



Investigation of Water Quality Impact on Structures of Voshmgir Dam and Its Irrigation Network

Mohammad Sadegh Anbarsouz¹ | Kumars Ebrahimi² | Ebrahim Amiri Tokaldani³

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Anbarsouz@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Renewable Energies and Environmental Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: EbrahimiK@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, Faculty of agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Amiri@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 28 August 2022
Received in revised form:
7 December 2022
Accepted: 1 February 2023
Published online: 2 July 2023

Keywords:

*Chemical deterioration,
Concrete leaching,
Sustainable exploitation,
Structures of Voshmgir dam and
its irrigation network,
Water security.*

ABSTRACT

This study was aimed to investigate the risk of chemical damages originated from water quality on concrete structures of Voshmgir dam and its irrigation network. In this regard, field survey and water sampling from the dam and its network were carried out in June 2022. In order to determine the intensity of water chemical aggression to concrete, the results of water quality tests were analyzed using soft water aggression indices and well known international standards. Also, the temporal changes of water chemical aggression was investigated using the data received from Golestan water authority. Langelier and Ryznar indices for dam water in June 2021 are -0.6 and 8.6, respectively, and based on these indices, the dam water is corrosive and very corrosive, respectively, and the concrete structure of spillway is exposed to severe soft water attack. In all studied months, there has been aggression risk of at least one damaging agent to concrete. In December 2021, Ryznar index was 8.49 and the amounts of sulfate and magnesium were 400 and 199 mg/liter, respectively, and there has been a risk of simultaneous aggression by three factors of soft water, sulfate and magnesium. Assessment of water quality of Voshmgir dam in five months showed that the water is corrosive in four months and there is a risk of sulfate and magnesium ions reaction with concrete in two months. So, to protect the spillway's concrete structure and lining of irrigation canals against leaching by the corrosive dam water and damages originated from reaction of sulfate and magnesium ions with concrete, utilization of epoxy coatings is suggested.

Cite this article: Anbarsouz, M. S., Ebrahimi, K., & Amiri Tokaldani, E. (2023). Investigation of Water Quality Impact on Structures of Voshmgir Dam and Its Irrigation Network. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13(2), 351-368. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.347832.1016>





مطالعه تأثیر کیفیت آب بر سازه‌های سد و شبکه آبیاری و شمشگیر

محمدصادق عنبرسوز^۱ | کیومرث ابراهیمی^۲ | ابراهیم امیری تکلدانی^۳

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Anbarsouz@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: EbrahimiK@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Amiri@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱</p> <p>کلیدواژه‌ها: امنیت آبی، آبشویی بتن، آسیب شیمیایی، بهره‌برداری پایدار، سازه‌های سد و شبکه آبیاری و شمشگیر.</p>	<p>هدف مطالعه حاضر، بررسی خطر آسیب‌های شیمیایی ناشی از کیفیت آب به سازه‌های بتنی در سد و شبکه آبیاری و شمشگیر بوده است. در این مطالعه، بازدید میدانی و نمونه‌برداری از آب سد و شبکه و شمشگیر در خردادماه ۱۴۰۱ انجام شد. به‌منظور تعیین شدت تهاجم شیمیایی آب به بتن نتایج آزمایش‌های کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های تهاجم آب نرم و استانداردهای متداول بین‌المللی تحلیل شد. همچنین تغییرات زمانی تهاجم شیمیایی آب با استفاده از داده‌های دریافت شده از شرکت آب منطقه‌ای گلستان بررسی شد. شاخص‌های لانتزلیر و رایزنر برای آب سد در خردادماه ۱۴۰۱ به‌ترتیب برابر ۰/۶- و ۸/۶ و براساس این شاخص‌ها آب سد به‌ترتیب خورنده و بسیار خورنده است و سازه بتنی سرریز سد در معرض تهاجم شدید آب نرم قرار دارد. در تمام ماه‌های مطالعه‌شده خطر تهاجم حداقل یکی از عوامل آسیب‌رسان به بتن وجود داشته است. در آذرماه ۱۴۰۰ شاخص رایزنر برابر ۸/۴۹ و مقادیر سولفات و منیزیم به‌ترتیب ۴۰۰ و ۱۹۹ میلی‌گرم در لیتر بوده و در این ماه خطر تهاجم همزمان سه عامل آب نرم، سولفات و منیزیم وجود داشته است. بررسی کیفیت آب سد و شمشگیر در پنج ماه نشان داد که در چهار ماه آب خورنده است و در دو ماه خطر واکنش یون‌های سولفات و منیزیم با بتن وجود دارد. لذا به‌منظور محافظت از سازه بتنی سرریز و پوشش کانال‌های آبیاری در برابر آب خورنده سد و آسیب‌های ناشی از واکنش یون‌های سولفات و منیزیم محلول در آب با بتن، استفاده از پوشش‌های اپوکسی توصیه می‌شود.</p>

استناد: عنبرسوز، محمدصادق؛ ابراهیمی، کیومرث و امیری تکلدانی، ابراهیم (۱۴۰۲). مطالعه تأثیر کیفیت آب بر سازه‌های سد و شبکه آبیاری و شمشگیر.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۲)، ۳۶۸-۳۵۱. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.347832.1016>



۱. مقدمه

یکی از جنبه‌های مهم سازه‌های بتنی آبی سلامت و دوام آن‌ها طی بهره‌برداری است که متأثر از ارتباط بین بتن و محیطی است که با آن در تماس است (Otieno *et al.*, 2017). خاصیت تهاجمی آبی که در مخازن سدها یا شبکه‌های آبیاری در تماس با سازه‌های بتنی است، می‌تواند طی آسیب به سازه‌های آبی موجب افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها و همچنین کاهش عمر مفید آن‌ها بشود. خاصیت تهاجمی آب ممکن است به دلیل مواد شیمیایی محلول در آب یا در بسیاری از موارد به دلیل خلوص آب باشد و با توجه به موقعیت جغرافیایی و نوع سازه بتنی به طور قابل توجه متفاوت خواهد بود (Mason, 1990).

آبشویی بتن^۱ توسط آب نرم^۲، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر دوام بتن ساخته‌شده با سیمان پرتلند^۳ است (Han *et al.*, 2014). آبشویی بتن شامل فرایندهای انحلال و انتقال مواد سیمانی به بیرون از بتن توسط آب خورنده است (Behera, 2019). هرچه آب خاصیت خوردگی شدیدتری داشته باشد، مقدار بیش‌تری از مواد سیمانی را در خود حل می‌کند (Mariana and Cornel, 2011). نظر به این‌که نشت آب و آبشویی بتن مشکلی رایج در سازه‌های آبی است، پایش و مطالعه آن به لحاظ تأثیر آن در ایمنی سازه‌ها اهمیت زیادی دارد (ICOLD, 1989). غلظت کم یون‌های محلول در آب نرم باعث تمایل آب به انحلال کلسیم هیدروکسید موجود در سیمان بتن، جهت برقراری تعادل یونی در آب می‌شود (Prabhakar *et al.*, 2016). با ادامه فرایند آبشویی کلسیم هیدروکسید، در نهایت تمام سیمان سخت‌شده بتن تجزیه شده و از بتن فقط سنگدانه‌ها و هیدرات‌های سیلیکا، اکسید آهن و آلومینا باقی می‌ماند (ICOLD, 1989). همچنین کلسیم تأثیر زیادی در مقاومت بتن دارد و آبشویی آن سبب افزایش شدت سایر فرایندهای فرسایش بتن نظیر تهاجم شیمیایی یون‌های منیزیم، آمونیوم و سولفات موجود در آب می‌شود (Prabhakar *et al.*, 2016; Ballim *et al.*, 2009). وجود کربن‌دی‌اکسید محلول در آب نیز موجب واکنش کربنیک‌اسید با کربنات کلسیم و تولید بی‌کربنات کلسیم می‌شود. به دلیل انحلال‌پذیری زیاد بی‌کربنات کلسیم در آب، این یون به راحتی از داخل بتن شسته می‌شود و بدین طریق سیمان بتن با سرعت بیش‌تری تجزیه می‌شود (Behera, 2019). به دنبال آبشویی سیمان و ظاهر شدن سنگدانه‌های بتن، ضریب زبری پوشش بتنی کانال‌ها و تونل‌های انتقال آب افزایش می‌یابد که بهره‌برداری از آن‌ها را برای انتقال دبی طراحی‌شده با مشکل مواجه کند. از طرفی آبشویی سیمان و افزایش زبری پوشش بتنی تونل‌های انتقال آب منجر به افزایش افت انرژی اصطکاکی^۴ و در نتیجه کاهش بهره‌وری تولید انرژی در نیروگاه‌های برقایی خواهد شد. ایجاد مسیره‌های نشت و فرار آب در کانال‌ها و مخازن سدها در پی بزرگ شدن منافذ بتن، افزایش فشار بالا برنده در سدها و کاهش وزن سدهای بتنی وزنی، از دیگر آثار منفی آبشویی سیمان بتن هستند (ICOLD, 1989).

بنابراین با بررسی و مطالعه کیفیت آب می‌توان وضعیت خطر آسیب‌های شیمیایی ناشی از کیفیت آب به سازه‌های بتنی را تعیین و اقدامات ترمیمی مناسب را پیشنهاد کرد (Anand *et al.*, 2015; Mohd-Asharuddin *et al.*, 2015). پایش و تحلیل کیفیت آب مخازن سدها و آب نشت یافته از بتن‌های سازه‌ای در آن‌ها نیز موجب اطلاع از شدت آسیب‌های شیمیایی به بتن خواهد شد (Wankhade, 2015). همچنین استفاده از شاخص لانزلییر^۵ جهت ارزیابی خطر تهاجم آب نرم به سازه‌های آبی بتنی، توصیه شده است (ICOLD, 1989). غلظت یون سولفات در آب چنانچه از یک حد مشخص فراتر باشد، خطر آسیب‌های ناشی از واکنش یون سولفات با سازه‌های بتنی وجود خواهد داشت. واکنش یون سولفات با ترکیبات سیمان می‌تواند به صورت تبدیل کلسیم هیدروکسید در سیمان سخت‌شده به کلسیم سولفات هیدراته و یا تبدیل کلسیم آلومینات و آهن‌های هیدراته به کلسیم سولفو آلومینات و آهن هیدراته باشد (ICOLD, 1989). فرآورده‌های هر دو واکنش ترکیبات منبسط شونده‌ای هستند که موجب ایجاد فشار درونی در بتن و تخریب پیش‌رونده

آن می‌شوند (ICOLD, 1989; Ayers and Westcot, 1985). یون سولفات به طریق دیگری نیز می‌تواند آسیب‌زا باشد و با تولید ترکیبات کاهنده مقدار pH، سبب تجزیه هیدرات‌های سیلیکات کلسیم می‌شود. طی این فرایند به مانند تهاجم آب نرم، در نهایت سیمان بتن شسته شده و سنگدانه‌های آن باقی می‌مانند (ICOLD, 1989). هم‌چنین با کاهش pH، خطر خوردگی^۶ آرماتورهای داخل بتن نیز افزایش می‌یابد (ICOLD, 1989).

قبل از احداث سد آیگوبلانچ^۷ در فرانسه، با تحلیل کیفیت آب خطر آسیب‌های شیمیایی به سد ناشی از واکنش یون سولفات با بتن شناسایی و از سیمان مقاوم در برابر سولفات برای تمام بتن‌های سازه‌ای استفاده شد. اما از آنجا که استفاده از سیمان ضد سولفات، به بخش‌های پی^۸ سد گسترش نیافت، در نهایت سبب ایجاد مسیر نشت از داخل و زیر پی سد شد و به‌منظور انتقال زهاب، تونل مجزایی ساخته شد (Mason, 1990). Bhuyan *et al.* (2022) تأثیر کیفیت آب را بر سازه یک سد در هند بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شاخص لانتزلیر و تحلیل کیفیت آب مخزن و آب نشت‌یافته از سرریز سد، دریافته‌اند که آب در قسمت‌های مختلف سازه سد خاصیت خوردگی و رسوب‌گذاری دارد. هم‌چنین گزارش کردند که آب نشت‌یافته از سرریز سد بسیار خورنده است و سبب ایجاد درز و شکاف در سرریز سد می‌شود. Behera (2019) با مقایسه خصوصیات کیفیت آب مخزن و گالری بهره‌برداری سد هیراکود^۹ در هندوستان و استفاده از شاخص لانتزلیر، نتیجه گرفت که مطابق مشاهدات تجمع کلسیم‌کربنات در گالری سد، بتن سد در معرض تهاجم آب نرم قرار دارد. Koszelnik *et al.* (2018) با نمونه‌برداری از آب چهار سد کوتاه در جنوب‌شرقی لهستان و تحلیل کیفیت نمونه‌های آب، با استفاده از شاخص‌های رایزنر^{۱۰} و لانتزلیر به بررسی تهاجم آب نرم و آبشویی سازه‌های بتنی پرداخته و نتیجه گرفتند که بتن سد در معرض آب خورنده است. Otieno *et al.* (2017) با استفاده از شاخص خوردگی، تأثیر تهاجم آب نرم را به پوشش بتنی تونل انتقال آب نیروگاه برقابی اینگولا^{۱۱} در آفریقای جنوبی بررسی کرده و دریافته‌اند که آب بخش‌های مختلف تونل خورنده یا بسیار خورنده است و آبشویی پوشش بتنی موجب افزایش زبری تونل و کاهش بهره‌وری تولید برق به میزان ۰/۹۳ درصد شده است. آن‌ها با انجام آزمایش دریافته‌اند که سطح بتن با نرخ متوسط سالانه حدود ۱/۱ میلی‌متر، در معرض فرسایش است و به‌منظور محافظت از بتن، استفاده از پوشش‌های اپوکسی را پیشنهاد کردند. Prabhakar *et al.* (2016) تأثیر کیفیت آب بر بتن را در محل احداث نیروگاه برقابی تورگا^{۱۲} در هند، با استفاده از شاخص لانتزلیر و تحلیل پارامترهای کیفیت آب بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که از میان ۱۸ نمونه آب، نه نمونه آب خاصیت خورنده دارد و مطابق استاندارد USBR (1981) خطر حملات سولفات وجود ندارد. هم‌چنین با استفاده از استاندارد French National Code p-018 (1985)، خطر تهاجم شیمیایی پارامترهای pH، منیزیم، سولفات و آمونیوم به بتن را بررسی و مشاهده کردند که pH آب نمونه‌برداری شده از محل پیشنهادی احداث نیروگاه، کم‌تر از ۶/۵ است و خطر تهاجم شیمیایی آب به بتن وجود دارد.

سد و شبکه آبیاری و شمشگیر نقش مهمی در ذخیره‌سازی و تامین آب کشاورزی استان گلستان دارند. این مجموعه تاکنون از نظر آسیب‌های شیمیایی ناشی از کیفیت آب که طی بهره‌برداری به‌وجود می‌آیند، مطالعه نشده است. در پژوهش حاضر طی انجام بازدیدهای میدانی، نمونه‌برداری از آب سد و شبکه آبیاری و شمشگیر صورت گرفت و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پارامترهای کیفیت آب مربوطه اندازه‌گیری شد. سپس با تحلیل شاخص‌های تهاجم آب نرم و استفاده از استانداردهای شناخته‌شده بین‌المللی، وضعیت خطر آسیب‌های شیمیایی به سازه‌های سد و شبکه آبیاری و شمشگیر مورد مطالعه قرار گرفت. هم‌چنین با تحلیل داده‌های دریافت‌شده از شرکت آب منطقه‌ای گلستان، تغییرات زمانی شدت تهاجم شیمیایی آب بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

سد وشمگیر در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و در عرض ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی در شمال شرقی شهر آق‌قلا و در فاصله ۴۲ کیلومتری این شهر در محلی به نام سنگرسوار بر روی رودخانه گرگانرود احداث شده است. حوزه آبخیز این سد تا محل احداث حدود ۷۱۵۶ کیلومترمربع وسعت دارد و محیط آن ۴۹۷ کیلومتر می‌باشد. همزمان با احداث سد، بهره‌برداری از شبکه آبیاری وشمگیر نیز با ۱۰۷۹۱ هکتار اراضی تحت پوشش آغاز شد (Yousefi, 1991). در جدول (۱) مشخصات سد وشمگیر و سرریز آن ارائه شده است.

Table 1. Characteristics of Voshmgir dam and its spillway (Yousefi, 1991)

Voshmgir dam characteristics	Value
Reservoir capacity in normal level	42 million m ³
Lake in normal level	15 km ²
Elevation of spillway	20 m
Reservoir level in design flood	21.5 m
Maximum capacity of spillway	1400 m ³ /s

۲-۲. داده‌های کیفیت آب

ویژگی‌های کیفیت آب نمونه‌های آب جمع‌آوری شده از سد و شبکه آبیاری وشمگیر در خردادماه ۱۴۰۱ در آزمایشگاه کیفیت آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران و براساس استاندارد APHA (2017) اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش‌های کیفیت آب در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Chemical analysis of water sampled from Voshmgir reservoir and operation gallery of its spillway (sampling date April 2022, the units of ions concentration, CO₂ and TDS are mg/l)

Location of water sample	Longitude			Latitude			pH	EC (microS/cm)	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₂
	D	M	S	D	M	S							
Voshmgir Dam	54	44	10	37	12	34	7.51	1762	1128	32	87.5	225.8	17.6
Voshmgir dam drainage gallery I	54	44	11	37	12	33	7.11	7900	7000	192	439.8	97.6	15.8
Voshmgir dam drainage gallery II	54	44	13	37	12	32	6.64	12830	12000	308	274.6	54.9	17.6
Voshmgir dam drainage gallery III	54	44	14	37	12	31	7.21	15970	13000	288	435.0	79.3	14.1
Voshmgir irrigation network (main canal entrance)	54	41	31	37	12	28	7.14	1745	1117	56	199.3	231.9	14.1

هم‌چنین به‌منظور بررسی و تحلیل تغییرات زمانی ویژگی‌های ته‌اجمی آب، داده‌های ماهیانه کیفیت آب مخزن سد وشمگیر مربوط به ماه‌های آبان، آذر و اسفند سال ۱۴۰۰ و فروردین ۱۴۰۱ از شرکت آب منطقه‌ای گلستان دریافت شد که در جدول (۳) ارائه شده است.

Table 3. Monthly water quality data of Voshmgir reservoir received from Golestan water authority. TDS, Hardness and ions concentration are in mg/l

Date	EC (microS/cm)	TDS	pH	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Total Hardness
2021/11	2920	1839	8.2	84	0.1	170.2	180.4	280.7	1150
2021/12	4530	2853	8.1	940	0.8	194.5	200.4	244.1	1300
2022/03	1124	708	7.6	80	0.4	82.7	44.1	402.7	450
2022/04	1834	1155	7.8	320	1.0	88.7	94.2	292.9	600

۲-۳. شاخص‌های بررسی ته‌اجم آب نرم

۲-۳-۱. شاخص لانزلیبر

به‌منظور تعیین خاصیت رسوب‌گذاری یا خوردگی آب و ارزیابی خطر ته‌اجم آب نرم به سازه‌های آبی بتنی، محاسبه

شاخص لانژیر توسط ICOLD (1989) توصیه شده است. این شاخص که توسط Langlier (1936) معرفی شده برابر تفاضل pH واقعی آب و pH حالت اشباع کلسیم کربنات است و از رابطه (۱) به دست می آید. مقدار pHs در رابطه (۱) نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می شود (Morton, 1977).

$$LI = pH - pH_s \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$pH_s = 12.3 - \log(C) - \log(A) - 0.025 * T + 0.011 * \sqrt{S} \quad \text{رابطه (۲)}$$

پارامترهای C، A، T و S در رابطه (۲) به ترتیب برابر با غلظت یون های کلسیم و بی کربنات بر حسب میلی گرم کلسیم کربنات در لیتر، دما بر حسب درجه سانتی گراد و جامدات محلول در آب بر حسب میلی گرم در لیتر هستند. مقادیر منفی شاخص لانژیر بیان گر خورنده بودن آب و وجود خطر آشوبی توسط آب نرم است. در صورتی که این شاخص از ۱/۵- نیز کوچک تر باشد، آب بسیار خورنده و بتن در معرض خطر تهاجم شدید آب نرم است (ICOLD, 1989). از طرفی در صورت مثبت بودن شاخص، احتمال ترسیب کلسیم وجود دارد (ICOLD, 1989).

۲-۳-۲. شاخص پایداری رایزنر

به منظور رفع ابهام در تفسیر نوع آبها با شاخص لانژیر مثبت به عنوان غیر خورنده یا رسوب گذار، شاخص دیگری به نام شاخص پایداری توسط Ryznar (1944) پیشنهاد شد. با استفاده از این شاخص، خاصیت رسوب گذاری یا خوردگی آب، با دقت بیش تری تعیین می شود (Ryznar, 1944). شاخص رایزنر برای همه آبها مقداری مثبت است و از رابطه (۳) محاسبه می شود. مقدار pHs در رابطه (۳) نیز از رابطه (۲) به دست می آید.

$$RSI = 2 * pH_s - pH \quad \text{رابطه (۳)}$$

بر اساس شاخص رایزنر، طبقه بندی آبها مطابق جدول (۴) انجام می شود.

Table 4. Degree of corrosiveness of water based on Ryznar index

RSI	Inference (Ryznar and Langelier 1944)
<5.5	Heavy scale will form
5.5-6.2	Scale will form
6.2-6.8	No difficulties
6.8-8.5	Water is aggressive
>8.5	Water is very aggressive

۲-۳-۳. استانداردهای تعیین شدت آسیب های شیمیایی به سازه های آبی بتنی

به منظور ارزیابی خطر آسیب های شیمیایی ناشی از واکنش یون سولفات با بتن در سازه های آبی بتنی مورد مطالعه، از استاندارد USBR (1981) استفاده شد. در این استاندارد مطابق جدول (۵) بر اساس غلظت یون سولفات موجود در آب، شدت تهاجم شیمیایی سولفات و اقدام حفاظتی مناسب ارائه شده است.

Table 5. Sulfate aggression levels and cement requirements (USBR, 1981)

Relative degree of sulfate attack	mg/l sulfate (as SO ₄ ²⁻) in water samples
Negligible	0 to 150
Positive (1)	150 to 1500
Severe (2)	1500 to 10000
Very severe (3)	10000 or more

1. Use type II cement.

2. Use type V cement, or approved combination of Portland cement and pozzolan which has been shown by tests to provide comparable sulfate resistance when used in concrete.

3. Use type V cement plus approved pozzolan which has been determined by tests to improve sulfate resistance when used in concrete with type V cement.

در نشریه کیفیت آب کشاورزی سازمان جهانی خواربار و کشاورزی، برای ارزیابی خوردگی آب کشاورزی نسبت به کانال‌های بتنی، استفاده از معیار Biczok (1972) پیشنهاد شده است (Ayers and Westcot, 1985). در جدول (۶) بر مبنای معیار Biczok (1972)، شدت آسیب‌های شیمیایی به بتن براساس مقدار پنج عامل pH آب، CO₂ محلول در آب و یون‌های آمونیوم، منیزیم و سولفات ارائه شده است. جهت بررسی تهاجم شیمیایی آب در شبکه آبیاری و شمشگیر از این معیار استفاده شد.

Table 6. Limit values for evaluating the aggressiveness of water to concrete (Biczok, 1972)

Aggressive agents	Intensity of attack			
	None to slight	Mild	Strong	Very Strong
pH	>6.5	6.5 – 5.5	5.5 – 4.5	<4.5
Lime-dissolving carbonic acid (CO ₂), mg/l	<15	15–30	30–60	>60
Ammonium (NH ₄ ⁺), mg/l	<15	15–30	30–60	>60
Magnesium (Mg ²⁺), mg/l	<100	100–300	300–1500	>1500
Sulfate in water (SO ₄ ²⁻), mg/l	<200	200–600	600–3000	>3000

به‌منظور بررسی خطر آسیب‌های شیمیایی به سازه بتنی سرریز سد و شمشگیر، از استاندارد P18-011 French Standard (1985) که برای آب ساکن یا در جریان با سرعت کم ارائه شده است، استفاده شد. در جدول (۷) مطابق با این استاندارد، شدت آسیب‌های شیمیایی به بتن و اقدام حفاظتی مناسب براساس مقدار هر یک از عوامل مهاجم ارائه شده است.

Table 7. Aggressiveness of water in relation to its concentration of aggressive agents and pH: stagnant or slowly flowing water (French Standard P18-011, 1985)

Condition	Slightly aggressive	Fairly aggressive	Very aggressive	Extremely aggressive
Protection level*	1	2	2	3
Aggressive agents	Concentration in mg/l			
Aggressive CO ₂	15-30	30-60	60-100	>100
SO ₄ ²⁻	250-600	600-1500	1500-6000	>6000
Mg ²⁺	100-300	300-1500	1500-3000	>3000
NH ₄ ⁺	15-30	30-60	60-100	>100
pH	6.5-5.5	5.5-4.5	4.5-4	<4

* Protection levels:

1. Not special measures.

2. Adaptation of composition and implementation to the conditions of the environment (proportion of cement, category of cement, W/C, curing, additives)

3. Necessity for external protection (coatings, paint) or internal protection (impregnation).

به‌منظور تعیین شدت آسیب‌های شیمیایی ناشی از واکنش یون سولفات موجود در آب با بتن و هم‌چنین مقایسه معیارهای مختلف در طبقه‌بندی شدت تهاجم شیمیایی آب، از استاندارد CSA A23.1 (2019) استفاده شد. در این استاندارد مطابق جدول (۸) شدت آسیب‌های شیمیایی به بتن، براساس غلظت یون سولفات موجود در آب تعیین شده است.

Table 8. Sulfate attack classification based on SO₄ concentration in water (Canadian Standard Association Standard A23.1, 2019)

SO ₄ ²⁻ ion concentration (ppm)	Severity of attack
<150	Negligible
150-1000	Mild but positive
1000-2000	Considerable
>2000	Severe

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل کیفیت آب سد وشمگیر در خردادماه ۱۴۰۱

در جدول (۹) نتایج آزمایش‌های کیفیت آب سد وشمگیر در خردادماه ۱۴۰۱ به همراه مقادیر شاخص‌های خوردگی ارائه شده است. مقدار pH برابر ۷/۵ و نشان‌دهنده خاصیت بازی آب سد است. از آنجا که pH آب مخزن سد بزرگ‌تر از ۶/۵ است، براساس معیارهای جدول‌های (۶) و (۷) خطری برای سازه‌های بتنی محسوب نمی‌شود. مقدار CO₂ محلول در آب سد برابر ۱۷/۶ میلی‌گرم در لیتر است و به دلیل قرارگیری در بازه ۱۵ تا ۳۰ میلی‌گرم در لیتر، مطابق معیار French Standard P18-011 (1985) خاصیت تهاجمی آب کم بوده است. همچنین غلظت یون‌های منیزیم و سولفات به ترتیب کم‌تر از ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر بوده که براساس معیارهای جدول‌های (۵) تا (۸) کم‌تر از حد خطر تهاجم به بتن بوده است.

Table 9. Chemical analysis of Water sampled from Voshmgir reservoir in April 2022 along with the aggressivity indices

Sample	pH	EC (microS/cm)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	CO ₂ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Langelier index	Ryznar index
Voshmgir Dam	7.5	1762.0	32.0	87.5	225.8	17.6	71.9	-0.6	8.6

۳-۲. بررسی تهاجم آب نرم به سرریز سد وشمگیر در خردادماه ۱۴۰۱

شدت خوردگی آب سد وشمگیر در خردادماه سال ۱۴۰۱ با محاسبه شاخص‌های لانژلیر و رایزنر بررسی شد. شاخص لانژلیر برابر ۰/۶- و کوچک‌تر از صفر است که نشان از خوردنده بودن آب سد و خاصیت تهاجمی آن نسبت به بتن دارد. شاخص پایداری رایزنر برای آب سد برابر ۸/۶ و از مرز آب بسیار خوردنده (۸/۵) بیش‌تر است. براساس شاخص رایزنر که بالاترین دقت را در برآورد خاصیت تهاجمی آب دارد (Ryznar, 1944)، آب مخزن بسیار خوردنده است. بنابراین براساس هر دو شاخص، آب سد خوردنده است و سرریز بتنی سد در معرض تهاجم شدید آب نرم قرار دارد.

به‌منظور بررسی کمی آبشویی سازه بتنی سرریز سد وشمگیر توسط آب ذخیره‌شده در مخزن سد، خصوصیات کیفیت آب مخزن سد و زهاب گالری بهره‌برداری سرریز، مربوط به خردادماه سال ۱۴۰۱ مقایسه شد. نمونه‌برداری زهاب از سه نقطه به فاصله طولی یکسان در امتداد گالری بهره‌برداری سرریز سد انجام شد. در شکل (۱) مقدار یون‌های کلسیم و منیزیم موجود در آب مخزن و قسمت‌های مختلف گالری بهره‌برداری سرریز ارائه شده است که نقاط یک، دو و سه به ترتیب مربوط به ابتدا، میانه و انتهای گالری سرریز است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، مقدار کلسیم از ۳۲ میلی‌گرم در لیتر برای آب مخزن به حدود ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در زهاب قسمت‌های میانی و انتهایی گالری سرریز افزایش یافته است. غلظت کلسیم در زهاب ابتدای گالری سرریز نسبت به آب مخزن سد ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافته است. افزایش قابل‌ملاحظه غلظت کلسیم در زهاب گالری سرریز نسبت به آب مخزن سد، دلالت بر آبشویی ترکیبات کلسیم از سرریز بتنی سد و تهاجم آب نرم دارد. از آنجا که کلسیم تأثیر زیادی در مقاومت بتن دارد (Prabhakar et al., 2016)، آبشویی ترکیب‌های کلسیم‌دار از سازه بتنی سرریز سد موجب کاهش مقاومت بتن‌های سازه‌ای خواهد شد. طبق شکل (۱) مقدار منیزیم در زهاب ابتدا، میانه و انتهای گالری سرریز نسبت به آب مخزن به ترتیب ۳۵۲، ۱۸۷ و ۳۴۷ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافته است.

در شکل (۲) مقادیر هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و سختی مجموع کلسیم و منیزیم برای آب سد وشمگیر و آب نشت‌یافته به قسمت‌های مختلف گالری بهره‌برداری سرریز مربوط به خردادماه ۱۴۰۱ نشان داده شده است. به‌طور متوسط سختی زهاب گالری سرریز در مقایسه با آب مخزن سد بیش از پنج برابر افزایش یافته است که گواه دیگری بر آبشویی کلسیم و منیزیم از بتن سرریز سد می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، مقدار EC برای زهاب ابتدا، میانه و انتهای گالری سرریز به ترتیب بیش از

چهار، هفت و نه برابر هدایت الکتریکی آب مخزن سد است. براساس شکل (۳) بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف مقدار هدایت الکتریکی آب مخزن سد و زهاب گالری سرریز به‌ترتیب با مقادیر ۱۴۲۰۸ و ۶۱۳۸ میکروزیمنس در سانتی‌متر در انتها و ابتدای گالری ثبت شده است. این یافته بیانگر افزایش قابل‌ملاحظه یون‌های محلول در آب نشت‌یافته به گالری سرریز سد نسبت به آب مخزن است.

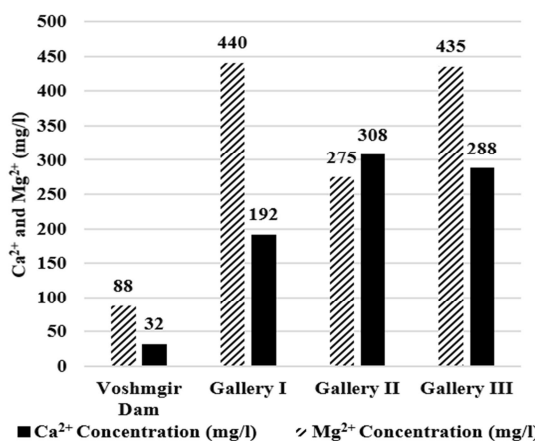


Figure 1. Concentrations of Mg²⁺ and Ca²⁺ in mg/l present in water samples in April 2022

از آنجایی که مقدار هدایت الکتریکی برای زهاب قسمت‌های میانی و انتهای گالری، بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ میکروزیمنس در سانتی‌متر است، احتمال وجود جامدات محلول اما یونیزه‌نشده در زهاب این دو قسمت از گالری زیاد است. بنابراین مقدار هدایت الکتریکی زهاب میانه و انتهای گالری، معرف بخش یونیزه‌شده جامدات محلول در زهاب است. لذا جهت بررسی کمی و دقیق فرایند آبشویی سرریز بتنی سد، جامدات محلول در آب مخزن سد و زهاب قسمت‌های مختلف گالری آن مقایسه شدند. براساس شکل (۲) مقدار کل جامدات محلول در زهاب ابتدا، میانه و انتهای گالری سرریز نسبت به آب مخزن سد به‌ترتیب بیش از ۵۸۷۲، ۱۰۸۷۲ و ۱۱۸۷۲ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافته است. در شکل (۳) مشاهده می‌شود به‌دلیل مساعدبودن شرایط، آب نشت‌یافته به داخل گالری بهره‌برداری سرریز تبخیر شده و املاح شسته‌شده از بتن سرریز را بر روی سقف گالری بر جای گذاشته است.

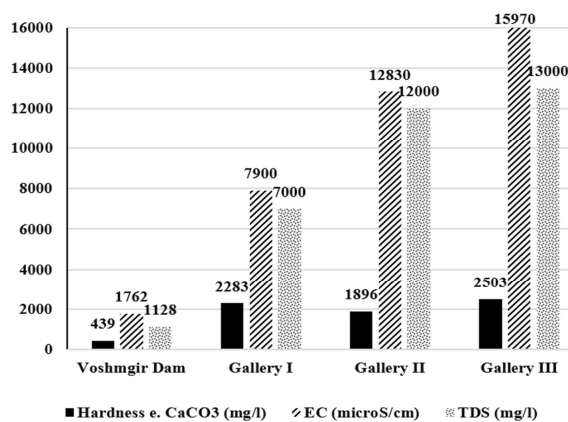


Figure 2. Total dissolved solids, EC and Hardness for water of Voshmgir reservoir and different locations of its spillway's gallery in April 2022.



Figure 3. Deposition of Leached materials out of concrete on the wall of spillway's gallery (photo taken in April 2022)

آبشویی سرریز بتنی سد به واسطه تهاجم آب نرم، موجب بزرگ شدن منافذ داخل بتن و افزایش تخلخل مؤثر آن می‌شود. از طرفی نفوذپذیری بتن با مقاومت آن در محیط‌های خورنده رابطه معکوس دارد، تا آنجا که در چنین محیط‌هایی استفاده از بتن با نفوذپذیری کم یا نفوذناپذیر توصیه شده است (ICOLD, 1989). از این رو، آبشویی سرریز بتنی سد و شمشگیر، آن را نسبت به تهاجم دیگر حملات شیمیایی آب آسیب‌پذیرتر می‌کند. در شکل (۴) آثار خوردگی آرماتورهای داخل بتن در گالری بهره‌برداری سرریز مشهود است.



Figure 4. Corrosion signs of embedded reinforcement in concrete structure of Voshmgir dam's spillway (photo taken from operation gallery of spillway in April 2022)

۳-۳. کیفیت آب شبکه آبیاری و شمشگیر در خردادماه ۱۴۰۱

ویژگی‌های کیفیت آب ابتدای کانال راست شبکه آبیاری و شمشگیر در خردادماه ۱۴۰۱ به همراه شاخص‌های تهاجم آب نرم در جدول (۱۰) ارائه شده است. مقدار pH برابر ۷/۱۴ و نزدیک محدوده خنثی است و چون بیش‌تر از ۶/۵ است براساس معیارهای جدول‌های (۶) و (۷) خطری برای پوشش بتنی کانال محسوب نمی‌شود. مطابق جدول (۱۰) غلظت منیزیم برابر ۱۹۹/۲۶ میلی‌گرم در لیتر است و مطابق طبقه‌بندی Biczok (1972) در جدول (۶)، شدت تهاجم شیمیایی یون منیزیم در رده متوسط است. براساس استاندارد French Standard P18-011 (1985)، آب شبکه نسبتاً خورنده و اقدام خاصی برای حفاظت از بتن توصیه نشده است. از آنجا که استاندارد French Standard P18-011 (1985) برای آب ساکن یا در جریان با سرعت کم ارائه شده است (جدول ۷)، سایر معیارهایی که محدودیتی در کاربرد آن‌ها وجود ندارد، برای تحلیل کیفیت آب شبکه آبیاری که با سرعت متوسط در جریان است، با اطمینان بیش‌تری قابل استفاده هستند. مقدار کربن‌دی‌اکسید محلول در آب شبکه کم‌تر از ۱۵ میلی‌گرم در لیتر و مطابق معیار Biczok (1972)، شدت تهاجم شیمیایی آب به بتن کم تا ناچیز است. غلظت سولفات در آب ورودی به شبکه آبیاری و شمشگیر ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و از آستانه خطر تمامی معیارهای استفاده‌شده در این پژوهش بیش‌تر است. براساس استانداردهای USBR (1981) و CSA Standard A23.1 (2019) خطر حملات سولفات به پوشش بتنی کانال‌های آبیاری وجود دارد و در این شرایط براساس استاندارد USBR (1981) استفاده از سیمان نوع دو پیشنهاد

می‌شود. طبق معیار Biczok (1972) نیز شدت تهاجم سولفات متوسط است. شاخص لانژلیر برای آب شبکه برابر $0/68$ - است که نشان از خاصیت خوردگی آب دارد. همچنین شاخص رایزنر برابر $8/49$ و به مرز آب بسیار خورنده ($8/5$) نزدیک است. باتوجه به مشابه بودن نتایج شاخص‌های تهاجم آب نرم برای آب سد و شبکه وشمگیر، می‌توان به شدت فرسایش پوشش بتنی شبکه آبیاری وشمگیر به واسطه تهاجم آب نرم پی برد. علاوه بر این از آنجایی که برای آب شبکه، شدت تهاجم شیمیایی منیزیم و سولفات نیز متوسط است، به دلیل تهاجم سه عامل، حملات شیمیایی آب به بتن شدیدتر خواهد بود. در این حالت که خطر تهاجم شیمیایی سه عامل به‌طور همزمان وجود دارد، اثر مخرب هر عامل نسبت به زمانی که تنها خطر تهاجم شیمیایی آن عامل وجود دارد، بیش‌تر است (ICOLD, 1989). در صورتی که اقدامات حفاظتی در برابر تهاجم شیمیایی به بتن انجام نشود، طی بهره‌برداری از شبکه آبیاری، مشکلاتی نظیر ایجاد منافذ نشت آب و افزایش زبری سطح کانال در پی شسته‌شدن سیمان بتن و ظاهرشدن سنگدانه‌های آن، به‌وجود خواهد آمد.

Table 10. Water quality characteristics of right irrigation canal of Voshmgir network in April 2022

Location of water sample	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₂	SO ₄ ²⁻	Langelier index	Ryznar index
Voshmgir irrigation net	7.14	1745	56.00	199.26	14.08	400.35	-0.68	8.49

۴-۳. بررسی تغییرات زمانی کیفیت آب سد وشمگیر

به‌منظور بررسی تغییرات زمانی شاخص‌های خوردگی و خطر تهاجم شیمیایی آب به سازه‌های بتنی، داده‌های کیفیت آب سد وشمگیر مربوط به ماه‌های آبان، آذر و اسفند ۱۴۰۰ و فروردین ۱۴۰۱ از شرکت آب منطقه‌ای گلستان دریافت و با استفاده از استاندارد French Standard P18-011 (1985) تحلیل شد. استاندارد French Standard P18-011 (1985) برای ارزیابی تهاجم شیمیایی آب ساکن و یا آبی که با سرعت کم جریان دارد ارائه شده و برای تحلیل کیفیت آب مخزن سد مناسب است. در شکل (۵) تغییرات زمانی شاخص لانژلیر برای آب مخزن سد وشمگیر ترسیم شده است که خط افقی $LI=0$ در این شکل مربوط به وضعیت پایدار است که آب در این شرایط خاصیت خوردگی و رسوب‌گذاری ندارد. در بالای و پایین این خط، شاخص لانژلیر به‌ترتیب مثبت و منفی است که به‌ترتیب معرف آب رسوب‌گذار و خورنده می‌باشد. در اسفندماه ۱۴۰۰ و خردادماه ۱۴۰۱ شاخص لانژلیر منفی و آب سد خورنده است. در فروردین‌ماه ۱۴۰۱ شاخص لانژلیر مثبت و آب در وضعیت پایدار است. در ماه‌های آبان و آذر از فصل پاییز سال ۱۴۰۰، شاخص لانژلیر به‌ترتیب برابر $0/81$ و $0/58$ بوده که نشان‌دهنده تمایل آب به رسوب‌گذاری است.

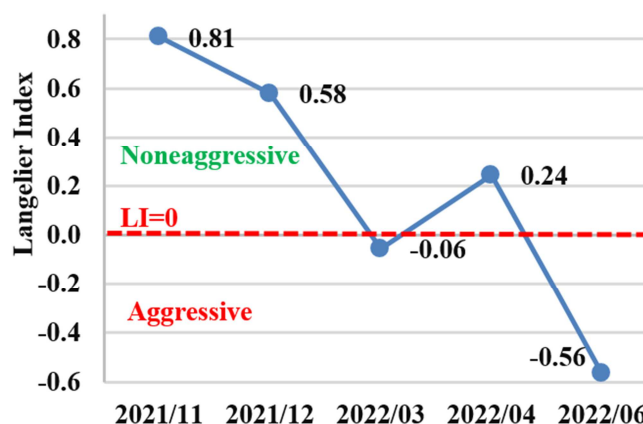


Figure 5. Temporal variation of Langelier index for water of Voshmgir reservoir

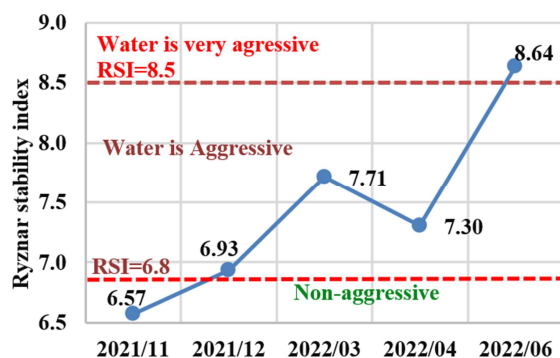


Figure 6. Temporal variation of Ryznar stability index for water of Voshmgir reservoir

تغییرات زمانی شاخص پایداری رایزنر در شکل (۶) نشان داده شده است و دو خط افقی $RSI=6/8$ و $RSI=8/5$ در این شکل به ترتیب نشان دهنده مرز آب خورنده و بسیار خورنده هستند. چنانچه مقدار شاخص رایزنر در زیر خط $RSI=6/8$ ، میان دو خط افقی $RSI=6/8$ و $RSI=8/5$ و یا بالای خط $RSI=8/5$ قرار گیرد، آب به ترتیب غیر خورنده، خورنده و بسیار خورنده خواهد بود. بر خلاف شاخص لانتزیر، هر قدر شاخص رایزنر بزرگتر باشد، خاصیت خورندگی آب بیش تر است. همان طور که در شکل های (۵) و (۶) مشاهده می شود، روند تغییرات زمانی خاصیت خورندگی آب مخزن براساس شاخص های لانتزیر و رایزنر مشابه است. در بازه های زمانی که تغییرات شاخص لانتزیر کاهشی یا افزایشی است، شاخص رایزنر به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. شاخص رایزنر آب مخزن در آذرماه ۱۴۰۰ و فروردین ماه ۱۴۰۱ به ترتیب برابر $6/93$ و $7/30$ است و آب مخزن در این دو ماه خاصیت خورنده دارد. این در حالی است که شاخص لانتزیر در این دو ماه مثبت و آب خاصیت رسوب گذاری دارد. این اختلاف دو شاخص در تعیین نوع آب در ماه های آذر ۱۴۰۰ و فروردین ۱۴۰۱ ناشی از وجود ابهام در تفسیر مقدار مثبت شاخص لانتزیر است. در واقع وقتی شاخص لانتزیر مثبت به دست می آید، نمی توان به طور قطعی در مورد غیر خورنده یا رسوب گذار بودن آب اظهار نظر کرد و باید از شاخص رایزنر استفاده شود (Ryznar, 1944).

با توجه به شکل (۶) شاخص رایزنر در آبان ماه ۱۴۰۰ برابر $6/57$ و کم تر از مرز خاصیت خورندگی آب ($6/8$) است. در آذرماه ۱۴۰۰ شاخص رایزنر برابر $6/93$ و آب سد در این ماه خورنده است. شاخص رایزنر در اسفندماه ۱۴۰۰ برابر $7/71$ است و با وجود قرارگیری در ناحیه آب خورنده ($6/8$ تا $8/5$)، خاصیت تهاجمی آب نسبت به آذرماه ۱۴۰۰ افزایش یافته است. در شکل (۶) مشاهده می شود که از اسفندماه ۱۴۰۰ تا فروردین ماه ۱۴۰۱، شاخص رایزنر به اندازه $0/41$ کاهش یافته و با وجود خورنده بودن آب سد، از شدت تهاجمی آب کاسته شده است. بیش ترین شدت تهاجم آب نرم به سازه بتنی سرریز سد وشمگیر در خردادماه سال ۱۴۰۱ است. در این ماه شاخص رایزنر بیش از $8/5$ و در محدوده آب بسیار خورنده است. در شکل (۶) مشاهده می شود که از میان پنج ماه مطالعه شده، در چهار ماه آب سد خورنده است و خطر تهاجم آب نرم وجود دارد.

در شکل (۷) تغییرات زمانی مقدار یون کلسیم موجود در آب مخزن سد وشمگیر نشان داده شده است. در ماه های آبان و آذر ۱۴۰۰ که آب سد به ترتیب غیر خورنده و کمی خورنده است (دو نقطه ابتدایی در شکل ۶)، مقدار یون کلسیم موجود در آب سد بیش ترین مقدار خود را در مقایسه با سایر ماه ها دارد. این موضوع دلالت بر تمایل کم تا ناچیز آب سد به آبشویی کلسیم هیدروکسید از بتن در ماه های آبان و آذر سال ۱۴۰۰ دارد. در مقابل در خردادماه ۱۴۰۱ که غلظت یون کلسیم آب سد برابر 32 میلی گرم در لیتر و کم ترین مقدار در میان سایر ماه ها است، مطابق شاخص رایزنر آب سد بسیار خورنده است (نقطه انتهایی شکل های ۶ و ۷). به غیر از ماه های آبان و آذر ۱۴۰۰ که شاخص رایزنر و مقدار کلسیم آب

سد در این دو ماه اختلاف کمی دارد، تغییرات زمانی شاخص رایزنر و مقدار کلسیم به صورت معکوس یکدیگر است. این یافته نشان‌دهنده رابطه معکوس خوردگی آب مخزن سد با مقدار کلسیم موجود در آب سد است.

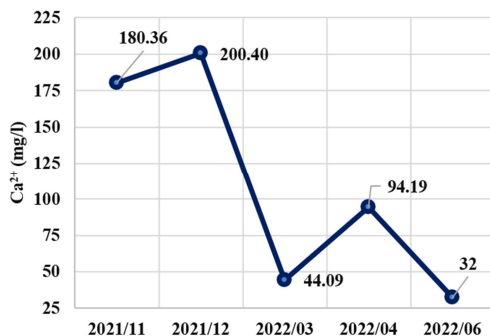


Figure 7. Temporal variation of calcium ion concentration in water of Voshmgir reservoir

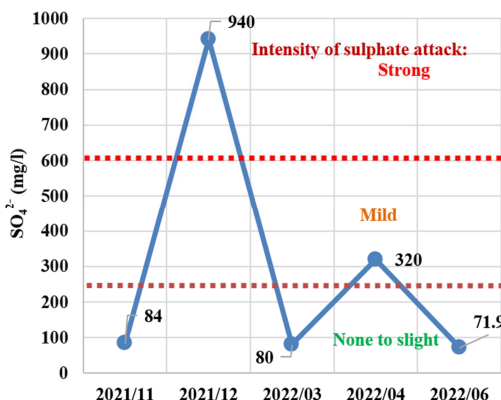


Figure 8. Temporal variation of sulfate ion concentration in water of Voshmgir reservoir

در شکل (۸) تغییرات زمانی غلظت یون سولفات موجود در آب مخزن سد وشمگیر ترسیم شده است. در شکل (۸) ناحیه‌های شدت قوی، متوسط و کم حملات سولفاته به بتن براساس معیار Biczok (1972) و توسط دو خط افقی از یکدیگر تفکیک شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، غلظت سولفات به صورت نوسانی تغییر می‌کند و شدت خطر حملات سولفاته در ماه‌های بررسی شده به صورت متوالی مثبت و ناچیز است. در ماه‌های آبان و اسفند سال ۱۴۰۰ و هم‌چنین خردادماه سال ۱۴۰۱ مقدار سولفات حدود ۸۰ میلی‌گرم در لیتر و از آنجایی که کم‌تر از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر است، براساس چهار معیار جدول‌های (۵) تا (۸) خطر تهاجم سولفات ناچیز است. در آذرماه سال ۱۴۰۰ مقدار سولفات ۹۴۰ میلی‌گرم در لیتر و بیش از ۶/۵ برابر میانگین مقدار سولفات در سایر ماه‌ها است و شدت حملات سولفات در این ماه براساس معیار Biczok (1972) شدید و مطابق استاندارد French Standard P18-011 (1985) قابل ملاحظه است. براساس دو معیار USBR (1981) و CSA Standard A23.1 (2019) نیز خطر حملات سولفات وجود دارد و معیار USBR (1981) استفاده از سیمان نوع دو را برای تهیه بتن در معرض چنین آبی پیشنهاد کرده است. استاندارد French Standard P18-011 (1985) نیز لزوم انطباق ترکیب و اجرا بتن با شرایط محیطی را (شامل نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، شرایط کشت و مواد افزودنی مناسب) به منظور حفاظت در برابر حملات سولفات پیشنهاد کرده است. در فروردین‌ماه سال ۱۴۰۱ غلظت سولفات در آب سد ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر و شدت حملات سولفات متوسط است (شکل ۸).

تغییرات زمانی مقدار یون منیزیم موجود در آب سد وشمگیر در شکل (۹) نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل غلظت منیزیم به ترتیب در ماه‌های آذر و اسفند ۱۴۰۰ ثبت شده است. در ماه‌های آبان و آذر سال ۱۴۰۰، غلظت منیزیم به ترتیب ۱۷۰ و ۱۹۴ میلی‌گرم در لیتر است و از آستانه شدت متوسط تهاجم به بتن (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) فاصله زیادی دارد. از طرفی غلظت منیزیم در اسفندماه سال ۱۴۰۰، ماه‌های فروردین و خرداد سال ۱۴۰۱ در حدود ۸۶ میلی‌گرم در لیتر و در این سه ماه خاصیت تهاجمی آب به واسطه مقدار منیزیم، کم تا ناچیز است. براساس شکل (۹) مقدار منیزیم موجود در آب سد وشمگیر در دو ماه از پنج ماه بررسی شده در وضعیت خطر تهاجم شیمیایی به بتن قرار دارد. در شکل (۱۰) تغییرات غلظت یون آمونیوم و مقدار pH برای آب سد وشمگیر ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار غلظت آمونیوم در آب سد به ترتیب یک و ۰/۱۲ میلی‌گرم در لیتر است. از آنجایی که غلظت آمونیوم همواره بسیار کمتر از آستانه خطر تهاجم شیمیایی به بتن (۱۵ میلی‌گرم در لیتر) است، خطری برای سازه‌های بتنی محسوب نمی‌شود.

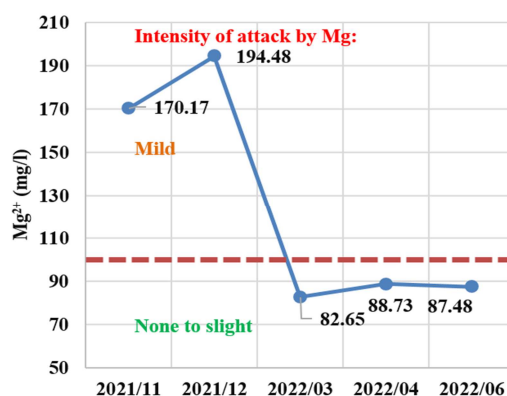


Figure 9. Temporal variation of magnesium ion concentration in water of Voshmگیر reservoir

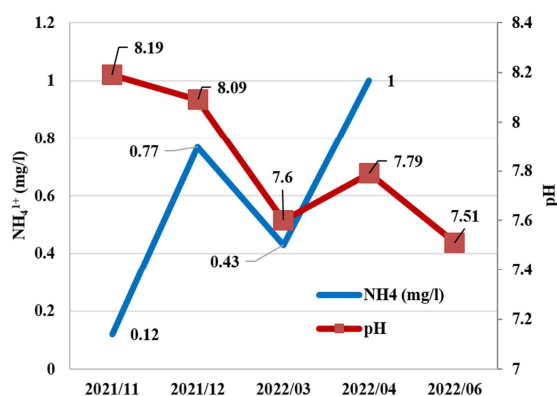


Figure 10. Temporal variation of ammonium ion concentration and pH value in water of Voshmگیر reservoir

با توجه به تغییرات زمانی مقدار pH آب سد در شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود که در ماه‌های بررسی شده تغییرات pH بین ۷/۵۱ و ۸/۱۹ است و آب سد همواره خاصیت بازی دارد. با توجه به این که مقدار pH آب سد همواره بزرگ‌تر از ۶/۵ است، براساس جدول‌های (۶) و (۷) از نظر pH آب سد خطری سازه‌های بتنی را تهدید نمی‌کند.

۳-۵. ارزیابی خطر تهاجم شیمیایی آب به سازه‌های بتنی

پس از بررسی تغییرات زمانی هر یک از عوامل مؤثر بر تهاجم شیمیایی آب به بتن، برای هر ماه شدت خوردندگی عوامل مختلف و تعداد عواملی که خطر تهاجم آن‌ها وجود دارد در جدول (۱۱) ارائه شده است. در آبان‌ماه ۱۴۰۰ با توجه به این که شاخص رایزنر کم‌تر از ۶/۸ است، تهاجم آب نرم وجود ندارد و همچنین خطر حملات سولفاته نیز ناچیز است (جدول ۱۱). در مقابل مقدار منیزیم در آبان‌ماه ۱۷۰ میلی‌گرم در لیتر و بیش از آستانه شدت متوسط تهاجم به بتن (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر). از میان ماه‌های مطالعه شده، بیش‌ترین غلظت یون‌های سولفات و منیزیم مطابق شکل‌های (۸) و (۹) در آذرماه ۱۴۰۰ ثبت شده و شدت حملات شیمیایی سولفات و منیزیم به بتن به ترتیب قوی و متوسط است. همچنین در این ماه آب سد و شمسیر خورنده است و حملات شیمیایی آب سد به سرریز بتنی و پوشش کانال‌های آبیاری در وضعیت بحرانی قرار دارد. در این شرایط به دلیل خطر تهاجم همزمان سه عامل، بر مبنای ICOL (1989) تأثیر مخرب هر یک از عوامل نسبت به زمانی که تنها خطر تهاجم آن وجود دارد، بیش‌تر است. در پژوهشی مشابه، براساس نتایج تحلیل کیفیت آب سد آیگوبالانچ در فرانسه، خطر حملات سولفات شناسایی و به منظور جلوگیری از تخریب بتن‌های سازه‌ای از سیمان مقاوم در برابر سولفات استفاده شد (Mason, 1990). براساس جدول (۱۱) در اسفندماه ۱۴۰۰ تنها عامل آسیب‌رسان به بتن، تهاجم آب نرم است. در فروردین‌ماه ۱۴۰۱ شدت حملات سولفاته کم و آب سد خورنده است. همان‌طور که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود، در خردادماه ۱۴۰۱ آب سد بسیار خورنده و خطر آبشویی سرریز بتنی سد شدید است. با توجه به جدول (۱۱)، در همه ماه‌ها حداقل خطر تهاجم شیمیایی یک عامل به بتن وجود دارد. بیش‌ترین خطر آسیب‌های شیمیایی به بتن در آذرماه ۱۴۰۰ و بعد از آن در فروردین‌ماه ۱۴۰۱ بوده است. در ماه‌های آبان و اسفند ۱۴۰۰ و خردادماه ۱۴۰۱ نیز یک عامل خطر ساز وجود داشته است. همان‌طور که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود تهاجم آب نرم شایع‌ترین مشکل در رابطه با آب سد و شمسیر است.

Table 11. Intensity of different chemical attacks in various studied months and number of attacks for each month

Year	Month	Soft water attack	Intensity of SO_4^{2-} attack	Intensity of attack by Mg^{2+}	Involved agents
2021	November	No difficulties	None to slight	Mild	1
2021	December	Water is aggressive	Strong	Mild	3
2022	March	Water is aggressive	None to slight	None to slight	1
2022	April	Water is aggressive	Mild	None to slight	2
2022	June	Water is very aggressive	None to slight	None to slight	1

آبشویی بتن علاوه بر مشکلاتی که در نشست و فرار آب، خوردگی آرماتورها و پایداری سازه‌های بتنی ایجاد می‌کند، بتن را در معرض فرسایش بیش‌تر سایر عوامل مشکل‌ساز قرار داده و سبب افزایش تأثیر مخرب آن‌ها می‌شود (ICOLD, 1989; Prabhakar et al., 2016; Ballim et al., 2009). Koszelnik et al. (2018) در مطالعه‌ای بر روی خطر تهاجم شیمیایی آب به بتن در چهار سد کوتاه در جنوب شرقی لهستان، نتیجه گرفتند که آب سه سد دارای پتانسیل خوردندگی است. Otieno et al. (2017) در پژوهش مشابهی با محاسبه شاخص خوردندگی تهاجم آب نرم را به پوشش بتنی تونل انتقال آب در آفریقای جنوبی بررسی کرده و دریافتند که آب بخش‌های مختلف تونل خورنده یا بسیار خورنده است. آن‌ها براساس آزمایش‌های خود، استفاده از پوشش اپوکسی را برای جلوگیری از آبشویی پوشش بتنی تونل پیشنهاد کردند. همچنین Prabhakar et al. (2016) در مطالعه خود بر روی تأثیر کیفیت آب بر بتن در محل احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای تورگا، مشاهده کردند که شاخص لانتزلیز برای نه نمونه از میان ۱۸ نمونه آب منفی است و انجام اقدامات حفاظتی را برای جلوگیری از فرسایش بتن ضروری دانستند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی خطر آسیب‌های شیمیایی به بتن در سد و شبکه آبیاری و شمشگیر، با انجام بازدید میدانی و نمونه برداری از آب سد و شبکه، شدت تهاجم شیمیایی آب به بتن، با تحلیل نتایج آزمایش‌های کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های تهاجم آب نرم و استانداردهای موجود بررسی شد. مقادیر شاخص‌های لائولیر و رایزنر برای آب سد و شمشگیر در خردادماه ۱۴۰۱ به ترتیب $0/6-$ و بیش از $8/5$ به دست آمد که به ترتیب نشانگر خورنده بودن و بسیار خورنده بودن آب سد است. هم‌چنین مطالعه کیفیت آب سد و شمشگیر در پنج ماه نشان داد که آب سد در چهار ماه خورنده و خطر تهاجم آب نرم وجود دارد. افزایش نفوذپذیری بتن سرریز سد در پی فرایند آبشویی، سبب تشدید تهاجم دیگر عوامل حملات شیمیایی به بتن می‌شود. آثار خوردگی آرماتورهای موجود در سازه بتنی سرریز سد و شمشگیر که در گالری سرریز قابل مشاهده است، گواهی بر این مطلب می‌باشد. لذا به منظور محافظت از سازه بتنی سرریز و پوشش کانال‌های آبیاری در برابر آبشویی توسط آب خورنده سد و واکنش‌های آسیب‌رسان سولفات و منیزیم با بتن، استفاده از پوشش‌های اپوکسی توصیه می‌شود. هم‌چنین با انجام اقدامات محافظتی نظیر استفاده از بتن‌های با عملکرد بالا در محیط‌های خورنده، رنگ‌ها و پودرهای ضد آب‌کننده بتن که عملکرد آن‌ها با انجام آزمایش‌ها بررسی شده باشد، می‌توان بتن‌های سازه‌ای را در برابر آسیب‌های شیمیایی مقاوم ساخت. از تحلیل کیفیت آب ابتدای کانال راست شبکه آبیاری و شمشگیر در خردادماه سال ۱۴۰۱، مشخص شد که علاوه بر خطر تهاجم آب نرم، تهاجم سولفات و منیزیم نیز به ترتیب متوسط و کم می‌باشد و استفاده از سیمان نوع دو و بتن ناتراوا به عنوان پوشش‌های حفاظتی جهت جلوگیری از فرسایش پوشش بتنی کانال‌های آبیاری توصیه می‌شود. ارزیابی خطر تهاجم شیمیایی آب مخزن سد در ماه‌های آبان، آذر و اسفند سال ۱۴۰۰ و ماه‌های فروردین و خرداد سال ۱۴۰۱ نشان داد که در آذرماه سال ۱۴۰۰ علاوه بر خورنده بودن آب، شدت آسیب‌های شیمیایی ناشی از واکنش یون سولفات با بتن زیاد بوده و در این ماه خطر آسیب‌های شیمیایی به سازه‌های بتنی زیاد است. هم‌چنین مشخص شد که در تمام ماه‌ها خطر تهاجم حداقل یکی از عوامل تهاجم شیمیایی آب به بتن وجود دارد که مستلزم توجه جدی به انجام اقدامات حفاظتی می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، با بهره‌گیری از روش‌های نوین پایش سلامت سازه‌ها نظیر آزمون‌های میکروسکوپی، میزان آسیب‌های شیمیایی را که طی مدت زمان بهره‌برداری به وجود آمده‌اند تعیین نموده و هم‌چنین پیش‌روی آسیب‌ها در آینده با استفاده از مدل‌های بررسی سلامت و دوام سازه‌ها در محیط‌های خورنده پیش‌بینی شود. با انجام تحلیل‌های اقتصادی نیز می‌توان از میان روش‌های مختلف حفاظت از سازه‌های آبی در برابر آسیب‌های شیمیایی، مناسب‌ترین روش با کم‌ترین مقدار هزینه‌های ترمیم و نگهداری را انتخاب نمود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Concrete Leaching
2. Soft Water
3. Portland Cement
4. Frictional Energy Loss
5. Langelier Index
6. Corrosion
7. Aigueblanche
8. Foundation
9. Hirakud Dam
10. Ryznar
11. Ingula
12. Turga

۵. تشکر و قدردانی

از دانشگاه تهران و شرکت آب منطقه‌ای گلستان به‌ویژه آقایان علی اصغر خسروی و آرش شیپانی به‌دلیل فراهم نمودن امکانات و داده‌های موردنیاز برای انجام این پژوهش و تهیه مقالات مربوطه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- American Public Health Association, American Water Works Association & Water Environment Federation, USA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water.
- Anand, B., Sharma, S. N., Pathak, R. P., Kachhal, P. I., & Sharma, P. (2015). Impact of soft water attack on dam concrete, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(03), 357-363.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ballim, Y., Alexander, M., & Beushausen, H. (2009). Durability of concrete, Chapter 9. In: Owens, G (Ed.). *Fulton's Concrete Technology*, 9th ed. Midrand: Cement & Concrete Institute, 155-188.
- Behera, J. (2019). Assessment of water quality parameters of seepage water from crack areas of Hirakud Dam. In: *International dam safety conference*, 13th–14th Feb, Bhubaneswar, India, 351-358.
- Bhuyan, S.C., Behera, J., Kar, J., & Barik, P.K. (2022). Seepage of water quality analysis of a concrete gravity dam using langlier and aggressive index. *Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, (176). Springer, Singapore.
- Biczok, I. (1972). Concrete corrosion-Concrete protection. *Hungarian Academy of Sciences*, Budapest. 500 p.
- Canadian Standard Association CSA Standard A23.1. (2019). Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete.
- FAO. (2011). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture- Managing Systems at Risk*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London.
- French National Standard p18-011. (1985). assessing aggressivity due to pH, Ammonium, Magnesium and Sulphate ions.
- Han, F., Liu, R., & Yan, P. (2014). Effect of fresh water leaching on the microstructure of hardened composite binder pastes. *Journal of Construction and Building Materials*, 68, 630-636.
- International Commission on Large Dams, ICOLD Bulletin No. 71, (1989). Exposure of Dam Concrete to Special Aggressive Waters—Guidelines and Recommendations, for assessing aggressivity of soft water.
- Koszelnik, P., Kaleta, J., & Bartoszek, L. (2018). An assessment of water quality in dam reservoirs, considering their aggressive properties. In: *E3S web of conferences*, vol. 45, p 00035. EDP Sciences.
- Langlier, W. F. (1936). The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal of American Water Works Association*, 28(10), 1500-1521.

- Mariana, G., & Cornel, T. (2011). Defects in Concrete Dams, *JAES*, 1(14), 73-78.
- Mason, P. J. (1990). The effects of aggressive water on dam concrete. *Constr Build Mater*, 4(3), 115-118.
- Mohd-Asharuddin, S., Zayadi, N., Rasit, W., & Othman, N. (2015). Water Quality Characteristics of Sembrong Dam Reservoir, Johor, Malaysia, In: *proceedings of International Conference of Soft Soil Engineering (SEIC2015), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, pp.1-6.
- Morton, T. H. (1977). An algorithm for the langelier index of process waters. *Jrnl. of the Inst. of water Engrs and Scientists*, 31(1).
- Otieno, M., Alexander, M., & Plessis, J. (2017). Soft water attack on concrete tunnel linings in the Ingula pumped storage hydro-power scheme: Assessment of concrete resistance and protection. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 59(3), 57-67.
- Prabhakar, K., Pathak, RP. & Sivakumar, N. (2016). Water quality impact on the dam concrete for upcoming pumped storage scheme in west Bengal, *International journal of eng. sci. & research technology*, 5(2).
- Ryznar, J. W., & Langelier, W. F. (1944). A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water, *American Water Works Assoc.*, 36(4), 472-486.
- Ryznar, J.W. (1944). A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. *Jrnl. of American water works association*, Vol. 36, 472-0483.
- United States. Bureau of Reclamation, United States. Department of the Interior. Water, & Power Resources Service. (1981). *Concrete Manual*. US Bureau of Reclamation.
- Wankhade, R. R. (2015). Water Quality Study: Physico-Chemical Characteristics of Neelona Dam, Yavatmal (Maharashtra) India, *International Journal of Scientific and Applied Science (IJSEAS)*, 1(08), 495-497.
- Yousefi, Gh. (1991). Report of Voshmgir Reservoir operation, Golestan Water Regional Co. 167p. (In Persian).