

Assessment of the determinants of salinity in the Gotvand Dam reservoir and the contribution of outlet structures to its regulation

Ashkan Farokhnia^{1*} , Mortaza Eftekhari² , Ameneh Mianabadi³ 

¹ Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

² Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran

³ Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Extended Abstract

Introduction

Salinity accumulation and the consequent deterioration of water quality in reservoir systems represent a critical challenge in water resources management, particularly in arid and semi-arid regions where evaporation rates are high and freshwater availability is limited. In such environments, even moderate increases in salinity can significantly reduce the usability of stored water for agricultural, domestic, and industrial purposes. The problem becomes more severe in reservoirs located downstream of evaporite geological formations, where continuous dissolution of salt-bearing strata introduces persistent and often difficult-to-control saline inflows. These processes not only degrade water quality but also complicate reservoir operation, ecological stability, and downstream water allocation. The Gotvand Dam reservoir in southwestern Iran is a well-documented and particularly severe example of this phenomenon. Since its design and construction phases, the reservoir has been recognized as vulnerable to salinity intrusion due to its proximity to the Gachsaran Formation, specifically the Anbal salt section. Following impoundment, rapid salinization of reservoir water confirmed concerns raised in early feasibility studies, making it one of the most significant salinity-impacted reservoirs in the region. Previous studies have primarily focused on identifying salinity sources and simulating its distribution; however, there remains a lack of long-term, field-based evaluations of salinity control strategies. This study aims to address this gap by investigating the temporal evolution of salinity within the reservoir and evaluating the effectiveness of outlet structures, particularly the bottom outlet and GRP pipe, in controlling salinity over a 13-year operational period. By integrating extensive field measurements with mass balance and stratification analyses, this research aims to provide a comprehensive understanding of both natural processes and operational interventions influencing reservoir salinity dynamics.

Materials and Methods

The study was based on an extensive and continuous dataset collected over 13 years from August 2011 to October 2024, comprising more than 1,400 sampling days. The collected data included inflow and outflow discharge measurements, salinity concentrations of released water, vertical salinity profiles at multiple depths, reservoir water level fluctuations, and detailed operational records of outlet structures. Salinity observations were primarily conducted at the deepest point near the dam body, which was confirmed through preliminary analysis to be representative of the overall vertical salinity structure of the reservoir. This location provided a reliable proxy for assessing stratification dynamics and the effectiveness of withdrawal operations across different depth layers. The reservoir system receives its primary inflow from regulated releases of the upstream Masjed Soleyman Dam, supplemented by contributions from intermediate sub-basin areas. Outflows from the reservoir occur through four main structures: the hydropower intake, the spillway, a bottom outlet located at an elevation of 123 meters, and a GRP pipe installed at an elevation of 90 meters. To analyze salinity behavior, the study employed a combination of time-series analysis, vertical stratification assessment, and salt mass balance modeling. Stratification assessments were used to evaluate vertical salinity gradients and the stability of density-driven layering under different hydrological and thermal conditions. The mass balance approach quantified salt inputs, outputs, and storage variations within the reservoir system, enabling a system-scale understanding of salinity accumulation and removal processes. Furthermore, the performance of outlet structures was evaluated under different operational scenarios by correlating changes in salinity profiles with discharge regimes.

Results and Discussion

The results indicated that reservoir salinity dynamics were governed by a combination of hydrological, thermal, and operational factors. Water level fluctuations, inflow characteristics, and seasonal temperature variations significantly influenced salinity stratification. During warm periods, inverse stratification was observed in upper

layers due to evaporation and inflow of warmer saline layers, whereas colder seasons exhibited more uniform salinity profiles near the surface. Flood events played a dual role by both inducing vertical mixing and introducing additional salt loads, particularly from intermediate sub-basin interacting with saline formations. However, the intensity of salt dissolution from the Anbal formation appeared to decrease over time, suggesting a reduction in readily soluble salt sources. A key finding of this study was the differentiated performance of outlet structures in salinity management. The bottom outlet had proven highly effective in removing saline water from intermediate layers (approximately 120–160 m elevation), thereby reducing salinity gradients and preventing upward migration of saline layers toward the power intake level. Sustained operation of this outlet (even at moderate discharges of 5–10 m³/s) significantly stabilized salinity conditions in these layers. In contrast, the GRP pipe, designed to evacuate highly saline water from deeper layers, exhibited limited effectiveness due to its low discharge capacity. While it can locally reduce salinity near its intake elevation (90–100 m), its overall impact on reservoir-scale salinity control was negligible. Moreover, its operation contributed to increased salinity in downstream systems. The salt mass balance analysis further corroborated these findings. While the total salt load entering the reservoir from upstream flows was substantial, its concentration remained relatively low. Conversely, salt inflow from the Gachsaran Formation showed a decreasing trend over time, except during major flood events. The total salt storage in the reservoir increased sharply during the initial impoundment phase but stabilized in subsequent years, reflecting the effectiveness of controlled outlet operations, particularly after 2019.

Conclusion

This study provided robust, long-term empirical evidence on salinity dynamics and management in a reservoir affected by evaporite formations. The findings demonstrated that while natural factors such as hydrology and temperature influenced salinity distribution, operational strategies played a decisive role in its control. Among the evaluated measures, selective withdrawal through the bottom outlet emerged as the most effective strategy for managing salinity, particularly in intermediate layers. In contrast, the GRP pipe had limited practical utility despite its intended purpose. The results highlighted that optimizing the operational regime of the bottom outlet was essential for sustainable salinity management in the Gotvand Dam reservoir. Furthermore, the study underscored the importance of continuous monitoring and improved data availability, especially for intermediate inflows, to enhance the reliability of future assessments and support informed reservoir management decisions.

Keywords: Bottom outlet, Gotvand, GRP pipe, Outflow discharge, Salinity, Water level

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

All the information and results are presented in the main text of the article.

Authors' contribution

Ashkan Farokhnia: Resources, software/data analysis, Writing: Review and Editing.

Morteza Eftekhari: Data Analysis, Writing: Review and Editing.

Amenah Mianabadi: Results Analysis, Writing: original draft.

*Corresponding Author, E-mail: a.farokhnia@kgut.ac.ir

Citation: Farokhnia, A., Eftekhari, M., & Mianabadi, A. (2026). Assessment of the determinants of salinity in the Gotvand Dam reservoir and the contribution of outlet structures to its regulation. *Water and Soil Management and Modeling*, 6 (3), 259-278.

doi: 10.22098/mmws.2026.19647.1806

Received: 29 April 2026, Received in revised form: 09 June 2026, Accepted: 12 June 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 259-278.

Publisher: University of Mohagheh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی عوامل مؤثر بر شوری مخزن سد گتوند و نقش تخلیه کننده ها در کنترل آن

اشکان فرخ نیا^{۱*}، مرتضی افتخاری^۲، آمنه میان آبادی^۳

^۱ پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
^۲ پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران
^۳ گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

ورود نمک از سازند گچساران عنبیل، چالش اصلی کیفیت آب در مخزن سد گتوند از مرحله طراحی بوده است. قبل از آبیگری سد و برای مدیریت چالش شوری ورودی به مخزن از سازند عنبیل، روش های مختلف سازه ای و مدیریتی بررسی شده و در نهایت بر اساس مدل سازی، مدیریت شوری مخزن از طریق تخلیه کننده تحتانی در تراز ۱۲۳ متر و تعبیه یک لوله GRP در تراز ۹۰ متر در اولویت قرار گرفت. مطالعه حاضر با تحلیل داده های میدانی اندازه گیری شده طی ۱۳ سال (از مرداد ۱۳۹۰ تا مهر ۱۴۰۳) بهره برداری از سد شامل دبی ورودی و خروجی، شوری خروجی و شوری اعماق مختلف مخزن، تراز آب و برنامه بهره برداری از مخزن، میزان موفقیت مدیریت شوری مخزن سد گتوند و نقش این دو تخلیه کننده را به تفکیک مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج نشان می دهد که اگرچه عواملی چون تراز آب، جریان سیلابی ورودی و دما بر میزان شوری مخزن سد تأثیر دارد، اما تخلیه کننده های ذکر شده می تواند شوری مخزن را کنترل کند. بیلان نمک ارائه شده در این پژوهش نیز نقش تخلیه کننده ها را در کنترل شوری تأیید می کند. با این حال اثربخشی آن ها در کنترل شوری متفاوت است. بر اساس نتایج حاصل، بین تخلیه از آبیگر تحتانی (با دبی پایدار ۵-۱۰ متر مکعب بر ثانیه) و تثبیت شوری در لایه های میانی در محدوده ارتفاعی ۱۲۰-۱۶۰ متر همبستگی مشاهده می شود که این امر می تواند از انتقال شوری به لایه های بالایی جلوگیری نماید. لوله GRP با دبی بسیار کم ۵۰-۱۵۰ لیتر بر ثانیه تنها اثرات محلی محدودی در لایه ۹۰-۱۰۰ متر داشته و تأثیر قابل توجهی در مقیاس کل مخزن ندارد. تحلیل بیلان جرم نمک نشان داد که ورودی نمک از سازند گچساران روند کاهشی داشته و ذخیره نمک مخزن پس از مرحله اولیه آبیگری به شدت افزایش یافته و سپس تثبیت شده است، به ویژه از سال ۱۳۹۸ به بعد که مدیریت بهره برداری از خروجی تحتانی به طور واضح بهبود یافته است. نتایج این مطالعه شواهد عینی برای تأیید اثربخشی استراتژی تخلیه آب شور لایه های میانی از طریق تخلیه کننده تحتانی ارائه نموده و تأکید می کند که بهره برداری مناسب از دریچه تخلیه کننده تحتانی مخزن سد گتوند کلید مدیریت پایدار شوری آب در این مخزن است.

واژه های کلیدی: تراز آب، جریان خروجی، دریچه تحتانی، شوری، گتوند، لوله GRP

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.farokhnia@kgut.ac.ir

استاد: فرخ نیا، اشکان، افتخاری، مرتضی، و میان آبادی، آمنه (۱۴۰۵). ارزیابی عوامل مؤثر بر شوری مخزن سد گتوند و نقش تخلیه کننده ها در کنترل آن. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳۶(۳)، ۲۷۸-۲۵۹.
doi: 10.22098/mmws.2026.19647.1806

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۲۵۹ تا ۲۷۸
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسنده

۱- مقدمه

شوری و کاهش کیفیت آب در مخازن سدها یکی از چالش‌های جدی و فراگیر در مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود (Jalali et al., 2019; Zhang et al., 2010). این پدیده می‌تواند کارکردهای اصلی سدها از جمله تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت و پایداری محیط‌زیستی اکوسیستم‌های پایین‌دست را با چالش مواجه کند. منشأ شوری در مخازن سدها عموماً ناشی از وجود سازندهای زمین‌شناسی نمکی در حوضه آبریز سد و یا فعالیت‌های انسانی مثل تخلیه پساب‌های صنعتی و معدنی در رودخانه است (Cary et al., 2015; Merchán et al., 2015). راهکارهای کنترل و مدیریت شوری در مخازن سدها در قالب راهکارهای سازه‌ای مانند احداث سازه‌های تخلیه انتخابی با امکان برداشت آب از لایه‌های عمقی با شوری متفاوت و یا راهکارهای مدیریتی نظیر رهاسازی کنترل‌شده جریان‌های شور انجام می‌شوند (Saeidi Razavi, 2012; Izadjo et al., 2022). ارزیابی اثربخشی این راهکارها در درازمدت، نیازمند پایش مستمر و تحلیل داده‌های میدانی است. فقدان چنین ارزیابی‌هایی شکاف دانشی مهمی در مسیر بهینه‌سازی مدیریت کیفی مخازن سدها، به‌ویژه در موارد پیچیده‌ای که با ورودی شور ذاتی مواجه هستند، ایجاد کرده است (Tabarmayeh and Vaezihir, 2025). مطالعه حاضر با تمرکز بر سد گتوند به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین موارد چالش‌برانگیز در این زمینه، درصدد پرکردن بخشی از این شکاف بر می‌آید.

سد گتوند، یکی از پرچالش‌ترین سدهای کشور است که در زمان ساخت و پس از بهره‌برداری نقدهای بسیاری در مورد ساخت آن در مجامع علمی و عمومی وجود داشت. این نقدها بیش‌تر بر اثرات سازند نمکی عنبل و شور شدن آب مخزن سد و کاهش کیفیت آن و همچنین اثرات این شوری بر پایین‌دست متمرکز بوده است. به‌عنوان مثال Sharif and Hamzeh (2022) در مطالعه خود نشان دادند که همزمان با آبیگری سد گتوند در سال ۲۰۱۱ میزان پوشش سطح برگ و NDVI کاهش یافته و بیش‌ترین تنش‌ها در اکوسیستم گیاهی منطقه رخ داده است. این مسأله که ناشی از شوری آب مخزن گتوند و رود کارون است، باعث افزایش شوری و تغییرات کیفیت خاک و در نتیجه افزایش گیاهان شورپسند و تخریب پوشش گیاهی منطقه شده است. مطالعه Zareie et al., (2025) با استفاده از تصاویر لندست ۵ و ۸ و شاخص NSDI افزایش شوری خاک در پایین‌دست سد گتوند را نشان داده است. به‌طور کلی، یکی از پیامدهای مهم و بالقوه ساخت سدها، کاهش کیفیت آب مخازن است و سد گتوند نیز از این مسأله مستثنی نیست. اما به‌دلیل قراردادن سازندهای گچساران، میشان، آغاچاری و بختیاری در مسیر رودخانه کارون در بالادست سد گتوند

(Jahangiry Fard et al., 2019)، آب رودخانه در بخش‌هایی از مسیر خود در تماس مستقیم و دائمی با سازند گچساران است (Dahrazma et al., 2014). اندکی پس از بهره‌برداری از سد، کیفیت آب لایه‌های زیرین مخزن رو به کاهش گذاشت، به‌طوری‌که کل مواد جامد محلول (TDS) در لایه‌های زیرین مخزن سد گتوند به ۲۰۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسید، البته مقدار TDS رودخانه قبل و بعد از ساخت سد ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود و تغییر زیادی نکرده است (Jalali et al., 2019; Salehpour et al., 2025). اهمیت این مسأله باعث شد مطالعاتی در زمینه کیفیت آب در مخزن سد گتوند و در پایین‌دست سد انجام شود.

در مطالعه‌ای که توسط Ghomeshi and Haghbin, (2014) با استفاده از آمار و اطلاعات شوری لایه‌های مختلف مخزن از ابتدای بهره‌برداری میزان شوری ایستگاه‌های آب‌سنجی گتوند و اهواز در مسیر کارون و ایستگاه آب‌سنجی حرمله در رودخانه دز انجام شد، نتایج نشان داد که تجمع شوری در مخزن سد در فاصله زمانی اسفند ۱۳۹۰ تا بهمن ۱۳۹۱ افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته و مقدار نمک تجمع‌یافته از ۳/۳ میلیون تن به ۸/۷ میلیون تن رسیده است. مقدار EC رود کارون از ۲۰۰۰ میکروموس در فاصله زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ به ۲۴۹۶ میکروموس در سال ۱۳۹۱ افزایش یافته است. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که میزان اثر سد گتوند بر افزایش شوری تا سال ۱۳۹۱ حداکثر ۲۳ درصد بوده است که ۷۱ درصد این افزایش ناشی از ورود زهکش‌های مسیر کارون و ۶ درصد آن نیز ناشی از تغییرات شوری در رودخانه دز است. مطالعه Dahrazma et al. (2014) نشان داد که میزان شوری در مخزن سد گتوند به‌دلیل وجود سازندهای گچساران و میشان در ترازهای ۹۰ تا ۱۰۰ متر در دسته شوری‌های بسیار بالا و در تراز ۱۵۰ متر به بالا در دسته شوری‌های معمول قرار می‌گیرد. Salehpour et al. (2025) نیز نشان دادند که تجمع املاح ناشی از انحلال رخنمون‌های تبخیری سازند گچساران با ۴۹/۷۹ درصد، عامل اصلی تغییرات کیفیت آب رودخانه در ایستگاه گتوند است. پژوهش Mansournejad et al., (2015) به بررسی راهکار ارائه شده توسط مشاور پروژه که مبتنی بر ساخت دیوار رسی در امتداد کنبد نمکی است، پرداختند. نتایج حاصل از آزمایشات و نمونه‌برداری در این مطالعه، نشان‌دهنده غیرممکن بودن و عدم امکان ساخت دیوار و لزوم بررسی و اقدامات سریع در زمینه مدیریت شوری آب است. Nazeri Tahroudi and Shahidi (2017) به بررسی اثر احداث سد گتوند بر پارامترهای کیفی جریان از جمله شوری پرداخته و دریافتند که مقادیر EC و TDS به‌ترتیب در ایستگاه گتوند ۵۰ و ۴۷ درصد و در ایستگاه سوسن ۱۰ و ۸ درصد افزایش یافته و این روند افزایشی معنی‌دار بوده است. در مطالعه Jalali et al., (2019) منابع اصلی شور شدن آب مخزن سد گتوند مورد بررسی قرار گرفت.

۱۳ ساله مبتنی بر داده‌های میدانی از پویایی شوری در مخزن سد گتوند و عوامل مؤثر بر آن است. همچنین با توجه به پیشنهاد مدیریت شوری مخزن از طریق تخلیه‌کننده تحتانی در تراز ۱۲۳ متر و تعبیه یک لوله GRP (Glass fiber Reinforced Plastic Pipe) در تراز ۹۰ متر، در این مطالعه نقش و کارایی این تخلیه‌کننده‌ها در کنترل شوری لایه‌های مختلف مخزن نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تلفیق اندازه‌گیری‌های میدانی، بیلان جرم نمک و تحلیل لایه‌بندی شوری برای تفکیک فرآیندهای ژئوشیمیایی طبیعی (انحلال نمک از سازند گچساران) از مداخلات عملیاتی نیز بخش دیگری از اهداف مطالعه فوق است. با توجه به موارد ذکر شده، هدف اصلی این مطالعه ارائه بینش‌های مبتنی بر شواهد درباره رفتار بلندمدت شوری مخزن و کاربرد عملی سازه‌های برداشت انتخابی است تا تصمیم‌گیری‌های آتی در طراحی و مدیریت مخازن در زمینه‌های مشابه را هدایت کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی گتوند، با ظرفیت ذخیره‌سازی تقریباً ۴/۷ میلیارد مترمکعب در تراز نرمال خود دومین مخزن بزرگ سطحی در کشور و با ارتفاع ۱۸۲ متر بلندترین سد خاکی ایران است. این سد در مرداد ۱۳۹۰ در منطقه شمالی استان خوزستان، در جنوب غربی ایران به بهره‌برداری رسید (شکل ۱). سد گتوند پایین‌ترین و بزرگ‌ترین سد ساخته شده بر روی رودخانه کارون است که از طریق آن کل جریان کارون به سمت دشت خوزستان رها می‌شود (Beheshti et al., 2013; Jahangiry Fard et al., 2019; Jalali et al., 2019; Sahebari, 2023). طول مخزن در امتداد خط القعر رودخانه کارون، از نقطه شروع بلافاصله پایین دست سد مسجد سلیمان تا محل سد، حدود ۸۰ کیلومتر است که آن را به طولانی‌ترین مخزن کشور تبدیل می‌کند. سد گتوند نقش مهمی در تنظیم آب مخزن برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی در دشت خوزستان، کنترل و ذخیره سیلاب‌های فصلی رودخانه کارون و افزایش تولید انرژی برق‌آبی کشور به میزان ۲۰۰۰ مگاوات دارد (Monjezi et al., 2022). بر اساس داده‌های ایستگاه همدیدی گتوند، میانگین بارش سالانه، متوسط دما و میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه در منطقه به ترتیب ۲۸۸ میلی‌متر، ۲۵/۴ درجه سلسیوس و ۲۶۴۳ میلی‌متر است. همچنین متوسط آبدهی رود کارون در محل سد گتوند در طی دوره ۱۳ ساله مورد بررسی حدود ۹ میلیارد و ۶۰۰ میلیون مترمکعب است.

نتایج آنها نشان داد که انحلال هالیت عامل اصلی شور شدن مخزن گتوند است. انحلال نمک در سازند گچساران که در مرحله مطالعاتی پروژه کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده بود، حدود ۸۶ درصد از نمک محلول انباشته شده در مخزن را در طول یک دوره ۲ ساله از زمان آبیگری مخزن در سال ۲۰۱۱ فراهم کرده است. نتایج Jahangiry Fard et al., (2019) نیز نشان‌دهنده اثر انحلال هالیت بر شور شدن آب مخزن گتوند است. نتایج مطالعه Monjezi et al. (2022) برای شبیه‌سازی توزیع شوری در مخزن سد گتوند، نشان داد که در طول دوره شبیه‌سازی، میانگین میزان خوردگی گنبد نمکی در تماس با آب مخزن، ۲۰/۱ سانتی‌متر در روز بوده و تا پایان دوره شبیه‌سازی ۴۳/۷۲ میلیون تن نمک در مخزن انباشته شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که ۳۹ درصد از شوری مخزن ناشی از انحلال سازند نمکی بوده و بقیه شوری با رواناب بالادست وارد مخزن می‌شود. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، تغییرات سطح آب در مخزن مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده پارامترهای توزیع شوری در مخزن است. نتایج Sahebari (2023) در بررسی کیفیت آب سد گتوند نشان داد که مقدار TDS در فاصله سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ به میزان ۳۵ درصد افزایش یافته است. با توجه به وجود حساسیت‌ها و نگرانی‌ها در خصوص میزان تأثیرگذاری سازند نمکی عنبلی بر وضعیت شوری مخزن سد گتوند و جریان خروجی از آن، بلافاصله پس از شروع آبیگری سد گتوند در مرداد ۱۳۹۰ برنامه پایشی گسترده‌ای برای اندازه‌گیری وضعیت شوری در عمق مخزن سد و تغییرات آن در طول زمان آغاز شد. در سال اول پس از شروع آبیگری، داده‌برداری در چندین نقطه از مخزن و با تواتر زمانی روزانه انجام شد. پس از آن و با مشخص شدن این نکته که پروفیل عمقی شوری در نقاط مختلف مخزن تقریباً شرایط یکسانی دارد، داده‌برداری تنها به عمیق‌ترین نقطه مخزن (نزدیک به بدنه سد) محدود شده و تاکنون ادامه یافته است. تواتر نمونه‌برداری‌ها نیز به مرور کاهش پیدا نمود، به نحوی که در نیمه اول سال ۱۴۰۳ به یک نمونه‌برداری در فواصل زمانی ۱۰ تا ۱۵ روزه کاهش یافت. به‌طور کلی، و در مجموع از مرداد ۱۳۹۰ تا مهر ۱۴۰۳، بیش از ۱۴۰۰ روز توأم با عملیات نمونه‌برداری در مخزن سد گتوند سپری شده است که در برخی از این روزها اطلاعات در بیش از یک نقطه از مخزن نیز جمع‌آوری شده است که در این مطالعه از آنها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که مطالعات پیشین اغلب بر شناسایی منابع شوری و شبیه‌سازی توزیع آن متمرکز بوده‌اند؛ با این حال، ارزیابی‌های بلندمدت و میدانی از راهبردهای کنترل شوری تحت شرایط بهره‌برداری واقعی وجود ندارد. این مطالعه با استفاده از داده‌های فوق، نخستین ارزیابی جامع



شکل ۱- موقعیت مکانی سد و مخزن سد گتوند، میان‌حوضه و نقاط پایش شوری

Figure 1. Location of Gotvand Dam, reservoir, intermediate sub-basin, and the salinity monitoring stations.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

شوری مخزن

بر اساس اطلاعات اخذ شده، داده‌برداری از وضعیت شوری آب در داخل مخزن سد گتوند در طول دورهٔ آبیگری و بهره‌برداری از مخزن در ۷ نقطه داخل مخزن صورت گرفته است (شکل ۱). برداشت اطلاعات در ایستگاه‌های ۲ الی ۷ به‌صورت محدودتر و اغلب در چند ماه اول شروع آبیگری مخزن به انجام رسیده و در ادامه پس از بررسی شرایط پروفیل شوری در این نقاط، عملیات داده‌برداری تا به امروز اغلب در ایستگاه شماره یک ادامه یافته است. این ایستگاه در نزدیکی بدنهٔ سد واقع شده که عمیق‌ترین نقطهٔ مخزن سد گتوند به‌شمار می‌رود. با توجه به اینکه برداشت همزمان اطلاعات شوری در عمق مخزن در نقاط مختلف نشان‌دهندهٔ شرایط تقریباً یکسان پروفیل شوری آب در نقاط مختلف مخزن است، اطلاعات برداشت شده در این نقطه به‌عنوان نشانگر مناسبی از وضعیت توزیع شوری در عمق مخزن سد گتوند در نظر گرفته می‌شود. تواتر برداشت اطلاعات در طول دورهٔ ۱۳ ساله مورد تحلیل متفاوت است؛ به نحوی که در سال اول تقریباً هر روز اطلاعات برداشت شده است، در حالی که برداشت اطلاعات مورد اشاره در سال انتهایی دورهٔ مورد بررسی به ۲ بار در هر ماه کاهش یافته است. شایان ذکر است اطلاعات پروفیل شوری آب در عمق مخزن با استفاده از دستگاه CTD هم به‌صورت هدایت الکتریکی (EC) و هم در قالب کل مواد جامد محلول (TDS) برداشت شده که به تناسب مباحث مطرح از هر دو شاخص در تحلیل‌ها استفاده شده است.

جریان ورودی به مخزن

عمده جریان ورودی به مخزن سد گتوند از خروجی سد مسجدسلیمان است. ترازهای نرمال و حداکثر آب در مخزن سد

گتوند به‌ترتیب برابر با ۲۳۰ و ۲۳۴ متر از سطح دریا است که محل شروع مخزن سد گتوند بلافاصله در پایین‌دست سد مسجدسلیمان در این ترازها واقع شده است. علاوه بر این، میان‌حوضهٔ مخزن سد گتوند شامل شاخه‌هایی که بیش‌تر در شمال مخزن قرار دارند، نیز است. مجموع مساحت کل حوضهٔ آبریز سد گتوند از نقطهٔ خروجی سد مسجدسلیمان تا نقطه قرارگیری سد گتوند بالغ بر ۳۸۰۰ کیلومتر مربع است (شکل ۱).

جریان خروجی از مخزن

خروج آب از مخزن سد گتوند از طریق ۴ سازهٔ مختلف صورت می‌گیرد که عبارتند از تخلیه‌کننده تحتانی، آبگیر نیروگاه، سرریز و لولهٔ GRP. تخلیه‌کنندهٔ تحتانی دارای دو دهانه در ترازهای اسمی ۱۵۸ و ۱۲۳ متر از سطح دریا با حداکثر دبی طراحی ۵۰۰ مترمکعب در ثانیه است و بیش‌تر برای کنترل جریان خروجی در دورهٔ آبیگری مخزن و همچنین مواردی نظیر تخلیهٔ رسوب در صورت لزوم طراحی شده است. با شبیه‌سازی‌های انجام شده مرتبط با شرایط شوری مخزن قبل از آبیگری، استفاده از آن به‌عنوان ابزاری برای مدیریت شرایط شوری در مخزن در دستور کار قرار گرفته است. آبگیر نیروگاه در تراز اسمی ۱۶۴ متر از سطح دریا قرار گرفته و جریان ورودی به توربین‌ها را تأمین می‌کند که حداکثر ظرفیت اسمی آن برابر با ۱۰۰۰ مترمکعب در ثانیه است. لولهٔ GRP برای تخلیهٔ جریان فوق‌شور تجمع یافته در کف مخزن و در تراز اسمی ۹۰ متر از سطح دریا قرار دارد و حداکثر جریان قابل تخلیه از آن دو مترمکعب در ثانیه است. سرریز سد گتوند از نوع اوجی درپچه‌دار با ظرفیت طراحی تخلیه ۱۷۵۰۰ مترمکعب در ثانیه است و از حدود تراز مخزن ۲۲۰ متر از سطح دریا قابل بهره‌برداری است.

تحلیل داده‌ها

پس از جمع‌آوری و کنترل کیفیت داده‌های ذکرشده، تحلیل‌ها در محیط Microsoft Excel انجام شد و خروجی‌ها با در نظر گرفتن نقش تخلیه‌کننده‌ها به صورت نمودار ارائه شدند. لازم به ذکر است برای تحلیل اثر جریان‌ات سیلابی ورودی به مخزن، چند واقعه سیلابی در برهه‌های زمانی مختلف که طی آن‌ها جریان‌ات سیلابی میان حوضه با جریان‌ات ورودی از بالادست (سد مسجدسلیمان) تداخل نداشته باشد، مبنای بررسی قرار گرفت.

بیان نمک

رابطه کلی بیان نمک در مخزن سد گتوند به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\Delta S_R = S_{in} - S_{out} \quad (1)$$

که در آن، ΔS_R تغییر جرم نمک مخزن در یک بازه زمانی مشخص و S_{in} و S_{out} نیز به ترتیب جرم نمک ورودی و خروجی مخزن در طول بازه زمانی مورد نظر است. اجزای S_{in} ، شامل نمک ورودی همراه جریان از بالادست (خروجی سد مسجدسلیمان)، نمک ورودی همراه جریان‌های میان حوضه و نمک انحلال یافته از سازند عنبل در طول دوره زمانی مورد نظر است. S_{out} نیز حاصل جمع جرم نمک خروجی همراه جریان از تخلیه‌کننده‌های مختلف مخزن، شامل نیروگاه، سرریز، دریچه تحتانی و لوله GRP در طول دوره زمانی مورد بررسی است.

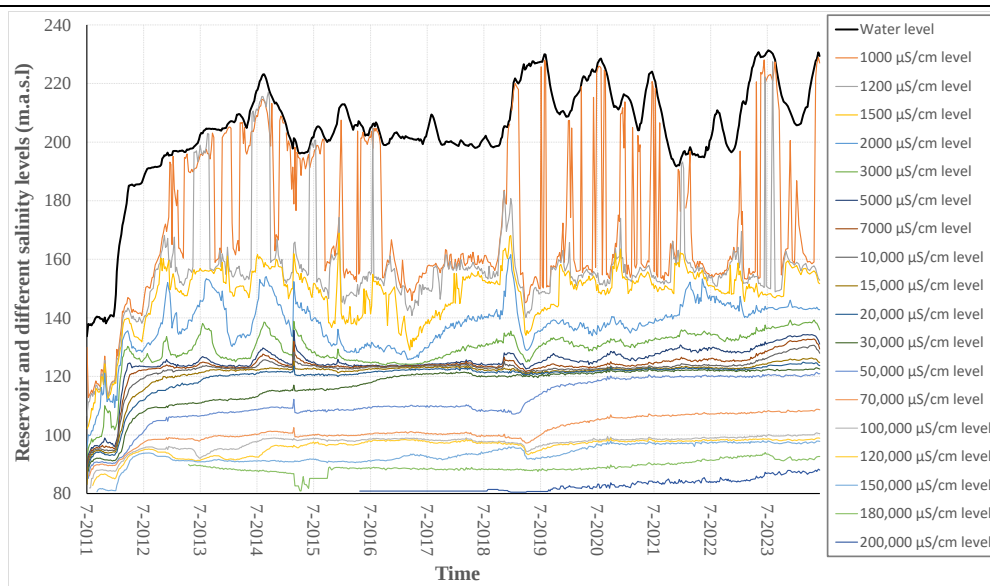
۳- نتایج و بحث

اگرچه مطالعات نشان داده است که مقدار شوری در ترازهای مختلف مخزن سد گتوند تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر مقدار انحلال نمک از توده عنبل، حجم و شوری جریان ورودی، تغییرات تراز آب در مخزن و شرایط دمایی (فصول گرم و سرد) است (Jahangiry Fard et al., 2019; Monjezi et al., 2022)، اما چگونگی تنظیم جریان خروجی از آن می‌تواند در مدیریت میزان شوری مخزن و کاهش آن نقش مؤثری داشته باشد. در ادامه به تفکیک به بررسی این عوامل بر شوری مخزن و نقش تخلیه‌کننده‌ها در مدیریت آن پرداخته می‌شود.

تراز آب

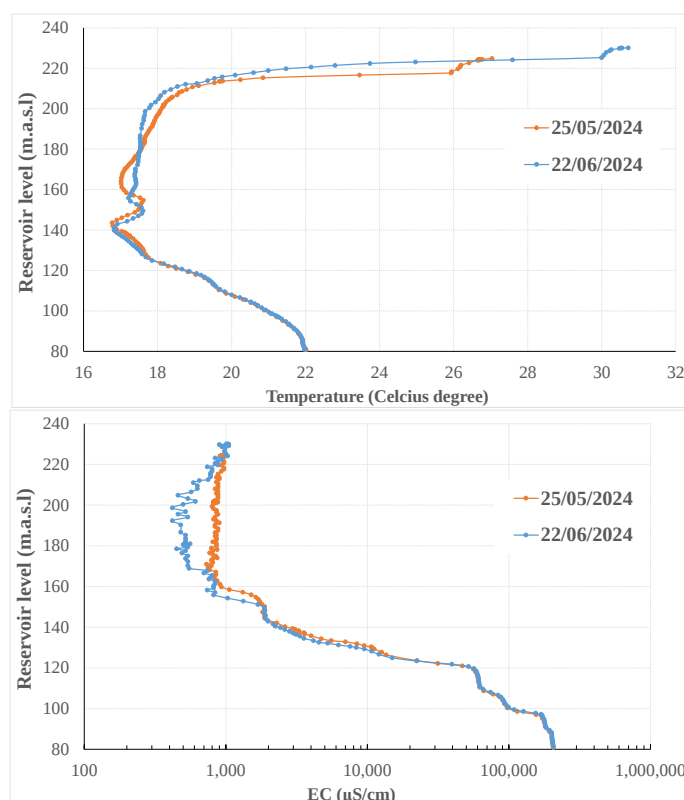
وضعیت تراز قرارگیری مقادیر مختلف شوری در مخزن سد گتوند در طول دوره بهره‌برداری در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، شوری ۱۰۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر در بعضی اوقات تا سطح آب در مخزن بالا آمده و گاهی نیز در عمق بیش از ۵۰ متری مخزن قرار داشته است. هر چند بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد در زمانی که این مقدار شوری در سطح مخزن قرار داشته، پروفیل شوری مخزن در ترازهای بالایی در شرایط معکوس بوده است. دلیل این موضوع می‌تواند به ورود جریان‌های قابل توجه با دمای نسبتاً بالا به مخزن مرتبط باشد که قرارگیری آب با شوری بیش‌تر را بر روی لایه‌های سردتر با شوری کم‌تر موجود در مخزن امکان‌پذیر می‌کند. به عنوان مثال تغییرات پروفیل عمقی شوری و دما در روزهای ۵ خرداد و ۲ تیر ۱۴۰۳ (شکل ۳) که تراز آب مخزن در فاصله بین این دو مقطع زمانی، در حدود ۵/۵ متر افزایش یافته است (به واسطه افزایش رهاسازی آب از زنجیره سدهای بالادست با هدف تامین برق در فصل گرم)، گرادیان شدید شوری در برخی از ترازهای مخزن را نشان می‌دهد که مهم‌ترین آن در ترازهای مابین ۱۲۰ تا ۱۴۰ و ۸۵ تا ۱۰۰ متر از سطح دریا است. با کاهش تراز از ۱۴۰ متر به ۱۲۰ متر، شوری آب از حدود ۲۵۰۰ به بیش از ۵۰ هزار میکرو زیمنس بر سانتی‌متر افزایش می‌یابد که حداکثر این گرادیان در تراز حدود ۱۲۵ متری مخزن دیده می‌شود. بین ترازهای ۱۰۰ تا ۸۵ متری مخزن نیز شوری آب از حدود ۱۰۰ هزار به ۲۰۰ هزار میکرو زیمنس بر سانتی‌متر افزایش می‌یابد. مقایسه بین شرایط پروفیل عمقی شوری و دمای مخزن در این دو تاریخ با نشان دادن قرارگیری جریان کم‌تر شور اما سردتر ورودی از بالادست به مخزن در ترازهای میانی مخزن و زیر آب‌های گرم و شورتر سطح مخزن دلیل وقوع پروفیل شوری معکوس در ترازهای بالایی مخزن را توضیح می‌دهد.

مطالعه Jalali et al., (2019) نیز نشان داده است که نرخ مکانی افزایش شوری در کف مخزن بسیار بیش‌تر از سطح مخزن است.



شکل ۲- تراز قرارگیری سطوح مختلف شوری (µS/cm) در مخزن سد گتوند در طول دوره بهره‌برداری

Figure 2. The stratification of different salinity (µS/cm) levels in the Gotvand Dam reservoir during the operational period.

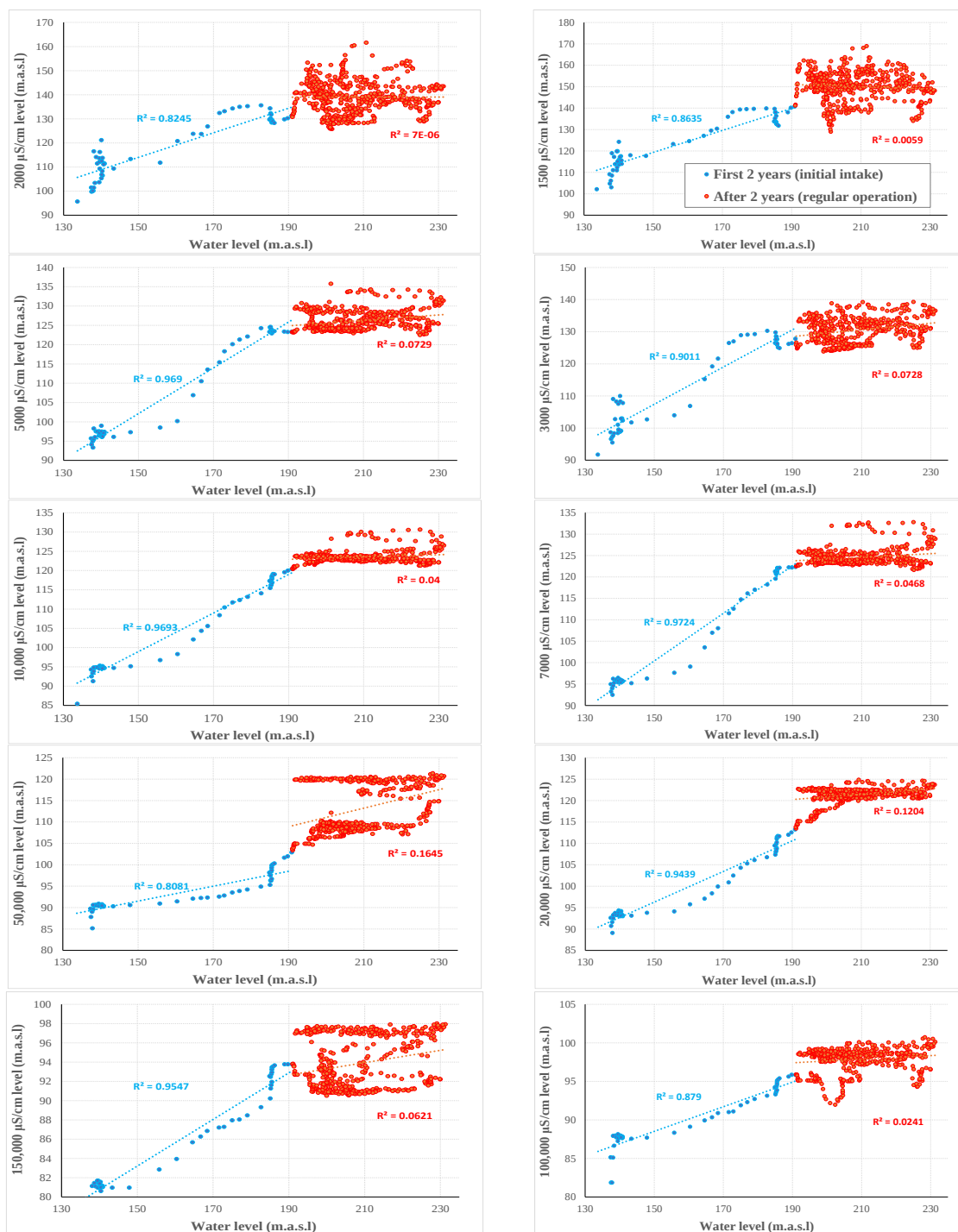


شکل ۳- مقایسه پروفیل عمقی شوری (بالا) و دما (پایین) در مخزن سد گتوند در روزهای پنجم خرداد و دوم تیر ماه ۱۴۰۳ و ارزیابی جزئیات این مؤلفه‌ها در ترازهای فوقانی مخزن

Figure 3. Comparison of vertical profiles of salinity (Up) and temperature (Down) in the Gotvand Dam reservoir on May 25 and June 22, 2024, with a detailed assessment of these variables in the upper layers of the reservoir.

وجود داشته است ($R^2 > 80\%$)، اما در دوره بهره‌برداری تغییرات تراز قرارگیری شوری در عمق مخزن سد گتوند تابعی از تغییرات تراز آب نیست و همبستگی بین آن‌ها دیده نمی‌شود.

بررسی وضعیت ارتباط تراز قرارگیری لایه‌های مختلف شوری در مخزن سد گتوند با تراز آب در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس این شکل می‌توان گفت که اگرچه در دوره آبیگری مخزن بین تغییرات تراز آب مخزن با تراز لایه‌های شور همبستگی بالایی



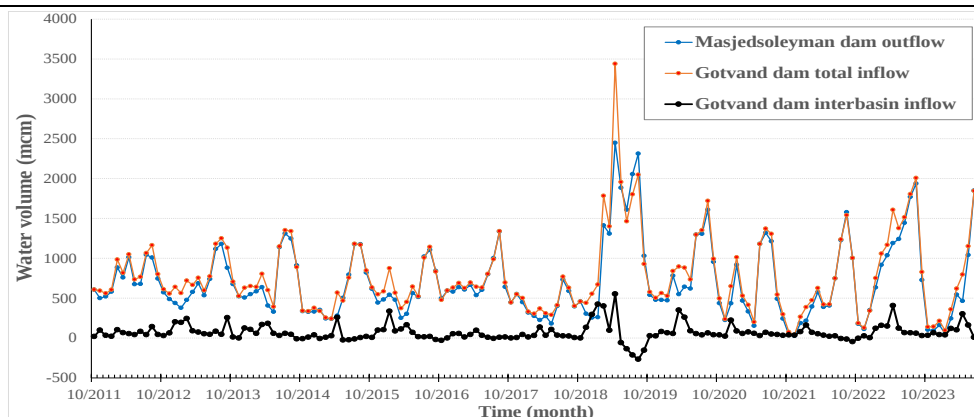
شکل ۴- ارتباط بین تراز آب مخزن با تراز قرارگیری لایه‌های با شوری مختلف ($\mu\text{S}/\text{cm}$) به تفکیک دوره آبگیری و دوره بهره‌برداری مخزن سد گتوند

Figure 4. Relationship between reservoir water level and the elevation of layers with different salinity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) levels, separated for the impoundment and operational periods of the Gotvand Dam reservoir.

محاسبه شده که در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در برخی موارد، مقادیر منفی در این برآوردها وجود دارد که دلیل آن خطاهای موجود در اطلاعات موجود از جریان خروجی سد مسجد سلیمان و جریان ورودی به مخزن سد گتوند است.

جریان‌های ورودی

همان‌طور که ذکر شد، با توجه به عدم وجود ایستگاه آب‌سنجی فعال در دوره بهره‌برداری از مخزن سد گتوند، مقدار جریان ورودی از شاخه‌ها (ورودی میان‌حوضه)، با کسر مقدار جریان ورودی به مخزن سد گتوند از میزان جریان خروجی مخزن سد مسجدسلیمان



شکل ۵- مقادیر جریان ماهانه ورودی به سد گتوند از بالادست و برآورد جریان ورودی از میان حوضه

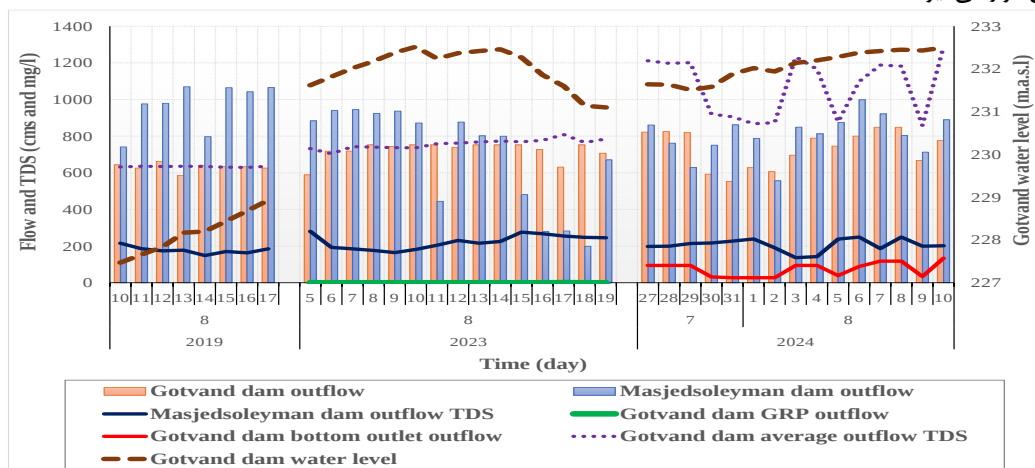
Figure 5. Monthly inflow discharge to the Gotvand Dam from upstream and the estimated inflow from intermediate sub-basin.

جریان‌ات حداکثری ورودی از سد مسجسدسلیمان

اطلاعات سه مقطع زمانی در مرداد ماه سال‌های ۱۳۹۸، ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ که طی آن‌ها جریان‌های نسبتاً بالایی از سد مسجسدسلیمان به پایین‌دست رهاسازی شده، در شکل ۶ آمده است. انتخاب این بازه‌های زمانی علاوه بر مقادیر بالای جریان خروجی از سد مسجسدسلیمان و عدم وجود جریان قابل‌توجه در میان‌حوضه سد گتوند، بر اساس تواتر اطلاعات برداشت شده از شرایط شوری آب در مخزن سد گتوند صورت گرفته است. همچنین با توجه به اثرگذاری شرایط بهره‌برداری مخزن سد گتوند بر تغییر شرایط شوری آن در این مقاطع زمانی، اطلاعات مربوط به میزان تخلیه جریان توسط GRP و آبگیر تحتانی نیز نشان داده شده است. وضعیت لایه‌بندی عمقی شوری آب مخزن سد گتوند در ابتدا و انتهای سه بازه زمانی مورد اشاره در شکل ۷ نشان داده شده است.

جریان‌های سیلابی ورودی به مخزن

جریان‌های سیلابی ورودی به مخزن از دو جنبه بر تغییرات وضعیت شوری مخزن مؤثر هستند؛ اول آنکه ورود موج جریان با شدت زیاد می‌تواند باعث اختلاط در لایه‌بندی شوری موجود در مخزن شود و دوم اینکه سیلاب‌های شکل‌گرفته در میان‌حوضه به دلیل وجود سازندهای نمکی در مسیر حرکت خود می‌توانند مقادیر قابل‌توجهی شوری را وارد مخزن کنند. جریان‌های سیلابی ورودی به مخزن گتوند شامل جریان‌ات ورودی از سد مسجسدسلیمان و سیلاب‌های میان‌حوضه است. برای تحلیل اثرات ورود هر یک از این جریان‌های سیلابی بر شرایط شوری در مخزن سد گتوند، ضروری است تا برهه‌های زمانی که طی آن جریان‌ات سیلابی میان‌حوضه با جریان‌ات نسبتاً زیاد از بالادست تداخل نداشته باشد، مبنای بررسی قرار گیرد. بنابراین جریان‌های ورودی حداکثری به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۶- مقادیر متوسط روزانه جریان خروجی از سدهای گتوند و مسجسدسلیمان در ۳ بازه زمانی دارای جریان‌های ورودی نسبتاً بالا از مخزن سد مسجسدسلیمان، وضعیت تخلیه جریان از GRP و تخلیه‌کننده تحتانی، شوری جریان ورودی به مخزن گتوند و تغییرات تراز آب

Figure 6. Mean daily outflow discharge from the Gotvand Dam and the Masjed Soleyman Dam over three time periods characterized by relatively high inflows from the Masjed Soleyman reservoir, the release conditions from the GRP and the bottom outlet, the salinity of inflow to the Gotvand reservoir, and its water level fluctuations.

۹۷۰ و ۶۳۰ مترمکعب در ثانیه و شوری جریان خروجی آن‌ها در حدود ۱۸۰ و ۶۳۰ میلی‌گرم در لیتر بوده است. تراز آب مخزن سد

در بازه زمانی ۱۹ الی ۲۶ مرداد ۱۳۹۸ مقدار جریان متوسط روزانه خروجی جریان سدهای مسجسدسلیمان و گتوند به‌ترتیب در حدود

گتوند در ابتدای این بازه زمانی در حدود ۲۲۷/۵ متر از سطح دریا بوده و طی این بازه ۷ روزه در حدود ۱/۵ متر افزایش یافته است. در این بازه زمانی، تخلیه‌کننده تحتانی و GRP کاملاً غیرفعال بوده و جریان تنها از طریق آبگیر نیروگاه از سد گتوند خارج شده است. وضعیت شوری در عمق مخزن سد گتوند در ابتدا و انتهای این بازه زمانی در ستون الف شکل ۸ نشان داده شده است. در ترازهای بالایی مخزن تغییر خاصی در وضعیت شوری آب دیده نمی‌شود و تغییرات مشاهده شده بیش‌تر مربوط به دقت اندازه‌گیری‌های دستگاه است. در ترازهای میانی تنها تغییر قابل‌ملاحظه در این مقطع زمانی، افزایش جزئی شوری (حداکثر حدود ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در ترازهای بین ۱۲۴ تا ۱۲۷ متر و کاهش زیاد شوری (حداکثر حدود ۷۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در ترازهای ۱۱۹ تا ۱۲۴ متری مخزن است. دلیل این امر می‌تواند به ایجاد اختلاط ناشی از ورود و خروج جریان‌های قابل‌توجه و وجود گرادیان شدید شوری در این تراز ارتفاعی باشد که هر گونه اختلاط موضعی را با تغییرات شدید شوری همراه می‌سازد. در لایه‌های عمیق‌تر مخزن نیز اگر چه تغییراتی دیده می‌شود، اما دلیل اصلی آن نحوه برداشت اطلاعات شوری و فواصل ثبت اطلاعات در عمق مخزن است که موجب بروز خطای قابل‌توجهی در درونیابی‌ها به‌ویژه در ترازهای دارای گرادیان شدید شوری (ترازهای بین ۸۷ تا ۹۸ متری) شده است.

در بازه زمانی ۱۴ تا ۲۸ مرداد ۱۴۰۲ نیز وضعیت تغییرات شوری در عمق مخزن مشابه با بازه زمانی قبلی است و تنها تفاوت عمده مربوط به کاهش شوری در ترازهای ۹۶ تا ۹۸ متری مخزن است که به دلیل تخلیه جریان از GRP در این بازه زمانی است. در مقطع زمانی ۶ تا ۲۰ مرداد ۱۴۰۳ نیز همان شرایط مقطع زمانی اول قابل‌ملاحظه است، با این تفاوت که در این بازه زمانی تخلیه جریان از آبگیر تحتانی صورت گرفته و کاهش شوری آب در ترازهای ۱۲۳ تا ۱۳۰ متری مخزن نیز مشاهده شده است.

بررسی وضعیت تغییرات شوری در عمق مخزن سد گتوند در ۳ بازه زمانی مورد بررسی نشان‌دهنده تأثیر جریان ورودی قابل‌ملاحظه از بالادست در ایجاد اختلاط هر چند جزئی بین لایه‌های مختلف مخزن در ترازهای میانی است که اثر آن در لایه‌هایی که گرادیان شوری زیادی دارند، بیش‌تر قابل‌ملاحظه است. با این حال مشاهده می‌شود که تخلیه جریان از GRP و آبگیر تحتانی با کاهش شوری آب مخزن همبستگی دارد.

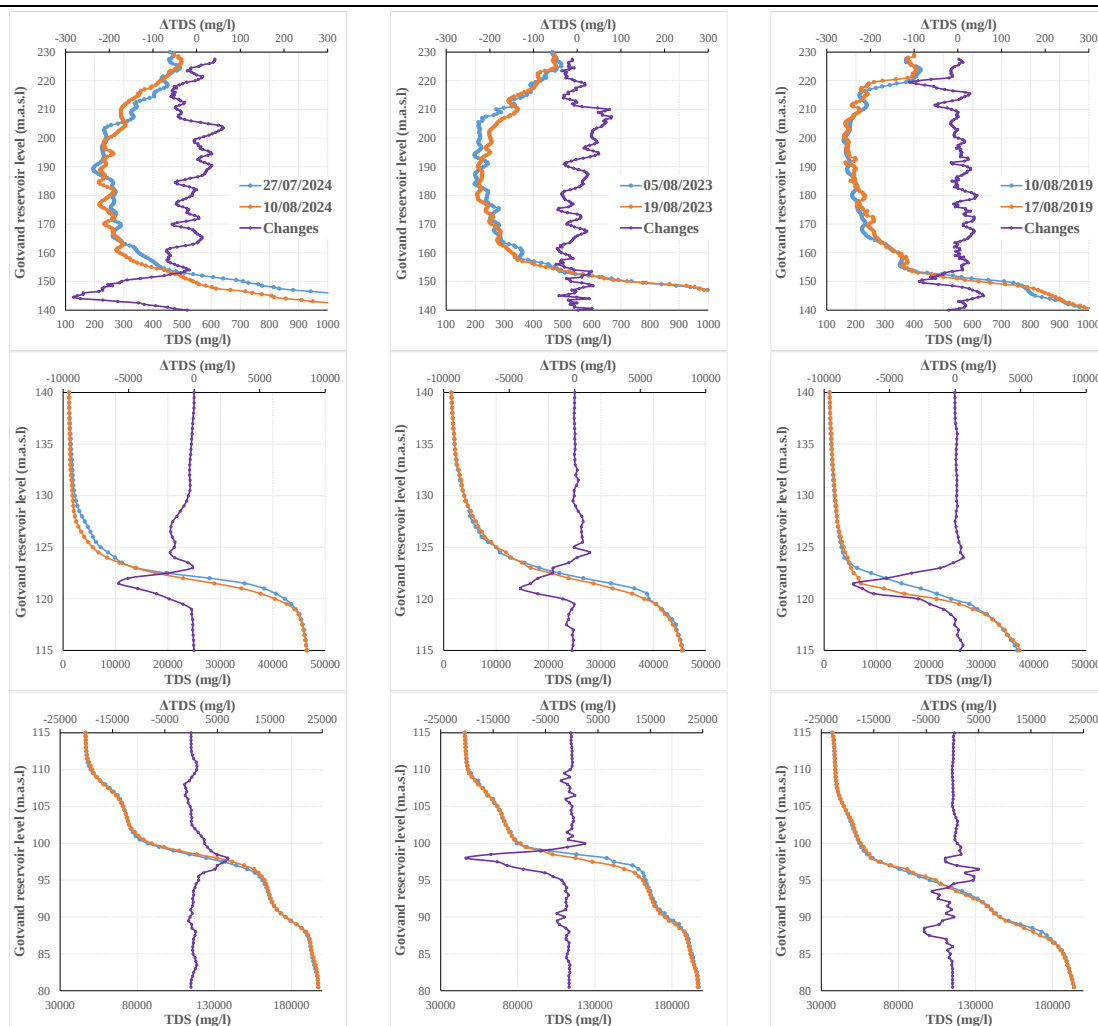
سیلاب‌های میان حوضه

برای تحلیل‌های این بخش وقایع شاخص سیلابی که در خلال آن‌ها جریان نسبتاً پایینی از سد مسجدسلیمان تخلیه شده است، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور و بر اساس وقایع سیلابی

شاخص میان‌حوضه سد گتوند در طول دوره بهره‌برداری، سه واقعه مربوط به ۲ فروردین ۱۳۹۴، ۴ آذر ۱۳۹۷ و ۱۲ بهمن ۱۴۰۱ به عنوان وقایع مناسب تحلیل موردنظر انتخاب شد (شکل ۸).

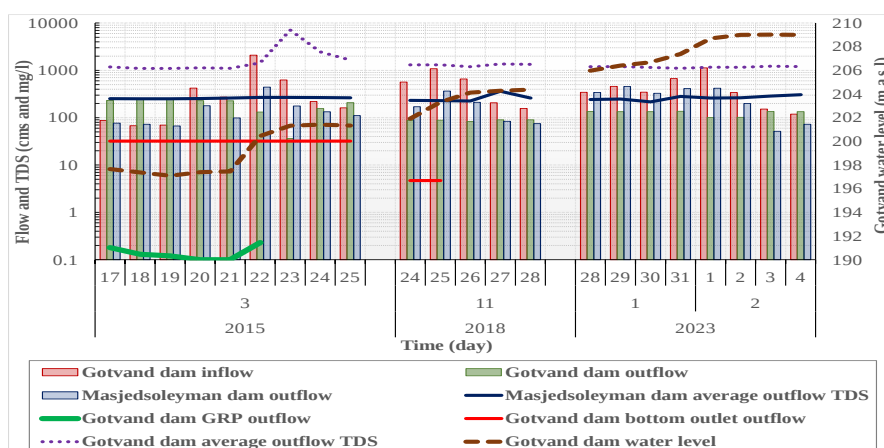
در واقعه سیلابی ۲ فروردین ۱۳۹۴، دبی متوسط روزانه خروجی از سد مسجدسلیمان و ورودی به سد گتوند به ترتیب معادل ۴۴۳ و ۲۰۹۷ مترمکعب بر ثانیه بوده و برآورد ارائه شده در خصوص دبی حداکثر لحظه‌ای ورودی به مخزن سد گتوند نیز رقم ۶۲۱۵ مترمکعب در ثانیه بوده است. در روزهای منتهی به روز وقوع سیلاب مذکور، تخلیه از GRP با دبی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ لیتر در ثانیه صورت گرفته که بلافاصله پس از وقوع سیلاب قطع شده است. در همین ایام، آبگیر تحتانی نیز دبی ثابت ۳۲ مترمکعب در ثانیه را تخلیه کرده که وقوع سیلاب خللی در کار آن ایجاد نکرده است. با توجه به اطلاعات در دسترس از برداشت وضعیت شوری مخزن، برای بررسی تغییرات شوری در عمق مخزن از اطلاعات شوری در روزهای ۲۶ اسفند ۱۳۹۳ و ۵ فروردین ۱۳۹۴ استفاده شده است که مقادیر آن‌ها و تغییرات به تفکیک در سه بازه عمقی مخزن در ستون الف شکل ۹ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، طی این واقعه سیلابی تقریباً تمامی ترازهای مخزن دچار تغییر قابل‌ملاحظه مقدار شوری شده‌اند که به جز بین ترازهای ۱۱۵ تا ۱۲۰ متری که با مقداری کاهش شوری همراه بوده، در مابقی ترازها اغلب افزایش شوری دیده می‌شود. با توجه به اینکه این واقعه در اوایل دوره بهره‌برداری از مخزن اتفاق افتاده و در سایر وقایع سیلابی میان‌حوضه این شرایط دیده نمی‌شود، به احتمال فراوان این افزایش قابل‌توجه شوری ناشی از انحلال سریع نمک از توده عنبل در اثر افزایش سریع تراز آب مخزن و جریان‌های سریع در مجاورت آن بوده است. افزایش زیاد شوری آب در ترازهای ۹۵ تا ۱۱۵ متری مخزن، این فرضیه را تا حد زیادی تقویت می‌کند. هر چند افزایش شوری در ترازهای بالایی می‌تواند تحت تأثیر شوری جریان ورودی میان‌حوضه نیز باشد که اطلاعاتی از کم و کیف آن در دست نیست.

در واقعه سیلابی ۴ آذر ۱۳۹۷، دبی متوسط روزانه خروجی از سد مسجدسلیمان و ورودی به سد گتوند به ترتیب معادل ۳۶۴ و ۱۰۸۰ مترمکعب بر ثانیه بوده و برآورد ارائه شده در خصوص دبی حداکثر لحظه‌ای ورودی به مخزن سد گتوند نیز رقم ۵۲۶۸ مترمکعب در ثانیه بوده است. در روزهای منتهی به روز وقوع سیلاب مذکور، تخلیه از GRP صورت نگرفته و آبگیر تحتانی نیز جریانی با دبی بسیار پایین حدود ۴/۷ مترمکعب در ثانیه را تخلیه کرده که بلافاصله پس از روز سیلاب بسته شده است.



شکل ۷- وضعیت شوری در عمق مخزن سد گتوند به تفکیک سه بازه عمقی مختلف (ردیف‌های ۱ تا ۳) در ابتدا و انتهای بازه‌های زمانی مورد ارائه در شکل ۶ (ستون‌های الف و ب و ج)

Figure 7. Salinity conditions along the reservoir depth in the Gotvand Dam, classified into three distinct depth intervals (rows 1–3), at the beginning and end of the time periods presented in Figure 6 (columns a, b, and c).



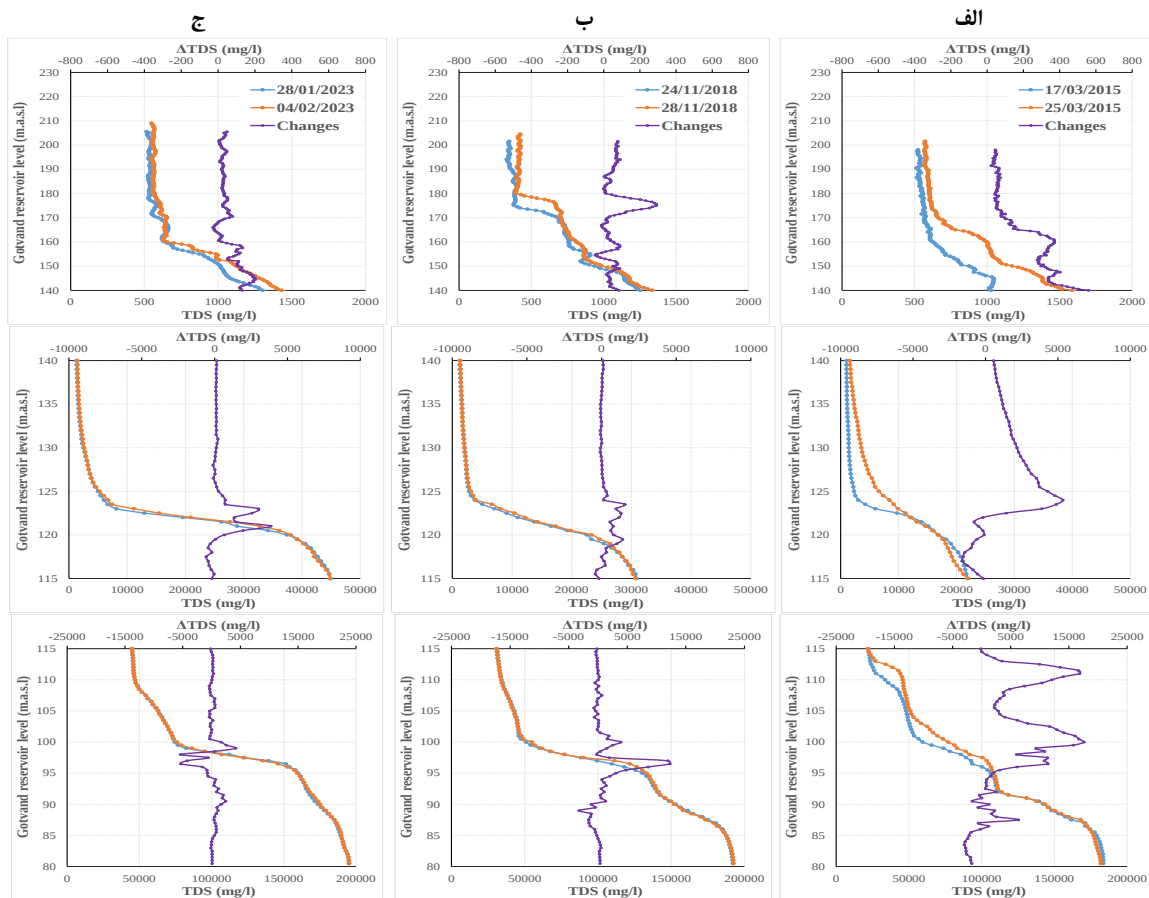
شکل ۸- مقادیر متوسط روزانه جریان خروجی از سد‌های گتوند و مسجدسلیمان در سه رخداد سیلابی میان‌حوضه، وضعیت تخلیه جریان از GRP و تخلیه‌کننده تحتانی، شوری جریان ورودی به مخزن گتوند و تغییرات تراز آب آن

Figure 8. Mean daily outflow discharge from the Gotvand Dam and the Masjed Soleyman Dam during three intermediate sub-basin flood events in, the release conditions from the GRP and the bottom outlet, the salinity of inflow to the Gotvand reservoir, and its water level fluctuations.

استفاده شد که مقادیر آن‌ها و تغییرات به تفکیک در سه بازه عمقی مخزن در ستون ج شکل ۹ آمده است. در این واقعه سیلابی میزان شوری آب در برخی از ترازهای فوقانی مخزن (به‌ویژه ترازهای ۱۴۰ تا ۱۶۰ متری) افزایش نشان می‌دهد که احتمالا تحت تأثیر شوری جریان ورودی از میان حوضه است. در ترازهای میانی حوضه مقداری افزایش شوری در ترازهای ۱۲۰ تا ۱۲۵ و مقداری کاهش شوری در ترازهای ۱۱۵ تا ۱۲۰ متری دیده می‌شود که با توجه به قرارگیری این ترازها در ناحیه دارای گرا دیان شوری بالا، این تغییرات می‌تواند ناشی از اثر موج سیلاب ورودی بر ایجاد اختلاط (هر چند ضعیف) در این نواحی باشد. در این واقعه سیلابی در ترازهای پایینی مخزن تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در شوری‌ها دیده نمی‌شود. در مجموع بررسی تغییرات شوری در عمق مخزن سد گتوند طی وقایع سیلابی فوق‌الذکر که تقریباً در فاصله زمانی ۴ ساله با یکدیگر قرار دارند، نشان می‌دهد که ظرفیت انحلال سطحی و سریع نمک از توده غنبل و ورود آن به مخزن در شرایط ورود جریان‌های زیاد به مخزن و افزایش تراز آن در کوتاه‌مدت در گذر زمان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

برای بررسی تغییرات شوری در عمق مخزن در اثر این واقعه سیلابی، از اطلاعات برداشت شده شوری در روزهای ۳ و ۷ آذر ۱۳۹۷ استفاده شد که مقادیر آن‌ها و تغییرات به تفکیک در سه بازه عمقی مخزن در ستون ب شکل ۹ آمده است. در این واقعه افزایش جزئی شوری در برخی از ترازهای فوقانی مخزن دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل شوری بیش‌تر جریان سیلابی ورودی از میان حوضه باشد. اما در ترازهای تحتانی بین ۹۵ تا ۱۰۰ متری نیز افزایش شوری دیده می‌شود که احتمالا ناشی از تشدید ورود جریان شور از توده غنبل تحت تأثیر شرایط سیلابی و افزایش جزئی تراز آب مخزن باشد.

در واقعی سیلابی ۱۲ بهمن ۱۴۰۱، دبی متوسط روزانه خروجی از سد مسجدسلیمان و ورودی به سد گتوند به ترتیب معادل ۴۱۹ و ۱۱۲۶ مترمکعب بر ثانیه بوده و برآورد ارائه شده در خصوص دبی حداکثر لحظه‌ای ورودی به مخزن سد گتوند نیز میزان ۱۸۳۷ مترمکعب بر ثانیه بوده است. در روزهای قبل و بعد از وقوع این سیلاب، تخلیه از GRP و آبگیر تحتانی صورت نگرفته است. برای بررسی تغییرات شوری در عمق مخزن در خلال این واقعه سیلابی، از اطلاعات برداشت شده شوری در روزهای ۸ و ۱۵ بهمن ۱۴۰۱



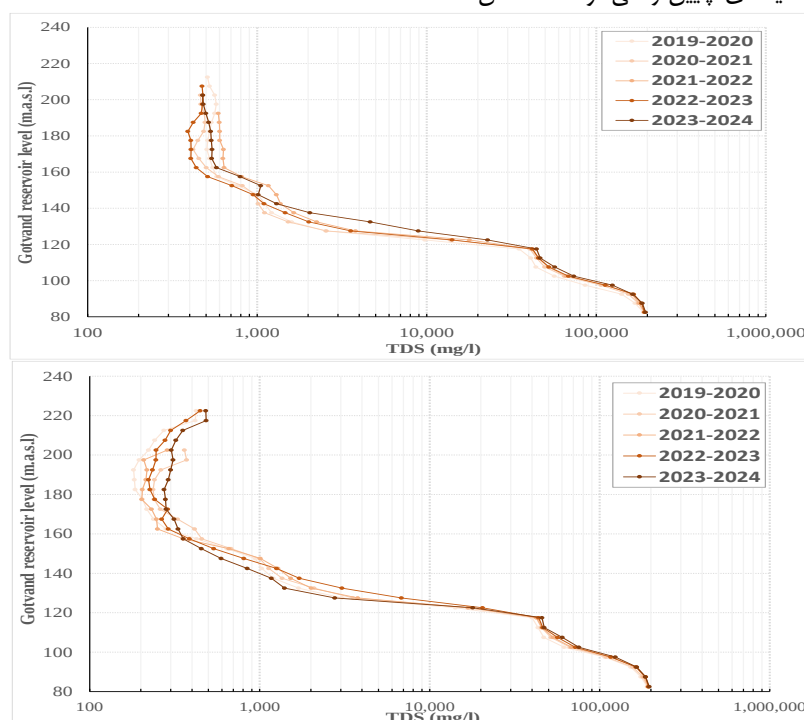
شکل ۹- وضعیت شوری در عمق مخزن سد گتوند به تفکیک ۳ بازه عمقی مختلف (ردیف‌های ۱ تا ۳) در ابتدا و انتهای بازه‌های زمانی مورد ارائه در شکل ۸ (ستون‌های الف و ب و ج)

Figure 9. Salinity conditions along the reservoir depth in the Gotvand Dam, classified into three distinct depth intervals (rows 1–3), at the beginning and end of the time periods presented in Figure 8 (columns a, b, and c).

دوره‌های گرم و سرد سال

تغییرات دوره‌ای شرایط دمایی در طول سال می‌تواند بر وضعیت لایه‌بندی شوری آب در مخزن سد گتوند اثرگذار باشد. وضعیت لایه‌بندی شوری مخزن سد گتوند در ۵ سال اخیر به تفکیک برای انتهای دوره سرد (اسفند) و گرم (شهریور) در شکل ۱۰ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در دوره‌های گرم سال پروفیل شوری در عمق مخزن اغلب در ۲۰ تا ۳۰ متر سطحی مخزن به صورت معکوس و کاهشی است که دلیل آن ورود جریان‌های شور و گرم‌تر از میان حوضه و همچنین افزایش شوری لایه‌های سطحی به واسطه تبخیر است. این شرایط منجر به کاهش چگالی لایه‌های فوقانی نسبت به لایه‌های پایین‌تر می‌شود که امکان

ایجاد یک پروفیل کاهشی شوری را در عمق مخزن فراهم ساخته است. شایان ذکر است، در این شرایط، جریان‌های ورودی به مخزن علی‌رغم اینکه شوری پایین‌تری دارند، به دلیل دارا بودن دمای پایین‌تر، دارای چگالی بیش‌تری هستند و در ترازهای پایین‌تر مخزن قرار می‌گیرند. در فصول سرد سال لایه‌بندی شوری در بخش‌های فوقانی مخزن کم‌تر دیده می‌شود و عموماً مقدار شوری در این بخش‌های مخزن تقریباً ثابت است. بررسی وضعیت شوری در لایه‌های میانی و پایینی مخزن نشان‌دهنده تأثیرگذاری ناچیز شرایط فصلی است و در این لایه‌ها وضعیت شوری تابع میزان ورود نمک و تخلیه آن از GRP و آبگیر تحتانی است.



شکل ۱۰- تغییرات شوری در عمق مخزن سد گتوند در دوره ۵ ساله ۱۳۹۹-۱۴۰۳ برای (الف) انتهای فصل سرد و (ب) انتهای فصل گرم
Figure 10. Salinity variations along the depth of the Gotvand Dam reservoir over the five-year period 2020-2024, for (a) the end of the cold season and (b) the end of the warm season.

نیروگاه صورت گرفته، مقدار شوری آب در لایه‌های فوقانی مخزن به شدت کاهش می‌یابد که این امر به دلیل جایگزینی آب تخلیه شده توسط جریان ورودی با شوری پایین از بالادست (خروجی سد مسجدسلیمان) است. آبگیر تحتانی که از ابتدای آبیگری مخزن تا انتهای سال ۱۳۹۵ به جز در مواقع محدودی در دست بهره‌برداری بوده است، از سال ۱۳۹۵ تا پایان سال ۱۴۰۲ بسیار کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته و در مواقع استفاده نیز جریان نسبتاً پایینی را تخلیه نموده است. در نیمه اول سال ۱۴۰۳ و احتمالاً به دلیل افزایش قابل‌ملاحظه مقادیر شوری در ترازهای میانی مخزن، تخلیه جریان از این آبگیر در بسیاری از روزها صورت گرفته است (شکل ۱۱-ب). بررسی این اطلاعات نشان می‌دهد هر زمان تخلیه جریان از آبگیر تحتانی صورت گرفته، میزان شوری در لایه‌های

نقش مدیریت خروجی از مخزن سد گتوند بر شوری

خروج جریان از مخزن سد گتوند به‌طور معمول از طریق آبگیر نیروگاه صورت می‌گیرد، اما با توجه به مشکل تجمع شوری در لایه‌های تحتانی مخزن و با هدف مدیریت ریسک آن، در برخی شرایط مقداری جریان توسط GRP و آبگیر تحتانی نیز از مخزن تخلیه شده است. میزان تخلیه جریان از آبگیر نیروگاه ارتباط مستقیم با نیاز تولید برق و همچنین نیازهای آبی پایین‌دست دارد. شکل ۱۱-الف مقادیر تخلیه ماهانه جریان از آبگیر نیروگاه و شرایط شوری متوسط در لایه‌های نزدیک به تراز ارتفاعی دهانه این آبگیر در طول دوره بهره‌برداری از مخزن را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان گفت در زمان‌هایی که تخلیه زیادی از آبگیر

فوق‌شور تجمع یافته در ترازهای پایینی مخزن سد گتوند به واسطه بی‌ضرر بودن آن‌ها در شرایط موجود و معمول بهره‌برداری از سد است. تخلیه‌ی زیاده‌تر این آب‌ها، تأثیر مثبت عملیاتی بر شرایط کیفیت آب مخزن سد گتوند ندارد و تنها باعث کاهش کیفیت جریان پایین‌دست می‌شود. بنابراین، به‌دلیل تأثیر خروجی لوله GRP بر کیفیت آب پایین‌دست، همانطور که در مطالعات Sharif and Hamzeh (2022) و Zareie et al., (2025) به آن اشاره شده است، استفاده از این سازه باید با احتیاط انجام شود. شایان ذکر است، در صورتی که روند انباشت آب‌های فوق‌شور به شرایطی منجر شود که ترازهای بالاتر را تهدید کند، امکان و دلیل لازم برای بهره‌برداری جدی‌تر از لوله GRP برای تسکین شرایط شوری مخزن وجود خواهد داشت که پیش‌بینی و تعبیه این سازه از ابتدا نیز برای چنین شرایطی صورت گرفته است. شکل ۱۲ تغییرات زمانی شوری، تراز آب، و عملکرد خروجی‌ها در کنترل شوری را به‌صورت هم‌زمان نشان می‌دهد.

بین ترازهای ۱۲۵ تا ۱۵۰ متری مخزن به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است که میزان این کاهش با مقدار جریان تخلیه شده و تداوم زمانی تخلیه ارتباط مستقیم دارد. لوله GRP نیز از شروع آبیگری مخزن تاکنون به تناوب برای تخلیه آب‌های فوق‌شور در ترازهای پایینی مخزن مورد بهره‌برداری قرار گرفته است (شکل ۱۱-ج). در سال‌های اول بهره‌برداری مخزن جریان بیش‌تری از این طریق تخلیه می‌شده و تخلیه از این مجرا در بسیاری از زمان‌ها صورت گرفته است. اما در سال‌های اخیر میزان به‌کارگیری این تخلیه‌کننده کاهش چشم‌گیری داشته و در مواقعی که تخلیه جریان نیز از آن صورت گرفته اغلب با دبی‌های بسیار پایین‌تر از گذشته (بین ۵۰ تا ۱۵۰ لیتر در ثانیه) بوده است. بررسی صورت گرفته نشان می‌دهد با توجه به دبی بسیار پایین جریان خروجی از GRP، میزان اثرگذاری آن محدود بوده و در زمان استفاده از آن، کاهش شوری آب در ترازهای بین ۹۰ تا ۱۰۰ متری مشاهده شده است. باید توجه داشت که دلیل حجم کم تخلیه از GRP در درجه اول عدم نیاز به تخلیه جدی آب‌های



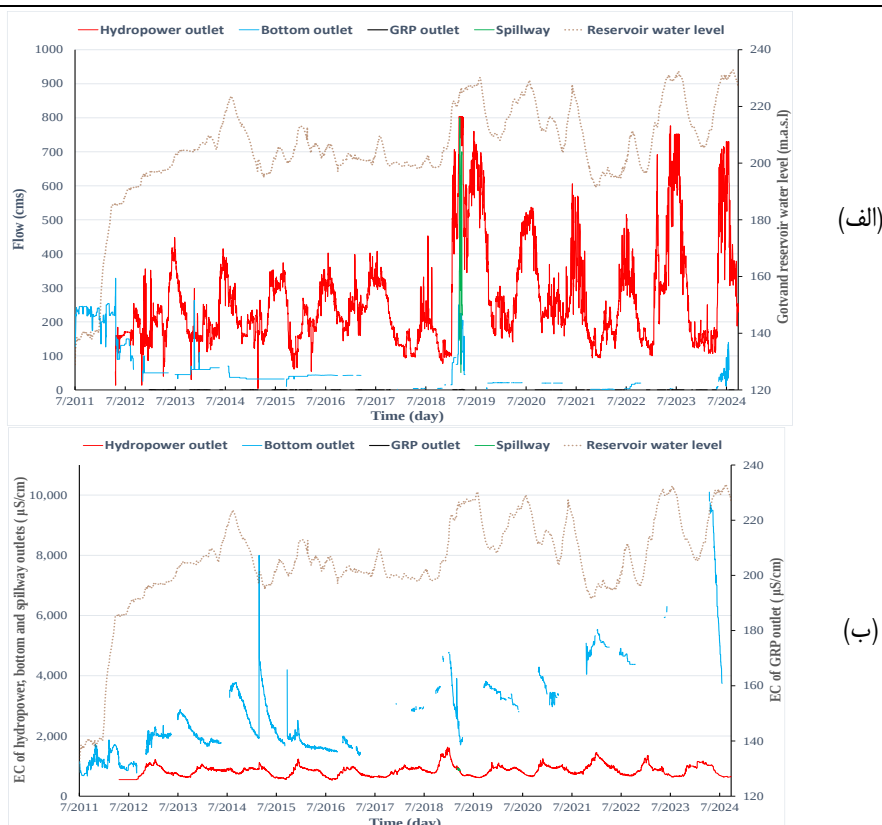
(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۱۱- مقادیر ماهانه جریان خروجی از آبیگر نیروگاه (الف)، آبیگر تحتانی (ب) و GRP (ج) و اثر آنها بر متوسط لایه‌های نزدیک به خروجی‌ها

Figure 11. Monthly outflow discharge from the power plant intake (a), the bottom outlet (b), and the GRP (c), and their effects on the average TDS of the layers adjacent to the outlets.



شکل ۱۲- مقادیر جریان خروجی (الف) و شوری جریان خروجی (ب) از مخزن سد گتوند به تفکیک سازه‌های مختلف در طول دوره بهره‌برداری

Figure 12. Outflow discharge (a) and outflow salinity (b) from Gotvand Dam reservoir, according to individual outlet structures throughout the operation period.

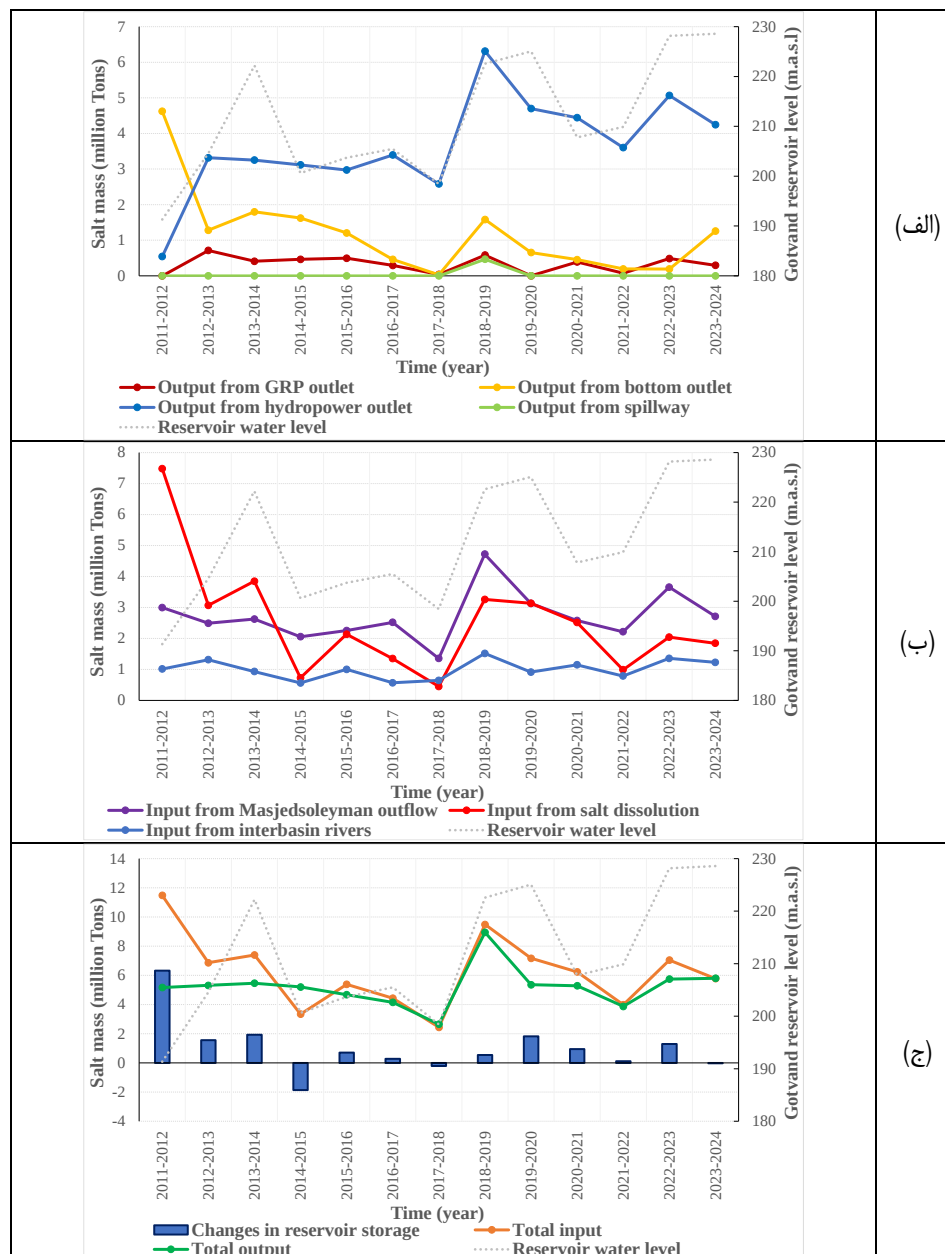
بیان نمک مخزن سد گتوند

تعیین بیان نمک در مخزن سد گتوند و محاسبه مقدار مؤلفه‌های مختلف آن، علاوه بر ایجاد امکان محاسبه میزان انحلال و ورود نمک از سازند عنبل به عنوان مهم‌ترین منبع اضافی ورود نمک به آب رودخانه کارون در اثر احداث و بهره‌برداری از مخزن سد گتوند، می‌تواند در درک وضعیت چرخه نمک و تأثیر کمی اقدامات مدیریت شوری مخزن طی دوره بهره‌برداری مفید باشد. لذا در این بخش، محاسبه بیان نمک مخزن به تفکیک ۱۳ سال آبی، صورت گرفت. محاسبه مقدار موجودی نمک مخزن در ابتدا و انتهای هر سال آبی بر اساس پروفیل شوری برداشت شده در انتهای شهریور ماه و حجم آب موجود در لایه‌های با شوری مختلف، صورت گرفت. شایان ذکر است در این فرآیند فرض امکان تعمیر وضعیت پروفیل برداشت شده در ایستگاه شماره ۱ به کل مخزن، یک فرض مهم است. اعتبار این فرض با نمونه‌برداری همزمان چندین نقطه مخزن تأیید شده است. مقدار نمک خروجی مخزن بر اساس اطلاعات ثبت شده از جریان و شوری هر یک از تخلیه‌کننده‌ها به‌طور روزانه محاسبه شد و برای هر سال آبی جمع‌شد. برای محاسبه جرم نمک ورودی به مخزن، اطلاعات روزانه شوری و مقدار جریان خروجی سد

مسجدسلیمان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مقدار نمک ورودی همراه با جریان‌های میان‌حوضه نیز بر اساس حجم برآورد شده برای این جریان‌ها و شوری تخمین زده شده بر اساس برداشت‌های موردی در دسترس، صورت گرفت. شایان ذکر است، عدم قطعیت در برآورد این مؤلفه نسبتاً زیاد است که به دلیل عدم وجود ایستگاه فعال در میان‌حوضه، غیرقابل اجتناب است. در نهایت، با استفاده از رابطه بیان نمک و محاسبه سایر مؤلفه‌ها به شرحی که اشاره شد، مقدار نمک ورودی ناشی از انحلال سازند عنبل قابل محاسبه است که نتایج آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۳-الف، عمده جرم نمک خروجی از مخزن به همراه جریان خروجی نیروگاه تخلیه می‌شود که دلیل آن حجم بالای جریان خروجی از نیروگاه است. مقدار این مؤلفه عمدتاً تابع حجم جریان سالانه خروجی از مخزن سد گتوند است. در مقابل، جرم نمک خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی و لوله GRP اگر چه در مقایسه با جریان نیروگاه بسیار کم‌تر است، اما با توجه به خروج آب شورتر لایه‌های میانی و پایینی مخزن توسط این تخلیه‌کننده‌ها با هدف مستقیم کنترل ریسک شوری، ارتباط مستقیم با وضعیت ترسالی و خشکسالی ندارد و تابع مقدار تخلیه صورت گرفته بر اساس ملاحظات مدیریت ریسک شوری بوده است. همان‌طور که

جرم کل نمک موجود در جریان خروجی از سد مسجدسلیمان (که به‌عنوان ورودی سد گتوند در نظر گرفته می‌شود) به‌دلیل حجم زیاد آن، مقدار قابل توجهی به نظر می‌رسد، اما غلظت آن کم است. بر اساس شکل ۱۳-ج، تغییرات نمک موجود در مخزن در سال اول آبرگیری چشم‌گیر است، اما در سال‌های بعد به شدت کاهش می‌یابد. در این شکل، مدیریت مؤثر مخزن از طریق دریاچه‌های خروجی از سال ۱۳۹۸ به بعد به‌وضوح قابل مشاهده است.

در شکل ۱۳-ب مشاهده می‌شود، جرم نمک ورودی از سازند گچساران (عنبلی)، اگرچه در ابتدا بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص داده است (همان‌طور که توسط Dahrzma et al. (2014) و Salehpour et al. (2025) نشان داده شده است)، اما به‌طور کلی، روندی کاهشی دارد. افزایش نمک ورودی از این سازند در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷، ناشی از وقوع سیلاب‌های بزرگ در آن سال و تداوم بالا بودن تراز آب مخزن است. همچنین، اگرچه



شکل ۱۳- (الف) جرم سالانه نمک خروجی مخزن سد گتوند به تفکیک دریاچه‌های مختلف، (ب) جرم سالانه نمک ورودی به مخزن سد گتوند به تفکیک منبع، و (ج) وضعیت سالانه مؤلفه‌های اصلی بیلان نمک در مخزن سد گتوند.

Figure 13. (a) Annual salt mass of the outflow discharges from different outlets, (b) annual salt mass entering the reservoir from different salt sources, and (c) annual status of the main salt balance components of the Gotvand Dam reservoir.

این مطالعه با استفاده از داده‌های میدانی بلندمدت (۱۳ سال)، رفتار شوری مخزن سد گتوند و نقش سازه‌های تخلیه‌کننده در مدیریت آن را ارزیابی کرد. یافته‌ها نشان داد که خروجی تحتانی نقش کلیدی در کنترل شوری لایه‌های میانی و جلوگیری از انتقال شوری به لایه‌های بالایی دارد، درحالی‌که لوله GRP تأثیر محدودی در مقیاس مخزن داشته است. تحلیل بیلان جرم نمک نشان داد که ورودی نمک از سازند گچساران روند کاهشی داشته و ذخیره نمک مخزن پس از مرحله اولیه آبیگری تثبیت شده است. از منظر مدیریتی، بهره‌برداری پایدار از خروجی تحتانی به عنوان راهبرد اصلی کنترل شوری توصیه می‌شود. این راهبرد نه تنها از تجمع شوری در لایه‌های میانی جلوگیری می‌کند، بلکه ریسک اثرگذاری شوری بر کیفیت آب خروجی نیروگاه را کاهش می‌دهد. در مقابل، استفاده از سازه‌های تخلیه در عمق‌های کم‌تر مانند لوله GRP باید با احتیاط و با در نظر گرفتن اثرات بالقوه بر کیفیت آب رودخانه پایین‌دست انجام شود.

باید توجه داشت که این مطالعه محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌هایی را به همراه دارد. به عنوان مثال، داده‌های این مطالعه اغلب از نزدیک‌ترین نقطه به بدنه سد جمع‌آوری شده‌اند و ممکن است تغییرپذیری مکانی شوری در سایر نقاط مخزن را به طور کامل منعکس نکنند. همچنین تخمین ورودی نمک از سازند گچساران بر اساس فرضیات ساده‌سازی شده (نظیر غلظت ثابت در جریان‌های میان‌حوضه) انجام شده و نیازمند اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر است. علاوه بر آن، اثرات بلندمدت تخلیه مداوم شوری بر اکوسیستم رودخانه پایین‌دست نیز در این مطالعه بررسی نشده است. همان‌طور که ذکر شد، ایستگاه آب‌سنجی فعالی در دوره بهره‌برداری از مخزن سد گتوند در میان‌حوضه وجود ندارد و از این رو مشاهدات مستقیم از جریان‌ات ورودی این شاخه‌ها و شرایط کیفی آن‌ها در اختیار نیست. بنابراین تخمین مقدار جریان ورودی از شاخه‌ها، با کسر مقدار جریان ورودی به مخزن سد گتوند از میزان جریان خروجی مخزن سد مسجدسلیمان محاسبه شده است که در برخی موارد منجر به برآورد مقادیر منفی از جریان شده است. بنابراین یکی از مسائل مهم در بررسی و پایش مخزن سد گتوند، عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری شده است که می‌تواند نتایج حاصل را تحت تأثیر قرار دهد. برای بررسی دقیق‌تر و قابل استنادتر، باید اطلاعات دقیق و معتبری از کمیت و کیفیت آب به‌ویژه در شرایط سیلابی در اختیار باشد که این مسأله باید مورد توجه تصمیم‌گیران قرار گیرد. لذا می‌توان پیشنهاد کرد که توسعه مدل‌های عددی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی توزیع مکانی شوری و پیش‌بینی اثرات سناریوهای مختلف بهره‌برداری، بررسی دقیق‌تر منابع ورودی نمک (به‌ویژه جریان‌های میان‌حوضه از سازند گچساران) و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تخلیه شوری بر کیفیت

آب و اکوسیستم رودخانه کارون در پایین‌دست موردتوجه قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که با توجه به ماهیت پویای شوری، پایش مستمر شوری در مخزن بر اساس شرایط هیدرولوژیکی و کیفی به‌منظور ارزیابی پایداری اثربخشی تخلیه‌کننده تحتانی ادامه یابد. علاوه بر آن، بررسی امکان بهینه‌سازی زمان‌بندی و دبی تخلیه از خروجی تحتانی برای کاهش اثرات بر پایین‌دست و حفظ کیفیت آب مخزن و توسعه پروتکل‌های مدیریتی یکپارچه که هم کیفیت آب مخزن و هم نیازهای زیست‌محیطی پایین‌دست را در نظر بگیرد، مورد توجه سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و دستگاه‌های اجرایی قرار گیرد.

در نهایت ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که اگرچه روابط مشاهده‌شده میان عملیات تخلیه و تغییرات شوری با مکانیزم‌های فیزیکی شناخته‌شده مانند لایه‌بندی چگالی و جریان‌های همرفتی سازگار هستند، اما به دلیل ماهیت مشاهده‌ای این مطالعه و وجود عوامل مداخله‌گری چون تغییرات ورودی، انحلال نمک از سازند عنب و تغییرات فصلی، نمی‌توان رابطه علی قطعی را بدون مدل‌سازی عددی یا آزمایش کنترل‌شده اثبات کرد. با این حال یافته‌های این مطالعه همبستگی‌های قوی و سازگار با تئوری را نشان می‌دهند که می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری مدیریتی و مطالعات آینده باشند.

سیاس‌گذاری

پژوهش حاضر در قالب قرارداد پژوهشی شماره ۱۴۰۳/۵۹۲ بین دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته و شرکت مهندسی مشاور سد تونل پارس انجام شده است که بدین وسیله از همکاری و حمایت کارفرمای محترم طرح، قدردانی به‌عمل می‌آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

اشکان فرخ‌نیا: منابع، نرم‌افزار/تحلیل داده‌ها، ویرایش و بازبینی مقاله

مرتضی افتخاری: تحلیل داده‌ها، ویرایش و بازبینی مقاله
آمنه میان‌آبادی: بررسی و تحلیل نتایج، نگارش نسخه اولیه مقاله
منابع

صالح‌پور، غزاله، زایری، محمدرضا، و زینی‌وند، مهدی (۱۴۰۴). کلاس‌بندی و مدل‌سازی مبتنی بر محاسبات نرم کیفیت آب رودخانه کارون: ایستگاه‌های آب‌سنجی گتوند و اهواز. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳(۴۸)، ۱۲۵-۱۴۵. doi:10.22055/jise.2024.45876.2114

قمشی، مهدی، و حق‌بین، احمد (۱۳۹۲). آنالیز شوری در سد گتوند علیا و اثر آن بر رودخانه کارون. *چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی*. ۵ اسفند ۱۳۹۲، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران. <https://civilica.com/doc/251763>

منجری، سارا، مومنی، منصور، نجارچی، محسن، منجری، نرگس، و حسونی‌زاده، هوشنگ (۱۴۰۰). شبیه‌سازی توزیع شوری به علت کارست نمکی فعال در سد گتوند با استفاده از سیستم دینامیک و تعیین پارامترهای مؤثر بر مقدار شوری. *پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی*، ۱(۱۳۸)، ۶۷-۹۸. doi:10.22108/jssr.2021.129789.1209

ناظری تهرودی، محمد، و شهیدی، علی (۱۳۹۶). بررسی تاثیر احداث سد گتوند بر تغییرات سری زمانی پارامترهای کیفی جریان. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳(۳)، ۱۷۵-۱۸۰. https://www.iwrr.ir/article_41709.html?lang=en

ایزدجو، فرهاد، معصومی، مصطفی، کریمی، غلامحسین، واثلی، عارف، و کلانی، اردشیر (۱۴۰۰). بررسی تاثیر همزمان مدیریت سازه ای (احداث بند خاکی مارد) و مدیریت غیرسازه ای (رهاسازی های موجی آب از سدهای دز و گتوند و عملکرد ایستگاه پمپاژ مارد) بر وضعیت شوری انتهای رودخانه کارون و رودخانه بهمنشیر طی خشکسالی ۱۴۰۰. *دوازدهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه*. ۴ بهمن ۱۴۰۰، دانشگاه شهیدچمران، اهواز، ایران. <https://civilica.com/doc/1450908>

دهرآزما، بهناز، حافظی مقدس، ناصر، حسوند، مانده، و کریمی، رامین (۱۳۹۳). بررسی ژئوشیمی سازندهای مخزن سد گتوند علیا و تاثیر آنها بر کیفیت آب سد. *انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، ۷(۲۰)، ۲۹-۴۰.

https://www.jiraeg.ir/article_68340.html?lang=en

سعیدی رضوی، جواد (۱۳۹۱). راهکارهای غیرسازه‌ای در مدیریت شوری مخازن سر (مطالعه موردی: سد گتوند علیا). *پایان‌نامه کارشناسی/ارشد*. دانشگاه تربیت معلم تهران.

شریف، مرتضی، و حمزه، سعید (۱۴۰۰). بررسی تأثیر سد گتوند بر تغییرات شوری خاک و پوشش گیاهی زمین‌های پایین دست سد با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای و سنجه‌های طیفی. *علوم محیطی*، ۱۹(۴)، ۲۲۵-۲۴۸. doi:10.52547/envs.2021.1014

Persian). <https://civilica.com/doc/251763>

Izadjo, F., Masoumi, M., Karimi, G., Vaeili, A., & Kalani, A. (2022). Investigation of the simultaneous impact of structural management (construction of the Mared earth dam) and non-structural management (pulsed water releases from the Dez and Gotvand dams and the performance of the Mared pumping station) on the salinity st. The 12th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran (In Persian). <https://civilica.com/doc/1450908>

Jahangiry Fard, M., Amanipoor, H., Battaleb-Looie, S., & Ghanemi, K. (2019). Evaluation of effect factors on water quality of Karun River in downstream and lake of the Gotvand-e-Olya Dam (SW Iran). *Applied Water Science*, 9(7), 1–14. doi: 10.1007/s13201-019-1040-7

Jalali, L., Zarei, M., & Gutiérrez, F. (2019). Salinization of reservoirs in regions with exposed evaporites. The unique case of Upper Gotvand Dam, Iran. *Water Research*, 157, 587–599. doi: 10.1016/j.watres.2019.04.015

Mansournejad, M., Kalantari, B., & Adeli, M. M. (2015). The Investigation of Negative Effects of Salt Dome on the Quality of Water in Gotvand Olya Dam and the Use of Cut-off Wall as Treatment. *American Journal of Civil Engineering*, 3(2–2), 53–56. doi: 10.11648/j.ajce.s.2015030202.20

Merchán, D., Auqué, L. F., Acero, P., Gimeno, M. J., & Causapé, J. (2015). Geochemical processes controlling water salinization in an irrigated

References

- Beheshti, A., Kamanbedast, A., & Akbari, H. (2013). Seepage Analysis of Rock-Fill Dam Subjected to Water Level Fluctuation: A case study on Gotvand-Olya Dam. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 4(2), 155–160. doi: 10.5829/idosi.ijee.2013.04.02.13
- Cary, L., Petelet-Giraud, E., Bertrand, G., Kloppmann, W., Aquilina, L., Martins, V., Hirata, R., Montenegro, S., Pauwels, H., Chatton, E., & Franzen, M. (2015). Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): a multi-isotope approach. *Science of The Total Environment*, 530, 411–429. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.015
- Dahrazma, B., Hafezi Moghaddas, N., Hasanvand, M., & Karami, R. (2014). Investigation on the geochemistry of formations of Gotvand-olya dam reservoir and its influence on the quality of water in reservoir. *Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 7(1–2), 29–40 (In Persian). https://www.jiraeg.ir/article_68340.html?lang=en
- Ghomeshi, M., & Haghbin, A. (2014). Salinity analysis in Gotvand-Olya Dam and its effect on the Karun River. The 4th National Conference on Irrigation and Drainage Network Management, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran (In

- basin in Spain: Identification of natural and anthropogenic influence. *Science of The Total Environment*, 502, 330–343. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.041
- Monjezi, S., Momeni, M., Najarchi, M., Monjezi, N., & Hassuninezade, H. (2022). Simulation of salinity distribution due to the active salt karst in Gotvand Dam using system dynamics and determination of the parameters influencing salinity amount. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 38(1), 67-98 (In Persian). doi: 10.22108/jssr.2021.129789.1209
- Nazeri Tahroudi, M., & Shahidi, A. (2017). Evaluation of Gotvand Dam Construction Impacts on Time Series Variability of Water Quality Parameters. *Iran-Water Resources Research*, 13(3), 175-180 (In Persian). https://www.iwrr.ir/article_41709.html?lang=en
- Saeidi Razavi, J. (2012). Non-structural approaches in salinity management of reservoir heads (Case study: Gotvand-Olya Dam). Master's thesis. Tarbiat Moallem University of Tehran.
- Sahebari, M. J. (2023). Effect of Geological and Geomorphological Factors on Gotvand Dam Water Quality. *Water Resources*, 50(6), 939–947. doi: 10.1134/S0097807823600055
- Salehpour, G., Zayeri, M., & Zeinivand, M. (2025). Classification and modeling based on soft Computing of Karun River: Gatund and Ahvaz Hydrometric Stations. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 48(3), 125-145 (In Persian). doi: 10.22055/jise.2024.45876.2114
- Sharif, M., & Hamzeh, S. (2022). Investigating the effect of Gotvand Dam on changes in soil salinity and vegetation cover of downstream lands of the dam using satellite imagery and spectral indices. *Advanced Environmental Sciences*, 19(4), 225-248 (In Persian). doi: 10.52547/envs.2021.1014
- Tabarmayeh, M., & Vaezihir, A. (2025). Optimizing water flowing into a reservoir dam based on its impact on downstream aquifer salinity. *Hydrology Research*, 56(9), 795–816. doi: 10.2166/nh.2025.131
- Zareie, S., Mohammadi, S., & Rabiei-Dastjerdi, H. (2025). Determining the effects of large dams and urbanization on soil salinity and surface temperature using satellite images in a Middle Eastern country. *Discover Sustainability*, 6, 393. doi: 10.1007/s43621-025-01168-y
- Zhang, Y., Xia, J., Liang, T., & Shao, Q. (2010). Impact of water projects on river flow regimes and water quality in Huai River Basin. *Water Resources Management*, 24(5), 889–908. doi: 10.1007/s11269-009-9477-3