mg/L)	-
Inlet	Mean	70.2	52.3	124.0	7.1	10.6	0.221	0.041	0.454	7.18	78.8	5.55	19.5	6.903
	SD	11.6	7.6	17.3	1.0	4.0	0.246	0.029	0.281	2.10	23.4	2.44	7.4	0.319
Outlet	Mean	65.3	57.3	146.8	7.4	6.1	0.420	0.029	0.310	7.38	77.7	4.34	14.9	6.880
	±SD	14.4	6.9	18.3	0.8	4.5	0.379	0.021	0.190	2.05	16.2	2.65	9.5	0.143
Variations		▼	▲	▲	▲	▼	▲	▼	▼	▲	▼	▼	▼	▼

Parameter		As	Cu	Mo	Cd	Ba	Al	Co	Cr	Pb	Zn	Ni	Fe	Mn
Unit		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Inlet	Mean	0.020	0.014	0.047	0.001	0.074	2.358	0.008	0.014	0.004	0.031	0.038	2.363	0.258
	±SD	0.004	0.021	0.099	0.000	0.030	2.316	0.007	0.006	0.003	0.023	0.024	2.602	0.498
Outlet	Mean	0.019	0.002	0.007	0.001	0.062	0.136	0.004	0.005	0.002	0.022	0.003	0.175	0.033
	±SD	0.005	0.004	0.012	0.000	0.015	0.098	0.000	0.000	0.002	0.037	0.003	0.175	0.036
Variations		▼	▼	▼	=	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼

▲ =Increase

▼=Decrease

Table 4- The results of Spearman's correlation test between the physical and chemical parameters of water and significant level

جدول ۴- نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب به همراه سطح معنی‌داری

	EC	TDS	TSS	pH	CL	K	Na	Mg	Ca	Fe	HCO_3	SO_4	NO_3	NO_2	DO	BOD	COD
EC	1.00	0.00	0.01	0.37	0.00	0.11	0.00	0.01	0.56	0.06	0.67	0.00	0.99	0.97	0.01	0.71	0.04
TDS	1.00	1.00	0.00	0.35	0.00	0.11	0.00	0.01	0.53	0.07	0.65	0.00	0.99	0.99	0.01	0.70	0.04
TSS	-0.20	-0.20	1.00	0.27	0.02	0.86	0.06	0.03	1.00	0.15	0.67	0.02	0.63	0.22	0.06	0.07	0.00
pH	0.27	0.27	-0.11	1.00	0.28	0.51	0.81	0.92	0.62	0.09	0.38	0.43	0.90	0.10	0.96	0.08	0.28
CL	0.73	0.73	-0.21	0.18	1.00	0.17	0.00	0.03	0.34	0.02	0.23	0.00	0.12	0.74	0.11	0.83	0.29
K	0.33	0.33	0.35	-0.16	0.62	1.00	0.04	0.00	0.70	0.18	0.80	0.00	0.77	0.47	0.63	0.02	0.31
Na	0.55	0.55	-0.19	0.06	0.91	0.69	1.00	0.01	0.06	0.03	0.15	0.00	0.06	0.62	0.18	0.62	0.52
Mg	0.54	0.54	-0.29	-0.03	0.61	0.79	0.66	1.00	0.83	0.00	0.70	0.00	0.17	0.67	0.97	0.26	0.64
Ca	0.38	0.38	0.10	0.08	-0.24	-0.19	-0.44	0.03	1.00	0.49	0.00	0.41	0.00	0.48	0.56	0.21	0.10
Fe	-0.47	-0.47	0.71	-0.13	-0.68	-0.37	-0.58	-0.63	0.11	1.00	0.66	0.00	0.16	0.33	0.74	0.75	0.42
HCO_3	0.21	0.21	0.12	-0.26	-0.34	-0.09	-0.43	0.10	0.85	0.07	1.00	0.34	0.00	0.87	0.32	0.70	0.13
SO_4	0.57	0.57	-0.37	0.12	0.78	0.68	0.84	0.82	-0.18	-0.66	-0.23	1.00	0.04	0.59	0.74	0.43	0.76
NO_3	0.16	0.16	0.75	-0.15	-0.32	-0.18	-0.44	-0.36	0.66	0.53	0.68	-0.47	1.00	0.40	0.22	0.32	0.28
NO_2	-0.20	-0.20	-0.22	0.42	-0.04	-0.08	-0.12	0.00	-0.03	-0.32	-0.15	-0.10	-0.31	1.00	0.19	0.16	0.45
DO	0.58	0.58	-0.34	-0.06	0.28	-0.11	0.10	-0.03	0.31	-0.19	0.38	-0.03	0.47	-0.33	1.00	0.42	0.01
BOD	-0.22	-0.22	0.26	-0.45	0.07	0.53	0.16	0.28	-0.37	-0.07	-0.15	0.22	-0.24	-0.29	-0.21	1.00	0.00
COD	-0.54	-0.54	0.69	-0.24	-0.23	0.24	-0.12	-0.14	-0.41	0.46	-0.34	-0.18	-0.11	-0.23	-0.56	0.70	1.00

طبق نتایج به دست آمده از بررسی پارامترهای کیفی آب رودخانه ارس در ورودی و خروجی سد ارس، اولین نقش بارز سد ارس عملکرد آن به عنوان یک واحد ته‌نشینی است بطوری‌که مقادیر کدورت و TSS در ورودی و خروجی سد به ترتیب معادل ۸۲۹/۵ NTU و ۱۱/۴ و ۶۴۵/۱ و ۴۲ میلی‌گرم برلیتر برآورد شد که در خروجی مخزن به ترتیب بیش از ۹۸٪ و ۹۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین، مطابق شکل ۳ قلیاییت کل در خروجی مخزن به ترتیب به میزان ۱۱/۳ درصد کاهش می‌یابد. سختی موقت نیز که تحت تأثیر بی‌کربنات کلسیم، منیزیم و آهن است در خروجی مخزن به ترتیب به میزان ۸/۹ درصد کاهش می‌یابد. با مقایسه این مقادیر در ورودی و خروجی مخزن سد ارس، ملاحظه می‌شود که آهن و کلسیم به ترتیب میزان ۹۲/۵ و ۶/۹ درصد کاهش پیدا می‌کند و تنها منیزیم به میزان ۹/۵ درصد افزایش یافته است. نتایج حاکی از آن است که سختی دائم نیز به شدت تحت تأثیر نمک سولفات، کلراید و منیزیم است (شکل ۲) و به میزان ۲۶/۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. درنهایت درصد تغییرات سختی کل با مجموع سختی موقت و دائمی برآورد می‌شود که به میزان ۱/۴۲ درصد افزایش یافته است (شکل ۳).

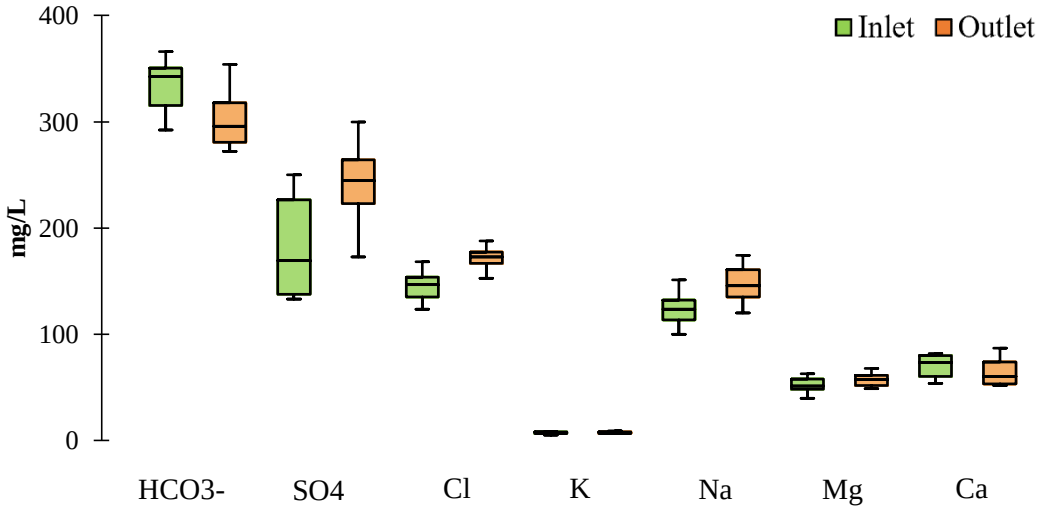

Fig. 2- The range of ion changes in the inlet and outlet of Aras Dam reservoir during the study period of 1400-1401 (Iranian calendar)

شکل ۲- دامنه تغییرات یون‌ها در ورودی و خروجی مخزن سد ارس طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

براساس یافته‌های پژوهش حاضر، مطابق شکل ۲ دامنه غلظت یون‌ها در هر دو ایستگاه ورودی و خروجی سد ارس در محدوده کمتر از استاندارد WHO است. طبق نتایج بیشترین مقدار بی‌کربنات در ۱۹ آبان سال ۱۴۰۰ معادل ۳۶۶ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه ورودی سد ارس برآورد شد. همچنین، بیشترین مقدار سولفات، کلراید، پتاسیم، سدیم، منیزیم و کلسیم به ترتیب معادل ۳۰۰، ۱۸۸، ۹، ۱۷۴، ۶۸ و ۸۷ میلی‌گرم بر لیتر برآورد شد که در محدوده قابل قبول به لحاظ استاندارد WHO قرار دارد.

به طور کلی تغییرات هدایت الکتریکی آب ناشی از وجود مواد جامد غیرآلی محلول مانند آنیون بی‌کربنات، سولفات و کلراید و کاتیون‌های آهن، منیزیم، کلسیم و سدیم در آب است که در شکل ۲ میزان تغییرات هریک از این پارامترهای کیفی آب و ارائه شده است. شکل ۴ نشان دهنده بازه تغییرات هدایت الکتریکی برای ایستگاه ورودی و خروجی سد ارس است. نتایج حاکی از آن است که به‌طور متوسط میزان EC برای ورودی و خروجی به ترتیب معادل ۱۲۷۹/۳ و ۱۳۹۶/۴ µs/cm برآورد شد. EC با توجه به دارا بودن همبستگی کامل با TDS آب، با افزایش غلظت TDS مقدار هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از افزایش EC و TDS آب در خروجی مخزن به میزان حدودا ۹ درصد است که ناشی از نقش تبخیر و ورود برخی جریان‌های شور به داخل مخزن است. مطابق با بررسی مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی سد ارس مشخص شد که به طور کلی میزان هدایت الکتریکی ورودی کمتر از خروجی است. لازم به ذکر است که برای مصارف شرب حداکثر EC مجاز (معادل TDS) ۲۵۰۰ µs/cm است که از این نظر آب سد ارس مشکلی ندارد؛ هرچند از حد مطلوب فراتر است.

طبق بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده، pH آب خروجی اندکی افزایش یافته است که ناشی از تأثیر رشد جلبکی در مخزن به‌واسطه مصرف دی‌اکسیدکربن است. کاهش سختی موقت همراه با کاهش قلیاییت و افزایش سختی دائم از دیگر نکات قابل توجه در کیفیت آب مخزن سد ارس است. به‌طور کلی فیتوپلانکتون‌ها مانند گیاهان برای رشد احتیاج به نور، کربن غیر آلی (مانند دی‌اکسیدکربن و یون‌های کربنات)، مواد غذایی معدنی محلول، آب و دمای مناسب برای بهینه‌سازی متابولیسم خود دارند. یون سولفات و کلرور هر کدام به ترتیب ۳۱/۶ و ۱۸/۴ درصد افزایش یافته و یون بی‌کربنات ۸/۷ درصد کاهش می‌یابد. افزایش سدیم در آب خروجی از سد به میزان ۱۸/۴ درصد رخ می‌دهد که مشابه با افزایش کلرور است. در مورد برخی فلزات از جمله آلومینیوم، آهن و منگنز کاهش معنی‌داری در خروجی سد رخ می‌دهد که نشان دهنده آن است که این فلزات در آب ورودی به سد در فاز کلوئیدی حضور داشته‌اند. البته در مورد آهن و منگنز ترسیب بواسطه رخ دادن اکسیداسیون نیز می‌تواند مد نظر قرار گیرد.

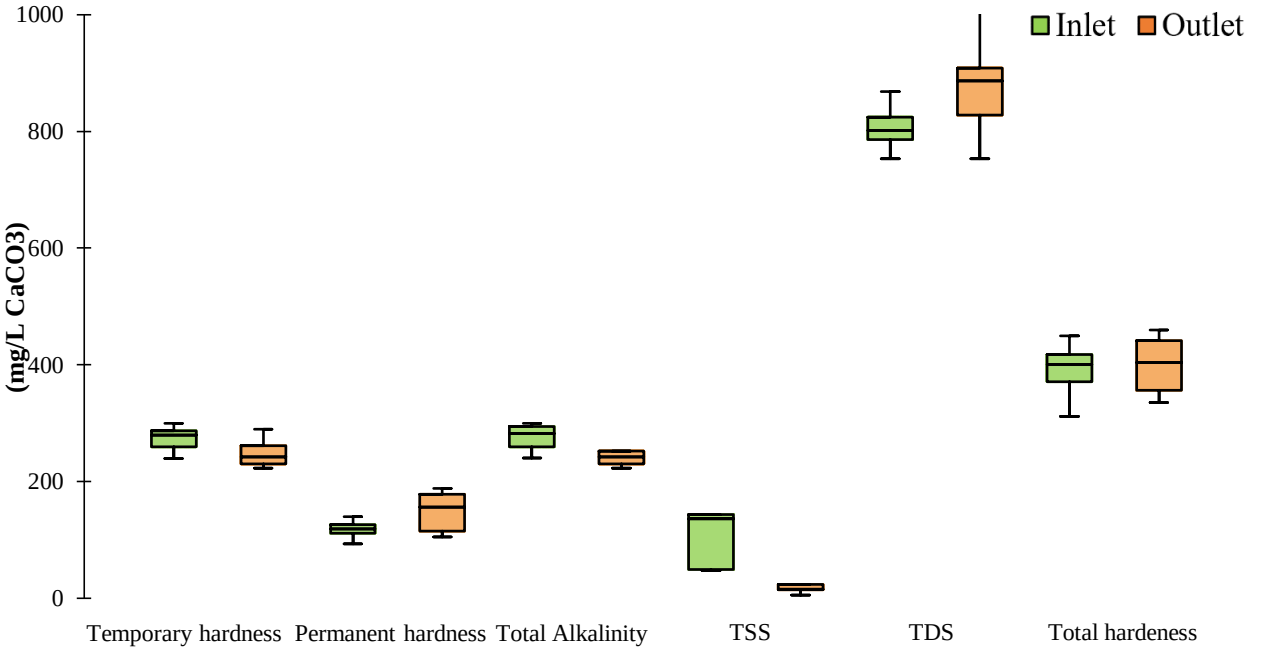

Fig. 3- The range of changes in turbidity, water hardness and TDS parameters in the inlet and outlet of Aras Dam reservoir during the study period of 1400-1401 (Iranian calendar)

شکل ۳- دامنه تغییرات پارامترهای کدورت، سختی آب و TDS در ورودی و خروجی مخزن سد ارس طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

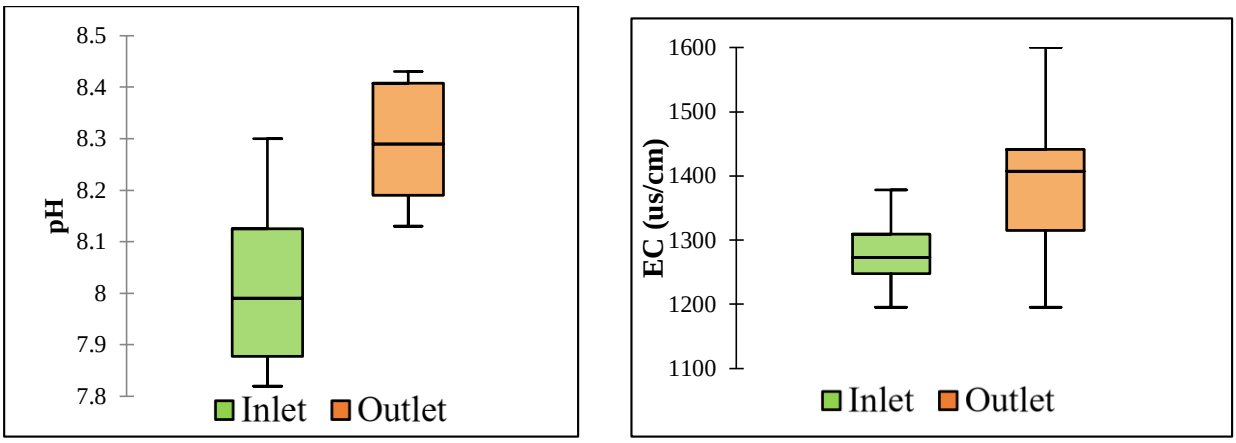

Fig. 4- The range of EC and pH changes in the inlet and outlet of Aras dam reservoir during the study period of 1400-1401 (Iranian calendar)

شکل ۴- دامنه تغییرات EC و pH در ورودی و خروجی مخزن سد ارس طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

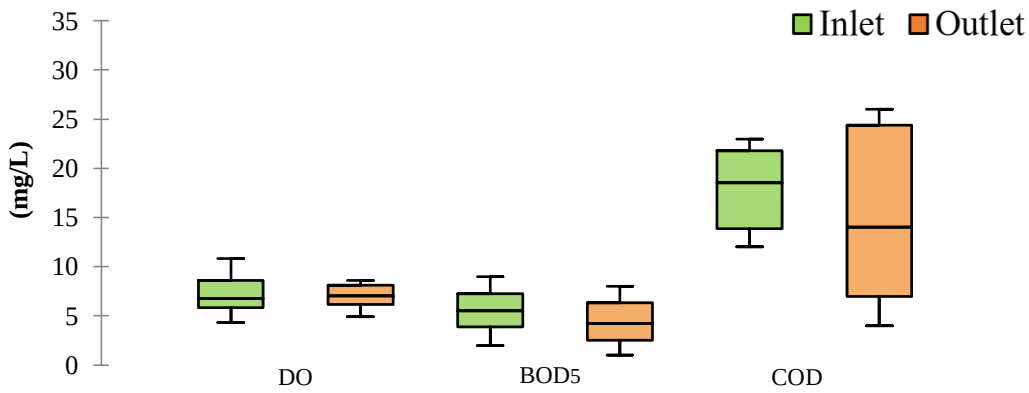

Fig. 5- The range of DO, BOD and COD changes in the inlet and outlet of Aras dam reservoir during the study period of 1400-1401 (Iranian calendar)

شکل ۵- دامنه تغییرات DO، BOD و COD در ورودی و خروجی مخزن سد ارس طی دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

ورود و وجود ترکیبات آلی و معدنی به آب باعث به وجود آمدن آلودگی در سدها می‌شود. نتیجه این عمل مصرف اکسیژن محلول (DO) سدها است و اگر اکسیژن محلول موجود در آب سریع‌تر از جانشین شدن آن از طریق اتمسفر یا فتوسنتز مصرف شود به تدریج اکسیژن از بین رفته که باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی زیادی می‌شود. مطابق شکل ۵ متوسط اکسیژن محلول در ورودی و خروجی سد تقریباً یکسان است؛ اما در ماه‌های تابستان میزان اکسیژن محلول در خروجی نسبت به ورودی آن کاهش می‌یابد که احتمالا ناشی از افزایش متابولسیم، افزایش رشد جلبکی و پایین بودن نرخ هوادهی مجدد در مخزن سد است.

طبق مطالعات اخیر، مهمترین روش برای تعیین میزان آلودگی توسط آلاینده‌های آلی اندازه‌گیری BOD و COD است و در حقیقت BOD تعیین کننده مقدار اکسیژن مورد نیاز برای ثبوت بیولوژیکی مواد آلی در آب است. به‌طور معمول در آب‌های غیرآلوده مقادیر BOD، حدود ۲ تا ۳ میلی‌گرم برلیتر است. درحالی که با وارد شدن فاضلاب مقادیر BOD افزایش پیدا می‌کند. مطابق با شکل ۵ ملاحظه می‌شود متوسط BOD اندازه‌گیری شده در ورودی و خروجی سد ارس به ترتیب معادل ۵/۵۵ و ۴/۳۴ میلی‌گرم بر لیتر است. بیشترین مقدار BOD اندازه‌گیری شده معادل ۹ میلی‌گرم بر لیتر بوده که در اواخر تیر ماه ۱۴۰۱ سنجش شده است. افزایش شدید BOD در تیرماه می‌تواند ناشی از ورود آلاینده‌های آلی قابل تجزیه، مربوط به پساب‌های انسانی، فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری باشد. همچنین، مطابق نتایج به دست آمده BOD در خروجی مخزن نسبت به ورودی به میزان ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. دلیل کاهش آن نسبت به ایستگاه ورودی، کاهش تجزیه مواد آلی و تبدیل آن به ترکیبات معدنی است و علت آن را می‌توان فعالیت

باکتری‌ها قلمداد کرد. COD نیز اکسیژن مورد نیاز برای اکسیداسیون مواد قابل اکسیدان موجود در آب را تعیین می‌کند به‌طور معمول در منابع آب‌های سطحی مقادیر COD، حدود ۲ تا ۱۰ میلی‌گرم برلیتر است. متوسط این میزان برای ورودی و خروجی سد ارس به ترتیب معادل ۱۹/۵ و ۱۴/۹ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد که کاهش ۲۳ درصدی را نشان می‌دهد و بیشترین مقدار آن در خردادماه سال ۱۴۰۱ معادل ۳۵ میلی‌گرم بر لیتر برآورد شد. به طور کلی در ماه‌های تابستان به دلیل استفادهٔ بیش از حد استاندارد کودها و سموم کشاورزی در زمین‌های اطراف سد و رهاسازی فاضلاب‌های شهری مقادیر BOD و COD از افزایش معنی‌داری نسبت به سایر ماه‌ها برخوردار هستند.

مقادیر محتمل‌ترین تعداد کلیفرم‌ها (MPN/100mL) به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی آب آشامیدنی و مهم در محاسبه WQI نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین، در جدول ۵ به منظور طبقه‌بندی کیفیت آب برای کشاورزی، پس از انجام آنالیز هیدروشیمیایی بر روی نمونه‌های آب و تعیین میزان هر یون و محاسبه پارامترهای مورد نیاز، می‌توان کیفیت آب را طبقه‌بندی کرد. نمودار ویلکاکس از جمله نمودارهای پرکاربرد در هیدروشیمی آب است که با استفاده از پارامترهای EC و SAR برای تعیین کلاس آب جهت آبیاری به‌کار می‌رود. درجه‌بندی نمودار ویلکاکس در جدول ۵ نمایش داده شده است. براساس نتایج از طبقه‌بندی کیفی آب جهت مصارف کشاورزی در همه نمونه‌ها وضعیت کیفی آب در حالت متوسط (C3S1) ارزیابی شد. همچنین تیپ آب براساس اولویت‌های غلظتی یکی از آنیون‌های آب تعیین می‌شود که دو تیپ اصلی بی‌کربناته، سولفاته وجود دارد.

۳-۱- شاخص‌های کیفی و پایداری آب

ارزیابی و شناخت کیفیت منابع آب سطحی با استفاده از روش طبقه‌بندی $IRWQI_{SC}$ این امکان را فراهم می‌کند که با بیانی ساده بتوان کیفیت آب محدوده مورد مطالعه را در نقاط مختلف طبقه‌بندی کرد. تعیین میزان غلظت آلاینده‌های موجود در آب گام مهمی در تعیین کیفیت آب سد ارس بر اساس شاخص $IRWQI_{SC}$ محسوب می‌شود. نتایج نشان داد که براساس شاخص $IRWQI_{SC}$ خروجی مخزن سد ارس در مقایسه با ورودی سد دارای کیفیت آب بهتری است که این امر نشان‌دهنده تأثیر مثبت سد ارس به ارتقاء کیفیت آب است. مطابق نتایج به دست آمده (جدول ۶ و شکل ۶) در بدترین حالت کیفیت آب ورودی سد ارس به لحاظ شاخص $IRWQI_{SC}$ در طول ۲ سال اندازه‌گیری در خردادماه ۱۴۰۱ در وضعیت بد قرار گرفت که این شاخص برای خروجی مخزن سد ارس در همان ماه، وضعیت نسبتا بد را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که وضعیت نرمال کیفیت آب به لحاظ شاخص $IRWQI_{SC}$ فقط در ماه‌های شهریور، دی و بهمن ۱۴۰۰ در خروجی سد طبقه‌بندی شده است و در ورودی سد ارس وضعیت کیفیت آب همواره در حالت نسبتاً بد و بد است. به طور متوسط با درنظر گرفتن همه نمونه‌ها وضعیت کیفیت سد ارس طبق شاخص مذکور در طبقه نسبتا بد قرار می‌گیرد.

Table 5- Qualitative classification of water class and type in Aras Dam's Inlet and Outlet

جدول ۵- طبقه‌بندی کیفی کلاس و تیپ آب سد ارس در بالادست و پایین دست

Station	Time step 1			Time step 2			Time step 3			Time step 4			Time step 5			Time step 6			Time step 7			Time step 8		
	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml	Type	Class	MPN/100ml
Inlet	$Na-HCO_3$	C3S1	110	$Na-HCO_3$	C3S1	>1600	$Na-HCO_3$	C3S1	>1600	Na-HCO3	C3S1	>1600	$Na-HCO_3$	C3S1	>1600	$Na-HCO_3$	C3S1	>1600	$Na-HCO_3$, SO_4	C3S1	1200	$Na-HCO_3$	C3S1	690
Outlet	$Na-SO_4$		49	$Na-SO_4$		>1600	$Na-HCO_3$		49	Na-HCO3		33	$Na-HCO_3$		1100	$Na-HCO_3$		240	$Na-SO_4$		350	$Na-SO_4$		3300

Table 6- Classification of Aras Dam water quality using IRWQI$_{SC}$ index for the study period of 1400-1401 (Iranian calendar)

جدول ۶- طبقه‌بندی کیفیت آب سد ارس با استفاده از شاخص IRWQI$_{SC}$ برای دوره مطالعاتی سال آبی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱

Month	Sep-21	Nov-21	Dec-21	Feb-22	May-22	Jun-22	Jul-22	Aug-22
Inlet	43.8	37.7	37.1	40	26	19	31	30
Descriptive equivalence	Relatively bad	Relatively bad	Relatively bad	Relatively bad	Bad	Bad	Relatively bad	Relatively bad
Outlet	51.5	41.9	50.2	48.4	37	40	39	34
Descriptive equivalence	Normal	Relatively bad	Normal	Normal	Relatively bad	Relatively bad	Relatively bad	Relatively bad

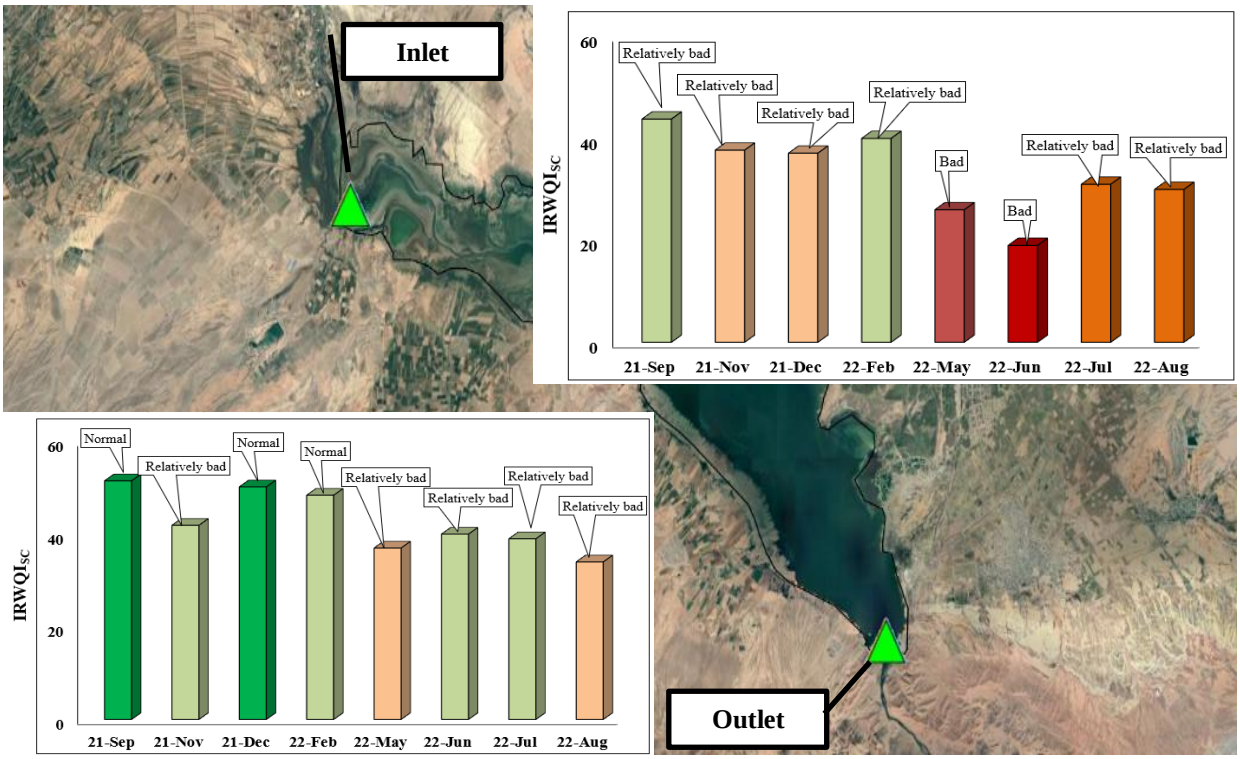

Fig. 6- Classification of water quality in the Inlet and Outlet of Aras Dam using IRWQI$_{SC}$ index

شکل ۶- طبقه‌بندی کیفیت آب در پایین دست و بالادست سد ارس با استفاده از شاخص IRWQI$_{SC}$

خوردگی و رسوب‌گذاری آب از جمله موضوعات مهم کیفی آب رودخانه‌ها استکه مصارف آن در آبیاری و صنعت را می‌تواند محدود نماید. به عنوان نمونه می‌توان به خسارت‌های ناشی از گرفتگی تأسیسات به دلیل تشکیل رسوب در آبیاری قطره‌ای و نیز شیرین‌سازی آب برای اهداف شرب توسط غشاها اشاره نمود. در مباحث صنعت نیز آسیب به انواع تأسیسات، لوله‌ها و سیستم‌های حرارتی و برودتی مطرح است. رودخانه ارس در بازه سه استان آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل دارای هر سه مصرف شرب، کشاورزی و صنعت است از اینرو خوردگی و رسوب‌گذاری آن دارای اهمیت خواهد بود. در مطالعه حاضر وضعیت خوردگی و رسوب‌گذاری آب رودخانه ارس با شاخص‌های LSI و RSI محاسبه و بر مبنای جدول ۷ تعیین و تفسیر شد.

Table 7- Classification of water quality using RSI and LSI indexes

جدول ۷- طبقه‌بندی کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های RSI و LSI

Index	Corrosion	Normal	Precipitate
LSI	< - 0.1	0.1 - 0.05 -	> 0.05
RSI	> 9	7-9	< 7

در شکلهای ۷ و ۸، بررسی دامنه تغییرات شاخص RSI و LSI به منظور ارزیابی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خوردگی در دو ایستگاه ورودی و خروجی سد ارس ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در کل دوره اندازه‌گیری ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ کمترین مقدار شاخص RSI در ورودی و خروجی سد ارس به ترتیب معادل ۶/۲۷ و ۶/۶۴ است که به ترتیب در ماه‌های شهریور ۱۴۰۰ و اردیبهشت ۱۴۰۱ برآورد شده است. همچنین، بیشترین مقدار شاخص RSI برای ورودی و خروجی مخزن سد ارس به ترتیب معادل ۷/۲۷ و ۷/۰۶ محاسبه شد. به‌طور کلی طبق شاخص RSI بین ورودی و خروجی سد ارس اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده کیفیت آب سد ارس را به لحاظ خوردگی و رسوب‌گذاری می‌توان در طبقه متعادل تا کمی رسوب‌گذار قرار داد. با بررسی شاخص LSI (شکل ۶) نیز مشاهده می‌شود که کمترین مقادیر این شاخص برای ورودی و خروجی سد ارس به ترتیب معادل ۰/۳۲ و ۰/۳۹ و در بیشترین حالت معادل ۱/۰۱ و ۰/۸۹ برآورد شد که نتایج حاکی از آن است که مطابق شاخص LSI آب ورودی و خروجی سد ارس دارای خاصیت رسوب‌گذاری است. طبق هردو شاخص RSI و LSI به طور متوسط خاصیت رسوب‌گذاری در خروجی سد ارس نسبت به ورودی آن بیشتر است.

۴- جمع‌بندی

با نگرش به یافته‌های به‌دست آمده از این پژوهش، کیفیت آب سد ارس از نظر بسیاری از متغیرهای مهم عنوان شده در وضعیت مناسبی قرار ندارد. یکی از مهمترین تهدیدات اکولوژیکی و آلودگی زیست محیطی در سد ارس استفادهٔ بیش از حد استاندارد کودها و سموم کشاورزی در زمین‌های اطراف سد است. دومین آسیب اکولوژیکی سد ارس ورود فاضلاب‌های شهری، روستایی و صنعتی بدون تصفیه شدن به داخل سد است. بزرگترین فاضلاب شهری و صنعتی از شهر نخجوان در آن‌سوی مرز وارد ارس می‌شود. این فاضلاب‌ها حاوی مواد مغذی (ازت و فسفر) و ضمن افزایش غلظت این ترکیبات در آب باعث وقوع شکوفایی جلبک‌های مضر و آسیب به آبزیان ارس و افت کیفیت آب می‌شود.

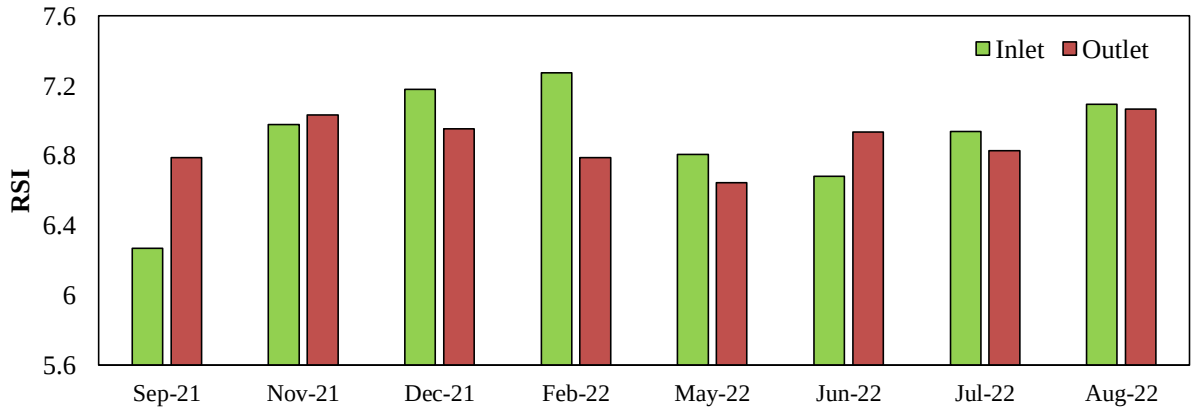

Fig. 7- Comparison of RSI index changes for the study period 1400-1401 (Iranian calendar)

شکل ۷- مقایسه تغییرات شاخص رایزنر برای دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

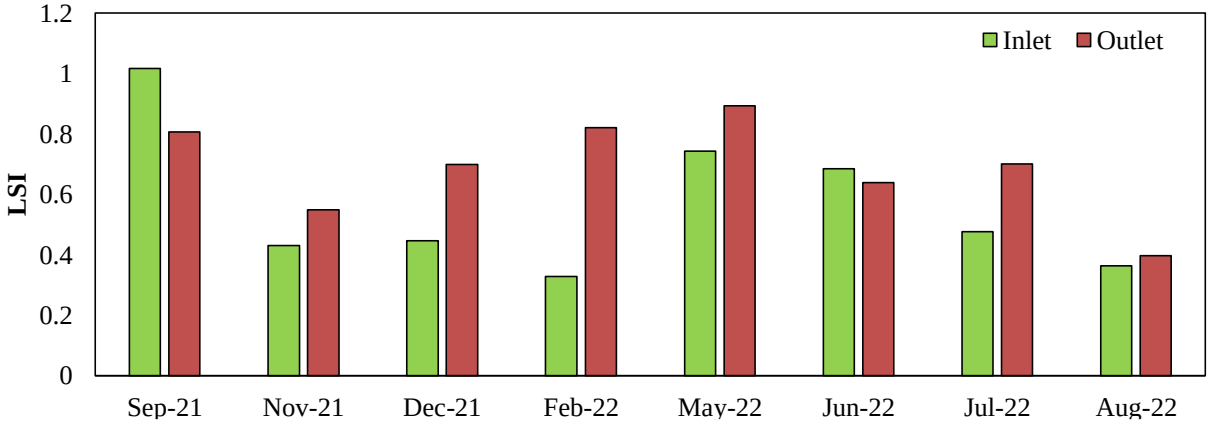

Fig. 8- Comparison of LSI index changes for the study period 1400-1401 (Iranian calendar)

شکل ۸- مقایسه تغییرات شاخص لانژلیه برای دوره مطالعاتی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

در مطالعه حاضر به بررسی و تحلیل تغییرات پارامترهای کیفی آب دریاچه سد ارس در ورودی و خرجی آن و به ارائه نمای کلی از ارتباط و منابع متغیرهای فیزیکی و شیمیایی پرداخته شد. EC با توجه به دارا بودن همبستگی کامل با TDS، با افزایش غلظت TDS مقدار هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج حاکی از افزایش EC و TDS آب در خروجی مخزن به میزان حدوداً ٪۹ است که ناشی از نقش تبخیر و ورود برخی جریان‌های شور به داخل مخزن است. مقادیر کدورت و TSS در خروجی سد نسبت به ورودی آن به ترتیب بیش از ٪۹۸ و ٪۹۳ کاهش می‌یابد. pH آب خروجی اندکی افزایش می یابد که ناشی از تأثیر رشد جلبکی در مخزن به‌واسطه مصرف دی اکسید کربن می‌تواند باشد. کاهش سختی موقت همراه با کاهش قلیاییت و افزایش سختی دائم از دیگر نکات قابل توجه در کیفیت آب مخزن سد ارس است. همچنین، سختی کل نیز تا حدودی افزایش می‌یابد و نوع آن به سمت سختی دائم گرایش دارد. مدیریت کیفیت آب مستلزم به‌کارگیری روش‌های پیشگیرانه در سطح حوزهٔ آبریز ارس است و بنابراین با توجه به مرزی بودن سد ارس پایش آن توسط کشورهای ذینفع ضروری است و این امر مستلزم همکاری بین کشورهای هم‌مرز است. به‌علاوه توصیه می‌شود با توجه به ثابت نبودن الگوی ایجاد شکوفایی جلبکی در سد ارس، پایش مداوم و دائمی سد مدنظر قرار گیرد. همچنین، به منظور ارزیابی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خوردگی از شاخص‌های LSI و RSI استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد که رسوب‌گذاری پدیده غالب است. در نهایت از شاخص $IRWQI_{SC}$ برای تعیین وضعیت کیفیت سد ارس استفاده شد که طبق شاخص مذکور وضعیت کیفیت آب این سد در طبقه متوسط تا نسبتا بد قرار می‌گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از نتایج طرح پژوهشی تحت عنوان "بررسی تغییرات فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌های غیر آلی، آلی و میکروبی رودخانه مرزی ارس و تحلیل شاخص کیفی آب به روشهای CCME، IRWQISC و NSFWQI" که توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران (دفتر رودخانه‌های مرزی و منابع آب مشترک) حمایت مالی شد. نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایتهای انجام شده در این خصوص اعلام می‌دارند.

پی‌نوشت‌ها

1- Water Quality Index
2- Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index
3- Principal Component Analysis
4- Factor analysis
5- Ordinary Least Squares
6- Multivariate Statistical Techniques
7- Trophic State Index
8- Trophic State Index Deviation
9- Dissolved Oxygen
10- Total Coliform Bacteria
11- Oxidation-Reduction Potential
12- Electrical Conductivity
13- World Health Organization
14- Pakistan Environmental Protection Agency
15- Total Dissolved Solids
16- Biochemical Oxygen Demand
17- Chemical Oxygen Demand
18- Langelier Saturation Index
19- Ryznar Stability Index
20- Iran Surface Water Quality Index
21- Most Probable Number
22- Quality Control
23- National Sanitation Foundation Water Quality Index
24- British Columbia Water Quality Index

۵- مراجع

Alsaqqar AS, Khudair BH & Ali SK (2014) Evaluating water stability indices from water treatment plants in Baghdad City. Journal of Water Resource and Protection. Scientific Research Publishing 6(14):1344

Antony A, Low JH, Gray S, Childress AE, Le-Clech P & Leslie G (2011) Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review. Journal of membrane science. Elsevier 383(1–2):1–16

Ayers RS & Westcot DW (1985) Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome

Banda TD & Kumarasamy MV (2020) Development of Water Quality Indices (WQIs): A review. Polish Journal of Environmental Studies 29(3)

Boelee E, Geerling G, van der Zaan B, Blauw A & Vethaak AD (2019) Water and health: From environmental pressures to integrated responses. Acta tropica, Elsevier 193:217–226

Chakravarty T & Gupta S (2021) Assessment of water quality of a hilly river of south Assam, north east India using water quality index and multivariate statistical analysis. Environmental Challenges 5:100392

Fadel A, Kanj M, & Slim K (2021) Water Quality Index variations in a Mediterranean reservoir: A multivariate statistical analysis relating it to different variables over 8 years. Environmental Earth Sciences 80:1–13

Hashemi SH, Pourasghar F, Nasrabadi T, Ramezani S & Khoshrou G (2011) Guide to Iran Water Quality Index for surface water resources-conventional parameters. Persian with English abstract

Hua K, Xiao J, Li S, & Li Z (2020) Analysis of hydrochemical characteristics and their controlling factors in the Fen River of China. Sustainable Cities and Society 52:101827

Ji Y, Wu J, Wang Y, Elumalai V, & Subramani T (2020) Seasonal variation of drinking water quality and human health risk assessment in Hancheng City of Guanzhong Plain, China. Exposure and health 12:469–485

Juwana I, Rahardyan NA, Permadi DA, & Sutadian AD (2022) Uncertainty and sensitivity analysis of the effective implementation of water quality improvement programs for Citarum River, West Java, Indonesia. Water, MDPI 14(24):4077

Khan MSI, Islam N, Uddin J, Islam S, & Nasir MK (2022) Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences 34(8):4773–4781

Lumb A, Sharma TC, & Bibeault J-F (2011) A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. Water Quality, Exposure and Health 3:11–24

Mamun M, Kim JY, & An K-G (2021) Multivariate statistical analysis of water quality and trophic state in an artificial dam reservoir. Water, MDPI 13(2):186

Medeiros AC, Faial KRF, Faial K do CF, da Silva Lopes ID, de Oliveira Lima M, Guimarães RM, & Mendonça NM (2017) Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. Marine pollution bulletin 123(1–2):156–164

Organization WH (2017) Water quality and health-review of turbidity: Information for regulators and water suppliers. World Health Organization

Pandey S, Kumari N, & Al Nawajish S (2023) Land Use Land Cover (LULC) and surface water quality assessment in and around selected dams of Jharkhand using Water Quality Index (WQI) and Geographic Information System (GIS). Journal of the Geological Society of India 99(2):205–218

Poonam T, Tanushree B, & Sukalyan C (2013) Water quality indices-important tools for water quality assessment: A review. International Journal of Advances in chemistry 1(1):15–28

Rafferty K (1999) Scaling in geothermal heat pump systems. Engineering, Environmental Science

Saingam P, Li B, & Yan T (2020) Fecal indicator bacteria, direct pathogen detection, and microbial community analysis provide different microbiological water quality assessment of a tropical urban marine estuary. Water Research 185:116280

Shoukat ALI (2022) Comparative study of physicochemical and microbiological parameter of water from Rawal Dam and its silt control tank. International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling, Yasin Akın AYTURAN 5(2):63–81

Sirunda J, Oberholster P, & Wolfaardt G (2022) Assessing the adverse effects of land use activities on the water quality of selected Sub-Saharan Africa Reservoirs using a combination of water quality indices. Water, Air, & Soil Pollution 233(7):267

Soltani AA, Bermad A, Boutaghane H, Oukil A, Abdalla O, Hasbaia M, Oulebsir R, Zeroual S, & Lefkir A (2020) An integrated approach for assessing surface water quality: Case of Beni Haroun dam (Northeast Algeria). Environmental Monitoring and Assessment 192:1–17

Suarez DL (1981) Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. Soil Science Society of America Journal, Wiley Online Library 45(3):469–475

Sutadian AD, Muttil N, Yilmaz AG, & Perera BJC (2017) Using the analytic hierarchy process to identify parameter weights for developing a water quality index. Ecological Indicators 75:220–233

Sutadian AD, Muttil N, Yilmaz AG, & Perera BJC (2018) Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. Ecological Indicators 85:966–982

Tampo L, Kaboré I, Alhassan EH, Ouéda A, Bawa LM, & Djaneye-Boundjou G (2021) Benthic macroinvertebrates as ecological indicators: their sensitivity to the water quality and human disturbances in a tropical river. Frontiers in Water, Frontiers Media SA 3:662765

Uddin MG, Nash S, & Olbert AI (2021) A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. Ecological Indicators 122:107218

Uddin MG, Nash S, Rahman A, & Olbert AI (2023) A novel approach for estimating and predicting uncertainty in water quality index model using machine learning approaches. Water Research 229:119422

Vogel RM & Fennessey NM (1995) Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, Wiley Online Library 31(6):1029–1039