



<https://jssr.ui.ac.ir/?lang=en>

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan
E-ISSN: 2423-8007
Vol. 38, Issue 1, No. 86, Spring 2022, pp 67-98
Received: 23.08.2021 Accepted: 05.12.2021

Research Paper

Simulation of salinity distribution due to the active salt karst in Gotvand Dam using system dynamics and determination of the parameters influencing salinity amount

Sara Monjezi

Ph.D. Student of Water Engineering, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
sarah.monjezi@yahoo.com

Mansour Momeni

Professor, Department of Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran
mmomeni@ut.ac.ir

Mohsen Najarchi  *

Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
m-najarchi@iau-arak.ac.ir

Narges Monjezi

Assistant Professor, Department of Remote Sensing, Faculty of Basic Science, Dezfoul Branch, Islamic Azad University, Dezfoul, Iran
nmonjezi@iaud.ac.ir

Houshang Hassuninezade

Lecturer, Khuzestan Water and Electricity Industry Research and Educational Center, Ahvaz, Iran
mohsennajarchi@yahoo.com

Abstract

An important issue in the operation of the Gotvand reservoir is the presence of salt formation in this reservoir. The present study has sought to identify whether it is possible to modify the operation curve of the Gotvand Dam to reduce the destructive effects of the Anbal salt dome and increase the operation of this reservoir. To achieve this goal, the performance of the Gotvand Dam reservoir was modeled from the time it was used (from August 2011 to March 2017), as well as the behavior of active salt karstic activity inside the reservoir with the dynamic system tools. The results showed that during the simulation period, the average amount of corrosion of the salt dome in contact with the reservoir water was 20.1 cm per day. Besides, 43.72 million tons of salt has been accumulated in the reservoir. Analysis of the results showed that 39% of the reservoir salinity is due to the dissolution of the salt formation. The rest of the salinity enters the reservoir with the upstream runoff. Based on the results of sensitivity analysis, changes in water level in the reservoir is the most important factor determining the salinity distribution parameters in the reservoir and the best remaining solution to reduce the effects of the salt dome inside the Gotvand Reservoir is to implement the curve of the optimal use of the reservoir for water released through the Gotvand Dam and the upstream basin of this dam.

Keywords: Reservoir Operation, Quality management, Water withdrawal from different layers of the reservoir, Vensim.

Introduction

Most of the karst areas in Iran are in the Zagros Mountains, which is one of the rainy areas and due to the favorable weather conditions, large karst areas have been formed in these mountains. The Gotvand Dam is one of the embankment dams with clay core, which was built in the

Zagros zone, folded with evaporative rocks.

The outcrops of Gachsaran Formation in Gotvand dam reservoir, which is located five to nine km upstream of the dam axis and on the left bank of the river, have a large volume of thick and soluble salt strata with many cavities and caves and its surface is in direct contact with groundwater,

*Corresponding author

Monjezi S., Momeni M., Monjezi M., Monjezi N., and Hassuninezade, H. (2021). 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.

2423-8007 / © 2022

This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.129789.1209>



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1401.38.1.4.7>

surface water and dam lake water.

Assessment of environmental effects resulting from the construction of Gotvand Dam has shown that the construction and operation of the Gotvand Dam have caused salt drainage into the water, increased salinity of groundwater in the region, dissolution of soluble substances, production of toxic substances and increased pollution of organic matter. The present study sought an answer to the question of whether it is possible to optimize the operation of the Gotvand Dam by modifying the command curve to reduce the destructive effects of salt karst.

Materials & Method

In this research, simulation of water quality conditions and interaction of dynamic phenomena in the reservoir and how to dissolve the active salt karst in it was done according to the curve of the reservoir operation by the dynamic system method and using Vesim software, in the first 68 months of the reservoir operation period.

On the other hand, considering the changes in the volume of reservoir water due to different inlet flow rates upstream and also changes in water velocity in the reservoir, the behavior of the model was compared with the reality using the collected field information of the Gotvand reservoir. As the quality of reservoir water is affected by the type, location and how to operate the reservoir water, a solution to increase the optimal operation of the Gotvand Dam was presented.

Discussion of Results & Conclusions

As the results show, 43.72 million tons of salt were accumulated in the reservoir during the simulation period. The karst dissolution coefficient was also observed to change from 35.46 to 599.86 kg/s. Besides, the average rate of the salt karst corrosion in the reservoir water was 22.1 cm/day, while the mean discharge rate of the salt (Q_{salt}) flowing into the dam was calculated to be 3923.94 m³/day. In addition, the best level of water release from the lower gates of the dam to obtain quality water from the reservoir, instead of releasing water from the lower gate level, was estimated to be 147 m.

Based on our research findings, the parameters of salt dissolution coefficient and flow rate of water entering the

dam reservoir were the most important factors affecting the behavior of salinity distribution in the reservoir. Through the quality management and flexible operation of the dam reservoir and by changing the command curve of the Gotvand dam reservoir (in the form of releasing water from the different levels of the reservoir), the operation rate of the dam reservoir increase by 57% on average, compared to the typical case of releasing water from the lower gate valves level). The results showed that larger variations in the reservoir's water surface level in a short period of time further increased the salt concentration due to in the increase in the hydraulic gradient of the reservoir, water circulation in karstic pores and cavities, and hence the dissolution of the salt karst. Accordingly, a quite linear relationship exists between the water surface level in the reservoir and the hydraulic gradient.

It should be noted that in a real reservoir, in addition to surficial dissolution, other factors such as water penetration into cavities, regional fractures, and slip of salt layers into the reservoir are involved in the introduction of salt into the reservoir water, which are not considered in simulation models. Therefore, the actual value of the salt dissolution coefficient is greater than the dissolution coefficient of the simulation model. However, the main source of salt entering the reservoir is the surficial dissolution due to the contact of the salt layers with the volume of the reservoir formation, which has been observed to occur slowly, continuously and dynamically.

Finally, from the SD model results analysis of the Gotvand Dam, it can be understood that as the volume of the reservoir water increases, a greater amount of salt karst is dissolved. In brief, by controlling the amount of water flowing into the Gotvand Dam's reservoir via controlling the amount of water flowing out of the Dez Dam, which is situated on the upstream side of the Gotvand Dam, and by controlling the amount of water flowing out of the Gotvand Dam's reservoir, and to put it differently, by implementing the optimum rule curves for the Gotvand and Dez dams, the salinity of the water flowing out of the Gotvand Dam's reservoir can be considerably reduced.




مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی توزیع شوری به‌علت کارست نمکی فعال در سد گتوند با استفاده از سیستم دینامیک و تعیین پارامترهای مؤثر بر مقدار شوری

سارا منجزی، دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی و فنی، واحد اراک، دانشگاه

آزاد اسلامی، اراک، ایران
sarah.monjezi@yahoo.com

منصور مؤمنی، استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
mmomeni@ut.ac.ir

محسن نجارچی* ، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
m-najarchi@iau-arak.ac.ir

نرگس منجزی، استادیار، گروه سنجش از دور، دانشکده علوم پایه، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
nmonjezi@iaud.ac.ir

هوشنگ حسونی‌زاده، مدرس، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران
hassoni44@hotmail.com

چکیده

مسئله مهم در بهره‌برداری از مخزن گتوند، سازند نمکی موجود در آن است. هدف اصلی این پژوهش، اصلاح منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن، در جهت کاهش آثار منفی سازند نمکی است. در این پژوهش پس از گردآوری اطلاعات میدانی در محل مخزن، عملکرد آن از مردادماه ۱۳۹۰ تا پایان سال ۱۳۹۵، فرآیند انحلال سازند نمکی با روش سیستم دینامیک و با استفاده از نرم افزار ونسیم مدل شد؛ نتایج آنالیز شد؛ نتایج نشان داد، در طول دوره شبیه‌سازی، متوسط میزان انحلال کارست ۹۶/۳ کیلوگرم بر ثانیه، تغییر می‌یابد و متوسط مقدار خوردگی آن در تماس با آب مخزن به‌طور متوسط، ۲۰/۱ سانتی‌متر در روز است؛ همچنین تا پایان دوره شبیه‌سازی، ۴۳/۷۲ میلیون تن نمک در مخزن، انباشته شده است. آنالیز نتایج نشان داد، ۳۹ درصد شوری مخزن، به‌علت انحلال سازند و مابقی شوری به‌علت حجم رواناب ورودی بالادست به مخزن است؛ در ضمن، با رهاسازی آب از ترازهای بالاتر از دریچه‌های تحتانی، به جای رهاسازی آب از تراز دریچه‌های تحتانی (به‌طور متوسط تراز ۱۴۷ متر)، مقدار بهره‌برداری بهینه از مخزن، ۵۷ درصد افزایش می‌یابد. براساس نتایج آنالیز حساسیت، تغییرات تراز سطح آب در مخزن، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده پارامترهای توزیع شوری در مخزن است و با اجرای منحنی فرمان‌های بهره‌برداری انعطاف‌پذیر، درباره مقدار آب رهاشده از مخزن دز و مخزن گتوند، در جهت کنترل تراز سطح آب در مخزن گتوند، مقدار انحلال سازند نمکی را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: منحنی فرمان بهره‌برداری، مدیریت کیفی، برداشت آب از لایه‌های مختلف مخزن ونسیم.

* نویسنده مسئول

منجزی، س.؛ مؤمنی، م.؛ نجارچی، م.؛ منجزی، ن. و حسونی‌زاده، ه. (۱۴۰۱). شبیه‌سازی توزیع شوری به‌علت کارست نمکی فعال در سد گتوند با استفاده از سیستم دینامیک و تعیین پارامترهای مؤثر بر مقدار شوری. پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۸(۱)، ۶۷-۹۸.



مقدمه

حوضه کم‌عمق دریا، ته‌نشین شده و در طی دوران‌های بعدی، رسوبات بر روی آنها ته‌نشین شده و این مناطق را در اعماق مدفون کرده است؛ قرن‌های بعد، به دلیل فشار زیاد موجود در این اعماق و با توجه به دانسیته و پلاستیسیته بالا، نمک در قالب توده‌های استوانه‌ای با قطر چندین کیلومتر، شروع به بالا آمدن کرده است که به آنها، دیاپیر یا گنبدنمکی گفته می‌شود. علاوه بر کارست نمک، کارست ژیبسی در بسیاری از سازندهای تبخیری جهان، نظیر مناطق مختلف زاگرس و در سازند تبخیری گچساران، در نزدیکی شهر شوشتر، مشاهده شده است (Karimi Vardanjani 2010). در واقع، یکی از مهم‌ترین عوامل اصلی کاهش کیفیت منابع آب منطقه‌ای خوزستان، وجود سازندهای گچساران و رسوبات حاوی نمک‌های انحلال‌پذیر است (Zareei and Azhdari 2006). گنبد نمکی عنبل درون مخزن گتوند، از جمله این سازندها در بخش نمکی سازند گچساران است که در بالادست محور سد و درون مخزن قرار دارد. سد گتوند، نقش پراهمیت ذخیره‌سازی پنج میلیارد متر مکعب آب و تنظیم آن برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی جلگه خوزستان، کنترل و ذخیره سیلاب‌های فصلی کارون و نیز افزایش دو هزار مگاوات انرژی برق آبی به تولید برق کشور را دارد؛ مخزن این سد، در مردادماه سال ۱۳۹۰ بهره‌برداری شد. در حال حاضر، مسئله مهم در این سد، آثار سوء انحلال کارست نمکی عنبل است.

تاریخچه موضوع و پیشینه پژوهش

در سال‌های قبل و بعد از آبرگیری سد گتوند، مطالعاتی درباره جنبه‌های مختلف کارست نمکی موجود در مخزن صورت پذیرفته است؛ سازندهای زمین‌شناسی موجود در دشت گتوند، باعث افت کیفیت منابع آب زیرزمینی و افت کیفیت آب برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب شده است یا اینکه استفاده از این منابع را محدود کرده است (Mozaffarizadeh and Cheet sazani 2006)؛ ارزیابی آثار زیست محیطی ناشی از ساخت سد گتوند نشان داده است، احداث

جامع‌نگری و برخورد سیستمی در مدیریت کمی و کیفی منابع آب، به علت افزایش مؤلفه‌های این سیستم‌ها، پیچیدگی ارتباطات و آثار متقابل آن، اهمیت خاصی دارد؛ به همین دلیل، مدل‌سازی و مدیریت مسائل زیست محیطی، به‌ویژه پدیده آلودگی دریاچه‌ها و مخازن سدها برای بررسی کیفیت آب، بسیار مهم است.

سدها سازه‌های آبی مهمی هستند که در همه نواحی جهان، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک برای مدیریت آب‌های سطحی احداث می‌شوند و در ارتباط تنگاتنگ با شرایط زمین‌شناسی هستند که در آن ساخته شده‌اند. با توجه به گستردگی مخازن سدهای بزرگ و عدم امکان تغییر محور سدها به دلیل محدودیت‌های مختلف، امکان دارد که پس از آبرگیری سد، آب مخزن با سازندهای کارستی در تماس قرار گیرد؛ خصوصاً اگر این تشکیلات حاوی نمک باشد، مخزن مورد تهدید پدیده کارستی‌شدن، انحلال سازند کارستی و در نتیجه کاهش کیفیت آب مخزن، نشست ساختگاه و در مواقعی نیز نشست سازه سد می‌شود و تأسیسات نیروگاه، دستخوش خوردگی آب‌های عبوری قرار می‌گیرد؛ از این رو، ساخت سدها و مخازن در این سازندها با ریسک زیادی همراه می‌شود. در واقع، به دلیل انحلال‌پذیری فوق‌العاده بالای نمک، حدود ۳۶۰ گرم بر لیتر (Hashemi Heidari 2012)، به انحلال کامل رخنمون‌های این کانی در مناطق مرطوب منجر می‌شود. در ایران حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور و حدود ۹۰ درصد از ارتفاعات زاگرس، از سازندهای کارستی تشکیل شده است (Afrasiabian and Rezaei 1999)؛ کارست معمولاً در سنگ‌های آهکی و ژیبسی، گسترش می‌یابد؛ اما در سنگ‌های انحلال‌پذیر دیگر نظیر ماسه‌سنگ، سنگ نمک، کوارتزیت و ... هم مشاهده شده است. در جنوب و جنوب غرب ایران، بیش از ۱۵۰ گنبد نمکی وجود دارد که در قسمت‌های مختلف آنها، آثار کارستی‌شدن رؤیت شده است. در این مناطق، نمک حدود پانصد میلیون سال قبل (و بیشتر)، در مناطق پست یا

دامپروری و صنعت آبی‌پروری پایین‌دست سد گتوند را به دنبال داشته است (Rostami Paidar et al. 2013; Hadad et al. 2014, Rasoulimanesh 2017)؛ بنابراین نیاز به شناخت فرآیند انحلال و توزیع شوری در مخزن و شناخت عوامل مؤثر بر آن، بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد.

پدیده انحلال، به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های حلال و ماده حل‌شونده، حجم و سرعت جریان حلال درگیر، سطح در معرض تماس، غلظت اشباع، دما، فشار، اسیدیته محیط و اثر مواد محلول بستگی دارد (Baghadashtaki 2010). نرخ انحلال به‌صورت عددی و در محیط آزمایشگاه، توسط Plumer et al. 1978, Sensson and Dreybrodt 1992 و Kaufman and Dreybrodt 2007 اندازه‌گیری و برای این پارامتر، رابطه زیر پیشنهاد شد (Hashemi Heidari 2012):

سد گتوند، باعث زهکشی نمک به درون آب، افزایش شوری آب‌های زیرزمینی محدوده منطقه، انتشار مواد محلول، تولید مواد سمی و افزایش آلودگی مواد آلی شده است (Sayadi et al. 2009). بازدیدهای میدانی هم‌زمان با مراحل پایانی ساخت سد گتوند، وجود فروچاله‌های متعدد و نیز وقوع زمین‌لغزش‌ها با ابعاد متفاوت، در محدوده ۵ تا ۹ کیلومتری بالادست محل سد را نشان داد. با توجه به شواهد ژئومورفیک، مانند انحراف شدید رودخانه کارون، نتیجه این شد که سازند نمکی عنبل، یک ساختار هالکیتیک فعال است و ۳۰ درصد از گنبد نمکی عنبل در اثر رانش بزرگ زمین، تحت تأثیر تخلیه فرسایشی قرار می‌گیرد و شیب دامنه توسط فرسایش رودخانه‌ای کنترل می‌شود (Gutiérrez and Lizaga 2016). در بررسی گمانه‌های اکتشافی حفاری‌شده در این محدوده نیز، مشاهده شد که لایه‌های نمکی از ترازهای بالاتر از تراز نرمال مخزن، تا اعماق زیر بستر رودخانه کارون گسترش یافته است؛ با ادغام شواهد زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی مخزن گتوند، اندازه‌گیری مقادیر هدایت الکتریکی (EC¹) و کل مواد جامد محلول در آب (TDS²)، برای ۱۰۸ نمونه آب اخذشده از ۱۱ ایستگاه نمونه‌برداری در امتداد مخزن و ۵۸ ایستگاه نمونه‌برداری از مخزن، رودخانه‌ها و چشمه‌های اطراف آن، منابع شوری آب مخزن گتوند، شناسایی و ارزیابی شد (Jalali et al. 2019)؛ به‌طوری که در فاصله زمانی اسفندماه ۱۳۹۰ تا بهمن‌ماه ۱۳۹۱، متوسط EC آب کارون در مقایسه با ۵ سال قبل از آبیگری سد گتوند، از ۲۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر به ۲۴۹۶ میکروموس بر سانتی‌متر، افزایش یافته است (Ghomeshi and Haghbin 2013).

مسلم است، به‌دلیل تماس مستقیم آب مخزن با این لایه‌های نمکی، احتمال وقوع زمین‌لغزش و سقوط احجام بیشتر نمک همراه با توده‌های لغزشی به درون مخزن، شوری آب مخزن افزایش یافته و در نتیجه آثار منفی بر نحوه بهره‌برداری از سد و در نهایت تأمین نیازهای کشاورزی،

¹ Electrical Conductivity

² Total dissolved solids

$$F_i = K_i \left(m_i - \frac{C}{C_{eq}} \right), i = 1, n$$

$$\begin{array}{ll} I=1 & C < 0.3 C_{eq} \\ I=2 & 0.3 C_{eq} < C < 0.9 C_{eq} \\ I=3 & C > 0.9 C_{eq} \end{array} \quad (1)$$

مقدار ضریب انحلال کارست را در شرایط جریان مخزن در سال اول آبیگری سد گتوند، ۱۷۰ کیلوگرم بر ثانیه (Hashemi Heidari et al. 2012) و در سال دوم آبیگری مخزن، ۲۰۰ کیلوگرم بر ثانیه (Mohammad Taheri 2014)، پیشنهاد کرد. با توجه به تغییرات مقدار حجم آب مخزن، به‌علت مقادیر دبی ورودی متفاوت از طریق رودخانه بالادست و تغییرات سرعت آب درون مخزن در طول عمر بهره‌برداری از مخزن گتوند و همچنین با توجه به حجم عظیم کارست نمکی عنبل که به صورت یک منبع آلودگی فعال، کیفیت آب مخزن را برای تأمین اهداف مدنظر تحت تأثیر قرار داده است، مسلم است که فرآیند انحلال کارست، در طول بهره‌برداری از مخزن گتوند، یکسان نیست؛ به طوری که در گذشته، نرخ انحلال توده نمکی در ۲۲ ماه اول بهره‌برداری مخزن و در طول دوره آبیگری مخزن، ۰/۵ تا ۷ سانتی‌متر بر ساعت، واسنجی و صحت‌سنجی شد (Naderkhanloo et al. 2017).

از جمله تدابیری که در جهت کاهش انحلال کارست نمکی در مخزن گتوند، قبل از آبیگری مخزن انجام شد، احداث پتو رسی بر کارست نمکی عنبل بود که این پتو، سه روز پس از آبیگری مخزن گتوند فروریخت (Asakere and Mansour Neghad 2013). در حال حاضر مقداری از نمک انباشته‌شده در کف مخزن گتوند، با استفاده از لوله کامپوزیتی تعبیه‌شده در پی سد (با دبی ۰/۳ متر مکعب بر ثانیه) تخلیه و به حوضچه‌های تبخیری انتقال داده می‌شود که به‌علت حجم زیاد نمک، اثر بسیار ناچیزی در کاهش شوری آب مخزن دارد. راه‌حل‌هایی نظیر استخراج نمک با کمک باردار کردن آب مخزن توسط نمک (پس از چندین بار گردش آب در مخزن)، انتقال به حوضچه تبخیر (Hosseini Balaei and Rahimi Dizaji 2011) و شیرین‌سازی آب شور، پیشنهاد شد که به دلیل حجم زیاد آب شور، امکان استفاده مداوم از این تدابیر، مستلزم زمان

که در آن، F_i بیانگر نرخ انحلال، K_i ضریب انحلال، m_i ضریب ثابت بدون بعد، C غلظت واقعی ماده حل‌شونده، C_{eq} غلظت ماده حل‌شونده در مراحل مختلف انحلال و n_i توان که بستگی به نسبت غلظت ماده حل‌شونده به غلظت اشباع دارد. n_i نشان‌دهنده مراحل مختلف فرآیند انحلال است؛ در مرحله اول انحلال، انحلال با سرعت بسیار زیاد و با نرخ خطی، با قابلیت انتقال جرم زیاد صورت می‌پذیرد. در مرحله دوم، انحلال با سرعت نسبتاً پایین و با نرخ خطی رخ می‌دهد و در مرحله سوم انحلال، انحلال با نرخ غیرخطی و با مرتبه بالاتر انجام می‌شود. در گذشته، تحقیقات وسیعی در زمینه ضریب انحلال نمک انجام شده است؛ Alkattan et al. 1997، انحلال سنگ نمک را با استفاده از دیسک چرخان، بررسی کردند؛ در این آزمایش، سنگ نمک را درون محیط آزمایشگاه، مابین دیسک و دیواره فلزی مدل قرار دادند و مابقی فضا را با آب پر کردند؛ با چرخش دیسک در سرعت‌های مختلف و جریان‌یافتن آب مابین دیسک و دیواره مدل، سنگ نمک دچار انحلال شد و به این ترتیب، نرخ انحلال را تخمین زدند.

به منظور بررسی ویژگی‌های انحلال‌پذیری سازند نمکی عنبل، در سال قبل از آبیگری مخزن گتوند، Baghadashaki et al. 2010، از روش سیرکولاسیون، برای اندازه‌گیری ضریب انحلال نمونه‌های سنگ نمک موجود در مخزن گتوند، در محیط آزمایشگاه استفاده و مقدار خوردگی این نمونه‌ها را ۲/۶۷ سانتی‌متر در روز اندازه‌گیری کردند.

همچنین، حساسیت پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری، مانند ضرایب انحلال، پخش افقی و پخش قائم، دبی، میزان دما و رطوبت نسبی و رفتار کارست نمکی موجود در سد گتوند، با جمع‌آوری داده‌های میدانی سازند نمکی عنبل و مدل‌سازی با سری مختلف نرم‌افزارهای MIKE، بررسی و تحلیل شد و

شرایط ارائه نشده است؛ همچنین، محققان مربوط، تمام روابط موجود و پارامترهای درگیر در فرایند انحلال، از جمله دبی نمک ورودی به مخزن را به‌صورت ثابت و معین، محاسبه و پیشنهاد کرده‌اند؛ همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، با توجه به پیچیدگی فرایند انحلال و دخیل‌بودن عوامل گوناگون در رابطه با این فرایند، از جمله خلل و فرج فراوان در کارست، شرایط متفاوت آبدگی، تخلیه مخزن در طول دوره بهره‌برداری، تغییرات سرعت آب درون مخزن به‌علت بارندگی، سیلاب ورودی به مخزن و حجم عظیم کارست نمکی عنبل که به‌صورت یک منبع آلودگی فعال عمل می‌کند؛ واضح است که در طول فرایند انحلال، پارامترهای مربوط به آن، به هیچ عنوان ثابت نیست و به رویکردی کارآمد نیاز است که در گذر زمان، رفتار سازند نمکی را در تعامل با آب مخزن، با تحلیل کمی و کیفی بررسی کند. سرعت زیاد در مدل‌سازی، به روش سیستم داینامیک و آنالیز این نوع مدل‌سازی در مدت زمان کم، نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی، نظیر سری MIKE، آسانی ساختار، اصلاح مدل، توانایی انجام تحلیل، ارتباط مؤثر با مدل و افزایش اطمینان در روند مدل‌سازی، مدل‌سازی را از بقیه روش‌های رایج مدل‌سازی منابع آب جذاب‌تر می‌کند که این امر، به دلیل مشارکت کاربر در آن، ارتباط مؤثر با نتایج مدل، سهولت ایجاد تغییرات در مدل و قابلیت حساسیت این روش است. در فرآیند مدل‌سازی با سیستم داینامیک، ضمن امکان واردکردن متغیرهای کیفی و کمی به‌طور هم‌زمان در سیستم توسط کاربر، با نوشتن معادلات غیردقیق برای متغیرهای کیفی و شبیه‌سازی عددی آن، اثر آنها را بر کل سیستم در نظر می‌گیرد و بهترین دقت قابل دستیابی، همراه با پاسخ‌های کمی و تخمین‌های بهتر، نتیجه تصمیم‌ها و سیاست‌های کاربر را برآورده می‌کند.

با توجه به توضیحات اخیر، خصوصاً ساختار هالکیتیک فعال گنبد نمکی، نتیجه می‌شود، برای شبیه‌سازی وضعیت مخزن گتوند، شناخت فرآیندهای مؤثر در انحلال نمک و

و هزینه زیاد است و مقرون به‌صرفه نیست؛ همچنین گزینه استفاده از لوله در کف مخزن، برای انتقال آب بسیار شور، نزدیک کف، به خلیج فارس پیشنهاد شد که مسلماً در صورت اجرا، تبعات ناخوشایند برهم‌زدن شرایط اکولوژیکی و زیست‌محیطی پایین‌دست سد را، به‌علت شوری زیاد آب، به همراه دارد؛ راهکارهای دیگری نظیر تخریب سد، پیشنهاد شد؛ علاوه بر اینکه تخریب سد، تبعات زیست‌محیطی فراوان دارد و مستلزم مطالعات و تمهیدات بسیار زیاد است، نمی‌توان از تأمین بقیه اهداف طراحی سد که در حال حاضر، به‌خوبی توسط سد صورت می‌گیرد (نظیر سیلاب و تولید برق و ...)، چشم‌پوشی کرد. از دیگر راهکارهای پیشنهادشده، تقلیل ارتفاع سد، جابجایی یا مهار و عایق‌کردن کوه نمکی، به‌وسیله پوشش‌هایی نظیر لاشه‌های سنگ (عدم تضمین انحلال توده‌های نمکی در آب مخزن)، اجرای پوشش ژئوممبرن (مقرون به‌صرفه نبودن، به‌علت گران‌بودن و امکان پارگی آسان این پوشش)، انحراف آب رودخانه بالادست و تخلیه کارست نمکی از مخزن و انتقال به مکان دیگر (مستلزم استفاده از ماشین‌آلات و نیروی انسانی با تعداد و ساعت‌کاری بسیار زیاد و عدم صرفه اقتصادی و اجرای عملی) است که انجام همه این راهکارها، نامناسب تلقی شد.

در مقایسه و جمع‌بندی نظرات سایر محققان، درباره موضوع پژوهش و همچنین اقداماتی که برای رفع این مشکل صورت پذیرفته است، می‌توان نتیجه گرفت که اولاً، به بررسی راهکاری نیاز است که علاوه بر صرف کمترین هزینه برای اجرای آن، کمترین دخالت را هم در محیط زیست و اکوسیستم داشته باشد و بتواند شوری مخزن گتوند را کاهش دهد؛ مدیریت صحیح بهره‌برداری از مخزن و همچنین بررسی منحنی فرمان مخزن و اثر آن بر مقدار شوری آب مخزن، از جمله این راهکارها است؛ دوم اینکه، اکثر پژوهش‌های گذشته درباره سد گتوند، به بازه زمانی قبل و یا سال‌های اولیه آبدگی مخزن مربوط بوده و بیشتر وضعیت موجود مخزن را تشریح کرده و راه‌حلی عملی و بهینه، برای برون‌رفت از این

چگونگی بهره‌برداری از آب مخزن است، راهکاری برای افزایش بهره‌برداری بهینه از سد گتوند ارائه شد. شایان ذکر است در سال ۲۰۰۰، با استفاده از مدل‌سازی با SD، بهره‌برداری از سد شلماس در رودخانه آسینیبوین، برای سال پربابی بررسی شد که در آن چندین سیلاب رخ داده است و اثرات مدیریت سیلاب در مخازن با سرریز دریچه‌دار و بدون دریچه با یکدیگر مقایسه شد و تحلیل حساسیت رفتار مدل برای شرط اولیه تراز مخزن، صورت گرفت (Ahmad and Simonovic 2000)؛ همچنین پژوهشگرانی در ایران، با شبیه‌سازی مخزن تنگ سرخ در شیراز، سناریوهای مختلف عرضه آب را طراحی و آن را در فوریه ۲۰۲۵، ارزیابی کردند (Ahmadi and zarghami 2019).

معرفی منطقه مورد مطالعه (ساختمان سد)

همان‌طور که قبلاً بیان شد، بیشتر گسترش نواحی کارستی در ایران، در رشته‌کوه زاگرس است که پرباران بوده و با توجه به مساعد بودن وضعیت آب‌وهوایی، نواحی کارستی پهناوری در آن تشکیل شده است؛ سد گتوند، از جمله سدهای خاکی با هسته رسی است که در منطقه ساختمانی زاگرس، چین‌خورده با سنگ‌های تبخیری بنا شده و خصوصاً کارست نمکی موجود در مخزن باعث شوری آب مخزن شده است. این سد جزء عظیم‌ترین سدهای برق‌آبی جهان و از نوع خاکی با هسته رسی، با حجم کل مخزن، ۴/۵ میلیارد متر مکعب و آخرین سد احداث‌شده بر رودخانه کارون در جنوب غربی ایران است که مخزن آن در مردادماه ۱۳۹۰، آبیگری شد؛ رخنمون‌های سازند گچساران در مخزن که در فاصله ۵ تا ۹ کیلومتری بالادست محور سد و در جناح چپ رودخانه قرار دارد، دارای حجم بزرگی از چینه‌های ضخیم و انحلال‌پذیر نمک است، حفره و غار زیادی دارد و سطح آن در تماس مستقیم با آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و آب دریاچه سد است (شکل ۱).

توزیع شوری و همچنین پیشنهاد راه علاج برای کاهش شوری، نیازمند ابزاری هستیم که بتواند به صورت دینامیک و در هرگام زمانی در طول دوره شبیه‌سازی، پارامترهای مؤثر بر میزان شوری آب مخزن را محاسبه کند. بر این اساس پژوهش حاضر، برای پاسخ به این سؤال انجام شد که آیا می‌توان با صرف هزینه کمتر، با مدیریت کیفی، با منحنی فرمان انعطاف‌پذیر بهره‌برداری از مخزن و پیشنهاد چگونگی رهاسازی آب از مخزن، با در نظر گرفتن کیفیت مناسب آب مورد نیاز پایین دست، پیامدهای منفی انحلال کارست نمکی را بر کیفیت آب دریاچه سد، کاهش و بهره‌برداری بهینه از سد را افزایش داد؟

در این پژوهش، شبیه‌سازی شرایط کیفی آب، اندرکنش پدیده‌های دینامیکی در مخزن و نحوه انحلال کارست نمکی فعال در آن، با توجه به منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن، با روش سیستم دینامیک^۱ و با استفاده از نرم‌افزار ونسیم، در ۶۸ ماه اول دوره بهره‌برداری مخزن انجام شد؛ از جهتی دیگر، با در نظر گرفتن تغییرات مقدار حجم آب مخزن، به علت مقادیر دبی ورودی متفاوت رودخانه بالادست و همچنین تغییرات سرعت آب درون مخزن، رفتار مدل با واقعیت، به کمک اطلاعات میدانی جمع‌آوری شده مخزن گتوند، مقایسه شد؛ سپس به دلیل تغییرات هیدرودینامیکی جریان در مخزن و در نتیجه تغییر نحوه و مقدار نمک ورودی به مخزن (نمک ناشی از انحلال سطحی گنبد نمکی در تعامل با آب مخزن و یا ریزش دیواره‌های سازند نمکی به درون مخزن)، از مقادیر خوردگی گنبد نمکی استفاده شد که به کمک مقایسه مقادیر واقعی وزن نمک انباشته‌شده در مخزن و مقادیر EC آب خروجی از مخزن سد، تعیین و واسنجی شده است و سایر پارامترهای بیان‌کننده توزیع شوری آب در مخزن، محاسبه شد. به این ترتیب، وضعیت مخزن گتوند بعد از بهره‌برداری، شبیه‌سازی، بررسی و تحلیل شد؛ در پایان، براساس این استراتژی که کیفیت آب مخزن متأثر از نوع، موقعیت و

¹ System Dynamics

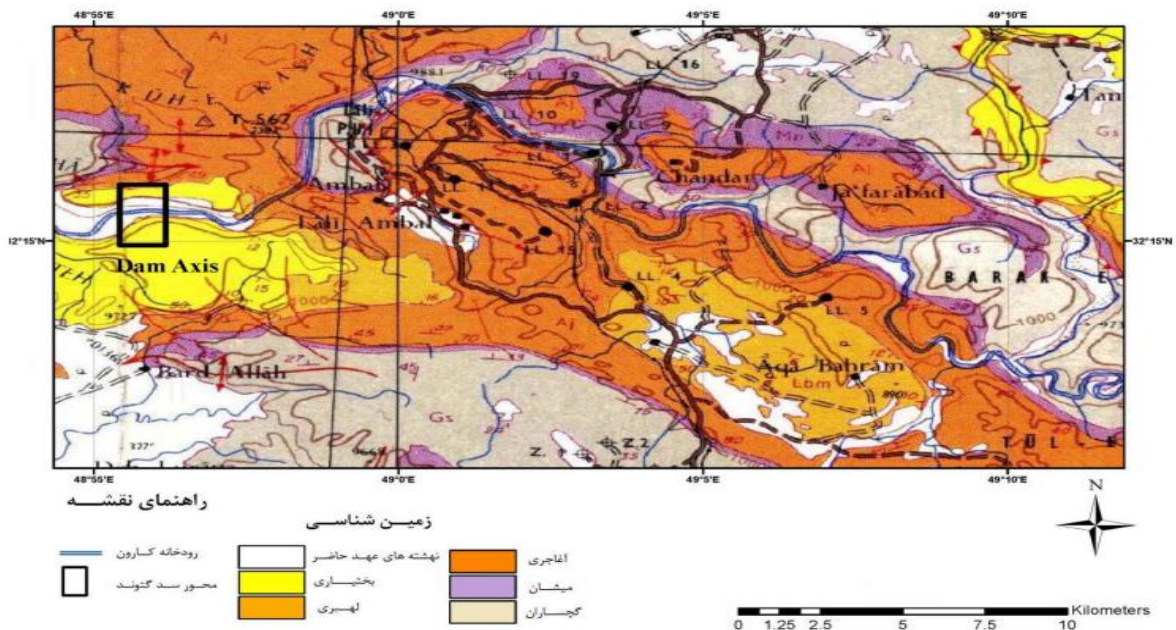


شکل ۱- عکس ماهواره‌ای محل احداث سد، موقعیت گنبد نمکی و معدن نمک

Fig 1- Satellite image of the dam construction site and salt karst (Available from <https://goo.gl/maps/jCXZw9BZYHpkoa627> [Accessed 17 August 2019])

پژوهش) در نزدیکی معدن نمک، با طولی بیش از ۹۰ کیلومتر، با سازندهای آغاچاری، میشان، لهبری، کنگلومرای بختیاری احاطه شده است (شکل ۲).

از نظر تقسیمات زمین‌شناسی، تکیه‌گاه راست و چپ سد گتوند، بر کنگلومرای بختیاری و پی مرکزی سد، بر سازند آغاچاری قرار گرفته و محدوده مخزن (محدوده مطالعه این



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی مخزن و سد گتوند (National Iranian South Oil Company, 2009)

Fig 2- Location of Gotvand dam reservoir formations (National Iranian South Oil Company)

فصول تر، بیان‌کننده پتانسیل زیاد وقوع لغزش در سازند گچساران و ناپایداری دامنه‌های کارست نمکی و ورود نمک به مخزن است (Asakere and Mansourneghad 2013).

به هم‌ریختگی ساختاری و نیز مشاهده باقیمانده توده‌های نابرجا در حاشیه چپ رودخانه، نشانگر وقوع زمین‌لغزش‌هایی با ابعاد بزرگ در زمان‌های گذشته است و وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد با ابعاد کوچک‌تر به‌طور سالانه در

روش پژوهش و شیوه انجام مطالعه

در این پژوهش، شبیه‌سازی چگونگی عملکرد عوامل مؤثر بر هیدرودینامیک مخزن، نحوه انحلال کارست نمکی موجود در مخزن، فرایند توزیع شوری در دریاچه سد، اثر آن بر کیفیت آب درون مخزن و کیفیت دبی خروجی از آن با روش SD، براساس روابط علی و معلولی بین این پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری و پارامترهای بیان‌کننده میزان شوری انجام شد. برای مدل‌سازی سد گتوند، رفتار کارست نمکی و تحلیل داده‌های میدانی محدوده مورد مطالعه، به منظور کمک به شناسایی بهتر وضعیت کیفی مخزن و کالیبراسیون مدل SD، از نرم‌افزار ونسیم استفاده شد؛ این نرم‌افزار شبیه‌سازی، در محیط مدل‌سازی گرافیکی، شیء گراست؛ در آن، شکل‌ها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول (اغلب غیرخطی) ساخته می‌شود که با روش اولر یا رانگ کوتاه حل می‌شود و پیشرفت از کلیات به جزئیات صورت می‌گیرد؛ به طوری که تدریجاً، توابع و اجزای متصل شده بیشتر می‌شود تا یک مدل کامل و برای اجرا آماده شود.

در این مطالعه، ابتدا یک مدل ریاضی شبیه‌سازی-بهنیه سازی طراحی و پس از آنکه مقادیر اولیه ترازهای هدف به مدل شبیه‌سازی وارد شد، این مدل اجرا شد. در ابتدای مدل‌سازی هیدرودینامیکی مخزن گتوند با SD، پارامترهای هیدرولوژیک مانند مقدار دبی ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست، رواناب، مقدار نیاز پایین‌دست، دمای هوا، مقدار تبخیر، بارندگی و نشت استفاده شد و با کمک داده‌های میدانی، نظیر اطلاعات حوضه آبریز سد و داده‌های مرتبط با شوری آب مخزن، مدل شبیه‌سازی و طراحی و بعد از آن،

صحت‌سنجی و اجرا شد. در ادامه مدل‌سازی، برای بررسی چگونگی اثر کارست نمکی بر وضعیت کیفی مخزن، تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری و نحوه انحلال کارست نمکی انجام شد و نتایج، تجزیه و تحلیل شد؛ در نهایت، برای کاهش مقدار شوری آب خروجی از مخزن، مدل SD سد گتوند، تراز بالاتر از تراز دریاچه‌های تحتانی برای آبیگری از مخزن، به جای آبیگری از تراز دریاچه‌های تحتانی سد پیشنهاد می‌شود؛ به شرطی که با آبیگری از این تراز، به جای آبیگری از تراز دریاچه‌های تحتانی، شوری نهایی آب خروجی از مخزن، کمتر از مقدار مجاز غلظت نمک در آب شرب و آب کشاورزی باشد؛ البته میزان EC آب ره‌اشده از مخزن، نباید از مقدار ۱۷۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر تجاوز کند؛ زیرا پس از ره‌اسازی آب از مخزن و قبل از رسیدن آب به دست مصرف‌کننده، علاوه بر برداشت آب در طی مسیر، پساب‌های کشاورزی یا پساب‌های کارخانجات و سایر آلودگی‌ها که به آب افزوده می‌شود، به افزایش EC آن منجر می‌شود و آب با EC، بالای ۱۷۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر، قابل شرب نخواهد بود. بر این اساس، مقدار مجاز EC آب خروجی از مخزن سد گتوند، توسط مقامات ذی‌صلاح، حدود ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر تعیین شده است (Mahab Ghods Consulting Engineering Company 2012).

مفاهیم طراحی مدل SD

در طراحی این مدل، اهداف به شرح جدول ۱ و محدودیت‌ها در جدول ۲ تعریف شد.

جدول ۱- اهداف تعریف‌شده در مدل SD سد گتوند

Table 1- Objectives defined in the SD model of Gotvand Dam

Row	Objectives (Determination)
1	the dissolution rate of salt karst
2	the amount of salt in the reservoir
3	salinity of water outputting from the reservoir
4	the contact surface of salt karst with reservoir water
5	the most important factors affecting salinity distribution
6	the replacement level of dewatering from the lower gates provided that the EC of the total outputting water from the reservoir is less than 3000 $\mu\text{mhos} / \text{cm}$
7	the amount of salt entering the reservoir due to the dissolution of the karst

جدول ۲- محدودیت‌های تعریف‌شده در مدل SD سد گتوند

Table 2- Constraints defined in the SD model of Gotvand Dam

Row	Constraints	Row	Constraints
1	Continuity relationships (Equations) between input, output and storage of the reservoir	7	Maximum allowable discharge output from the lower gates and inlet gates to the power plant
2	Maximum allowable flow of water entering the power plant	8	Maximum and minimum operation elevation of the dam reservoir
3	Providing the total demand by the power plant	9	normal operation elevation
4	Minimum elevation of reservoir water surface for operation of the power plant	10	Minimum required water surface elevation for overflow
5	Maximum elevation of reservoir water surface	11	Dead reservoir volume (Unusable volume of dam reservoir)
6	minimum elevation of reservoir water surface to dam stability	12	Relationships to determine the empty volume of the dam reservoir per month

مدل SD سد گتوند، طبق جدول ۳ مشخص شد.

با در نظر گرفتن محدودیت‌های مندرج در جدول ۲، برای دستیابی به کلیه اهداف مطابق جدول ۱، متغیرهای ورودی به

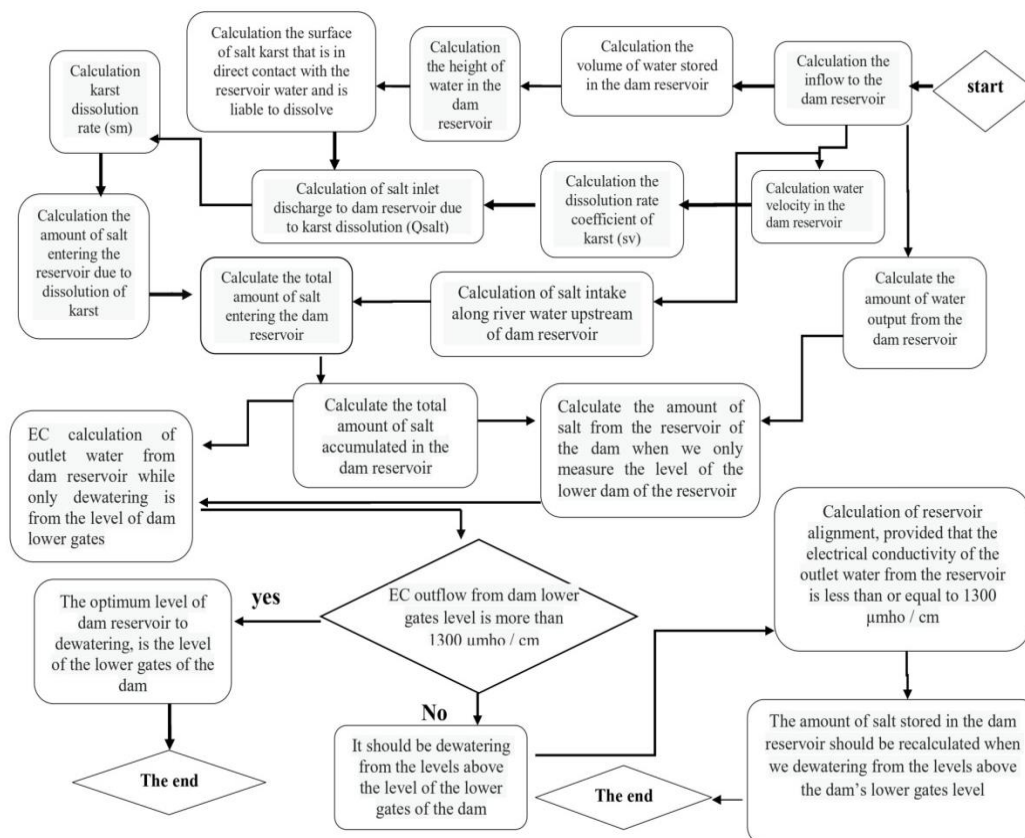
جدول ۳- متغیرهای ورودی به مدل SD سد گتوند

Table 3 -Input variables to the SD model of Gotvand Dam

Row	Input variables	Type of input variables
1	Input from upstream river, Run off, rainfall	Time series measured on dam site
2	Evaporation, temperature	Time series measured on dam site
3	total demand	Time series measured on dam site
4	Upstream river salinity	725 mg/l
5	density of salt karst(ρ_{salt})	2120 kg/m ³
6	Total dissolved solids	Linear regression relationship between dissolution coefficient and TDS
7	Electrical Conductivity	Linear regression relationship between EC and TDS at reservoir floor level, lower dam gates, power plant inlet and reservoir water surface level
8	The velocity of water in the reservoir	Runoff velocity entering the reservoir + water velocity in the reservoir in normal mode (1 cm/s)

مدل SD سد گتوند، براساس مدل مفهومی شکل ۳ طراحی شد.

با توجه به اینکه اکثر مدل‌های هیدرولوژی، به تطبیق و تعدیل پارامترهای کنترل‌کننده فرایندها نیاز دارند؛ بنابراین

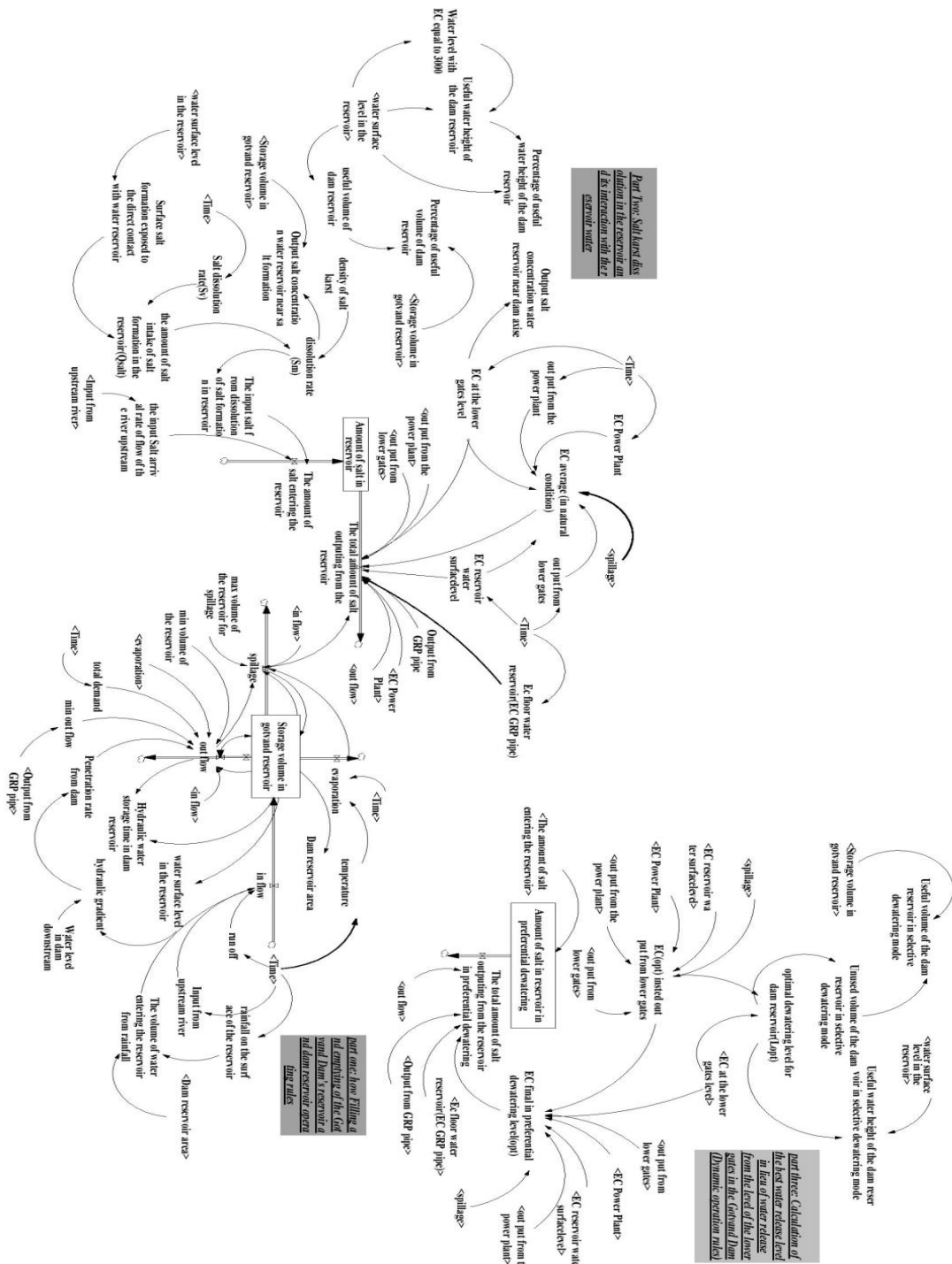


شکل ۳- مدل مفهومی تحقیق

Fig3- Conceptual model of researc

محدودیت‌ها در سدهای برقابی (با هدف اولیه تولید انرژی، تأمین آب موردنیاز پایین‌دست سد و کنترل سیلاب‌های فصلی)، در سه قسمت، مطابق شکل ۴ در نرم‌افزار ونسیم طراحی شد.

با درنظر گرفتن چگونگی انحلال کارست نمک و با توجه به فرایندها، معادلات ریاضی و الگوریتم‌های توصیف‌کننده فرایندها (شکل ۳) و درنهایت به کمک روابط علی و معلولی بین آیت‌های مؤثر بر کیفیت آب مخزن و



شکل ۴- مدل کلی شبیه سازی SD مخزن گتوند

Fig 4 - Model of Gotvand Dam System Dynamics simulation

کیفیت آب و پارامترهای مبین شوری در مخزن، در صفحه اصلی ونسیم، نوبت تعیین اتصالات و ارتباطات بین این

ساخت مدل SD سد گتوند در نرم افزار ونسیم پس از فهرست کردن تمامی متغیرها، پارامترهای مؤثر بر

قسمت اول مدل SD (نمایش نحوه پر و خالی شدن مخزن و

منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن)

در قسمت اول مدل SD مخزن گتوند (شکل ۵)، نحوه آبیگری مخزن و نحوه رهاسازی آب از مخزن، با استفاده از مبانی منحنی فرمان و دستورالعمل بهره‌برداری از سد، شبیه‌سازی شده است. اطلاعات کلیدی استفاده‌شده در قسمت اول مدل SD، شامل:

- مشخصات مربوط به ارتفاع- سطح- حجم سد گتوند (Ghomeshi and Haghbin 2013)؛

- سری‌های زمانی مربوط به دبی ورودی به مخزن، از طریق رودخانه بالادست و رواناب سطحی، بارندگی بر سطح مخزن، دما و تبخیر ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی گتوند؛

- تعیین مقدار جریان خروجی از مخزن: در هر دوره زمانی، مقادیر رهاسازی آب از مخزن، در صورت امکان با توجه به نیاز تعریف‌شده، براساس قوانین تصمیم‌گیری، نحوه آبیگری و تخلیه آب مخزن، مطابق نیازهای ماهانه پایین‌دست و سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. این مقدار همراه با تلفات مخزن و مقادیر نشت، از مجموع جریان ورودی و حجم ذخیره مخزن کسر می‌شود؛ حجم باقی‌مانده با حجم معادل حداکثر ارتفاع آب در مخزن مقایسه و مازاد آن به‌عنوان سرریز از مخزن خارج می‌شود (Sharifi and Tajrishi 2008 ; Jalali and afshar 2004)؛

- از دیگر پارامترهای مهم در قسمت اول مدل SD سد گتوند، محاسبه مقدار سرریز از مخزن است که این مقدار با رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Sheikh Khouzani and Hosseini 2012)؛

متغیرها، براساس روابط علی و معلولی است؛ در این روش، پیکان‌ها، نشان‌دهنده ارتباط بین متغیرها و جهت این پیکان‌ها، مشخص‌کننده جهت وابستگی بین آنهاست؛ در زمان انجام ارتباطات بین متغیرهای اصلی، به یکسری متغیرهای کمکی نیاز است که نقش انتقالی دارد (Jalali and Afshar 2004). پس از تعیین محل متغیرها و ارتباطات مابین آنها، باید روابط ریاضی و منطقی بین آنها وارد شود.

این روابط عموماً از فیزیک مسئله نشأت می‌گیرد و می‌تواند به‌عنوان محدودیت‌های موجود در مدل شبیه‌سازی سد گتوند، با روش سیستم دینامیک (شکل ۴)، مطرح شود.

در نرم‌افزارهای گوناگون موجود برای مدل‌سازی SD، ورود اطلاعات و روابط موجود به‌صورت سری‌های زمانی، جدول، نمودار انجام شود؛ در پایان با تغذیه روابط بین متغیرها، مقادیر اولیه به متغیرهای حالت و نیز تعیین محدوده و گام زمانی آنها، مدل، آماده شبیه‌سازی است.

طول دوره شبیه‌سازی مدل SD سد گتوند، ۶۸ ماه و با گام زمانی یک ماه، از مردادماه ۱۳۹۰ (ابتدای آبیگری مخزن گتوند) تا اسفندماه ۱۳۹۵، در نظر گرفته شد. سه قسمت مشخص‌شده در شکل ۴ به شرح زیر، عملکرد مدل سیستم دینامیک سد گتوند را شبیه‌سازی می‌کند:

- قسمت اول (Part1): نحوه پر و خالی شدن مخزن (منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن)؛

- قسمت دوم (Part2) : فرآیند انحلال کارست نمکی موجود در مخزن و تعامل آن با آب مخزن؛

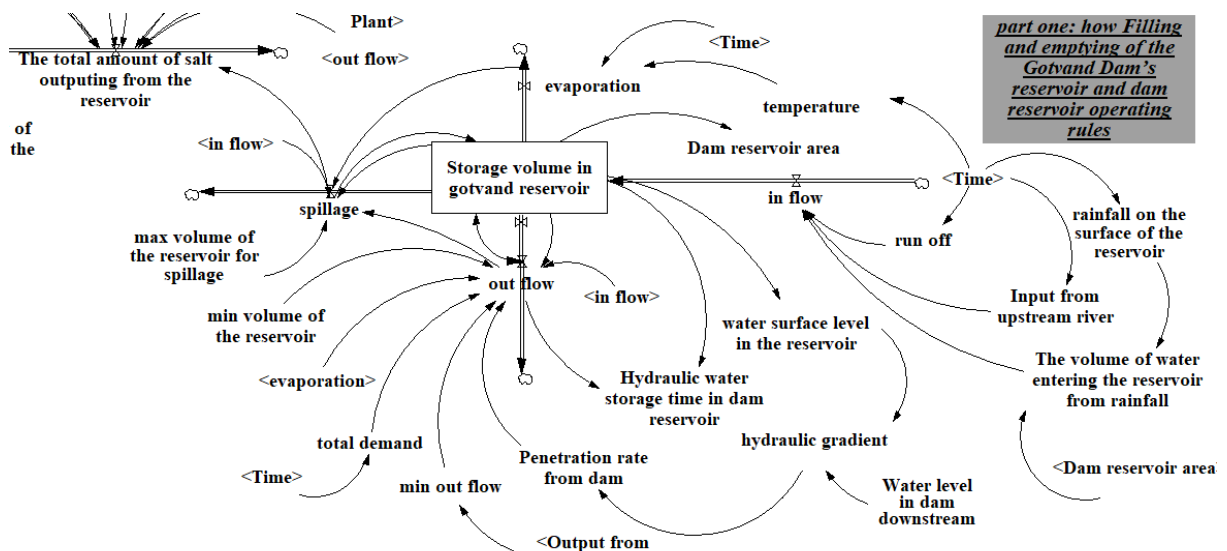
- قسمت سوم (Part3): چگونگی محاسبه بهترین تراز آبیگری از مخزن، در مقایسه با آبیگری از تراز دریچه‌های تحتانی سد.

$A = \text{storage volume in Gotvand Reservoir} - \text{min volume of the reservoir} + \text{inflow} - \text{evaporation} - \text{Penetration}$

$$\text{Out flow (mcm)} = \begin{cases} \text{total demand,} & A \geq \text{total demand} \\ \max(\text{min out flow}, A), & A < \text{total demand} \end{cases} \quad (1)$$

$$B = \text{storage volume in Gotvand Reservoir} + \text{inflow} - \text{out flow} - \text{evaporation}$$

$$\text{Spillage(mcm)} = \begin{cases} B - \text{max volume of reservoir for spillage} & , B > \text{max volume of reservoir} \\ 0 & , B \leq \text{max volume of reservoir} \end{cases} \quad (2)$$



شکل ۵- قسمت اول مدل شبیه‌سازی SD مخزن گتوند (منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن گتوند)

Fig 5 - Part 1 SD Simulation Model of Gotvand Reservoir (Gotvand Reservoir Operation Curve)

قابل استفاده است، ارتفاع آب شور و ...، EC در هر تراز مخزن مشخص می‌شود. اطلاعات مهم دیگری که در قسمت دوم مدل SD سد استفاده می‌شود، عبارتند از:

- مقدار نمک ورودی به مخزن همراه با آب رودخانه بالادست: ۷۲۵ میلی‌گرم برای هر لیتر است (Office of Basic Studies of Khuzestan Water and Electricity Organization);

- دانسیته کارست نمکی: ۲۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است (Mahab Ghods Consulting Engineering Company 2012);

- سرعت آب در مخزن: اسانتی‌متر بر ثانیه فرض و در هر گام زمانی سرعت ایجادشده توسط رواناب ورودی به مخزن، به آن اضافه می‌شود (Eftekhari 2008, Baghadashtaki 2010, Zahiri et al. 2011, Rasoulimanesh 2014);

- سطح نمک در معرض انحلال در ترازهای مختلف است (Mahab Ghods Consulting Engineering Company 2012).

در قسمت دوم مدل SD (شکل ۶)، دبی نمک ورودی ناشی از انحلال کارست نمکی موجود در مخزن (Q_{salt}) از

قسمت دوم مدل SD مخزن گتوند (فرآیند انحلال کارست

نمکی و تعامل آن با آب مخزن)

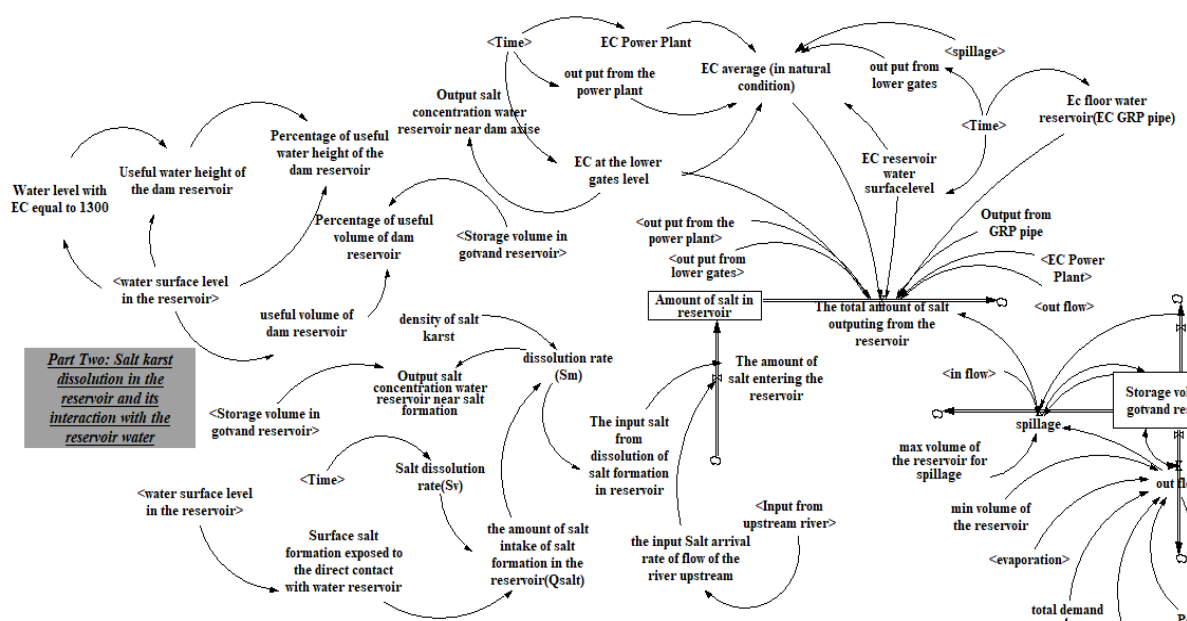
در قسمت دوم مدل SD (شکل ۶)، براساس تراز سطح آب مخزن و هندسه کارست نمک، مقدار سطحی از کارست محاسبه می‌شود که در تماس مستقیم با آب مخزن و در معرض انحلال است؛ همچنین با استفاده از مقادیر ضریب سرعت انحلال که به کمک مقادیر واقعی نمک ذخیره می‌شود، مخزن (نتیجه اندازه‌گیری‌های میدانی) و مقادیر شوری اندازه‌گیری‌شده EC آب مخزن، واسنجی و تعیین می‌شود، ضریب انحلال و درنهایت مقدار نمک ورودی به مخزن محاسبه می‌شود که ناشی از انحلال کارست نمکی است و این مقادیر، به مقدار نمک ورودی همراه با آب رودخانه بالادست، به مخزن اضافه می‌شود؛ در نتیجه حجم نمک ذخیره‌شده در مخزن (به‌صورت متغیر انباشت) و مقدار نمک خروجی از مخزن محاسبه می‌شود. در این قسمت، همچنین مقادیر حجم مفید مخزن که برای تأمین اهداف سد

$$S_m(\text{kg/s}) = Q_{\text{salt}}(\text{m}^3/\text{s}) \times \rho_{\text{salt}}(\text{kg}/\text{m}^3) \quad (4)$$

در رابطه (۳)، منظور از S_v ، مقدار خوردگی و فرسایش گنبد نمکی (ضریب سرعت انحلال نمک) و A مساحتی از گنبد نمک است که در تماس مستقیم با آب مخزن است و در رابطه (۴)، چگالی کارست نمکی را نمایش می‌دهد.

رابطه (۳) محاسبه می‌شود و به کمک آن در رابطه (۴)، ضریب انحلال کارست نمک را (S_m) که در واقع بیانگر میزان ورود نمک ناشی از انحلال کارست به مخزن است، برحسب کیلوگرم بر ثانیه محاسبه می‌کند (Mohammad Taheri 2014).

$$Q_{\text{salt}}(\text{m}^3/\text{s}) = S_v(\text{m}/\text{s}) \times A(\text{m}^2) \quad (3)$$



شکل ۶- قسمت دوم مدل شبیه‌سازی SD مخزن گتوند (فرآیند انحلال کارست نمکی موجود در مخزن و تعامل آن با آب مخزن)
Fig 6 - Part 2 SD Simulation Model of Gotvand Reservoir (Gotvand Reservoir Operation Curve)

است، نمی‌توان از روابط مشخص انحلال، نرخ انحلال توده نمکی موجود در مخزن گتوند را تعیین کرد؛ ضمناً براساس روابط (۳) و (۴)، ضریب سرعت انحلال نمک یا خوردگی و فرسایش گنبد نمکی (S_v)، مهم‌ترین پارامتری است که در محاسبه مقدار نمک تجمع‌یافته در مخزن، در مدل SD، نقش بسزایی دارد؛

در واقع S_v ، فرآیند انحلال را توصیف می‌کند و تعیین آن، دارای پیچیدگی زیادی است و نیاز به واسنجی دارد. با تعیین مقدار صحیح ضریب سرعت انحلال، می‌توان تطابق بالایی را بین نتایج خروجی مدل SD و اندازه‌گیری در واقعیت ملاحظه کرد.

واسنجی و تعیین ضریب سرعت نرخ انحلال (مقدار خوردگی و فرسایش گنبد نمکی)

واضح است که تعیین ضریب سرعت انحلال، به دلیل اثر عوامل متعدد بر مقدار این ضریب، حساسیت زیادی دارد؛ با توجه به تغییرات سرعت آب درون مخزن، در طول عمر بهره‌برداری از مخزن گتوند، به دلایل احجام متفاوت، جریان ورودی به مخزن، آبیگری از لایه‌های بالایی و هیدرودینامیک متغیر مخزن، گرادیان شوری، اثر دما و لایه‌بندی حرارتی و ...؛ همچنین حجم عظیم کارست نمکی عنبل که به صورت یک منبع آلودگی فعال عمل می‌کند و امکان ریزش آن درون مخزن، مثلاً پس از تخلیه سریع مخزن در فصول سیلابی

شایان ذکر است، مقادیر S_v برای مابقی دوره شبیه‌سازی مدل SD، از تاریخ ۱۳۹۲/۰۲/۳۱ تا پایان اسفندماه ۱۳۹۵، با استفاده از مقادیر EC اندازه‌گیری شده در مخزن گتوند (جدول ۵) و مقادیر نمک ذخیره‌شده در مخزن (جدول ۶)، واسنجی و تعیین شد.

جدول ۵- مقادیر EC اندازه‌گیری شده مخزن سد گتوند

Table 5- Measured EC values of Gotvand dam reservoir (Basic studies of Khuzestan Water and Electricity Organization ,Ministry of Energy)

ردیف	بازه زمانی (سال)	(EC) ($\mu\text{mho/cm}$)
۱	۱۳۸۴-۱۳۸۰	۸۹۹
۲	۱۳۸۹-۱۳۸۵	۱۰۹۷
۳	۱۳۹۰	۱۳۱۴
۴	۱۳۹۱	۱۴۱۵
۵	۱۳۹۲	۱۲۳۳
۶	۱۳۹۳	۱۴۱۸
۷	۱۳۹۴	۱۵۴۱

جدول ۶- مقادیر EC اندازه‌گیری شده مخزن سد گتوند

Table 6- Amounts of salt stored in Gotvand reservoir based on field measurements (Basic studies of Khuzestan Water and Electricity Organization ,Ministry of Energy)

ردیف	زمان اندازه‌گیری	مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن (میلیون تن)
۱	فروردین ۱۳۹۱	۵/۳
۲	اردیبهشت ۱۳۹۲	۱۱/۲
۳	اسفند ۱۳۹۲	۱۵/۲
۴	اسفند ۱۳۹۳	۱۹/۶
۵	شهریور ۱۳۹۵	۲۷/۶

پس از واسنجی، اعتبار سنجی و درنهایت تعیین ضریب سرعت انحلال، با استفاده از تابع look up در نرم‌افزار ونسیم، مقادیر این پارامتر، طبق مقادیر مندرج در جدول‌های ۴ و ۷ در مدل SD، برای تعیین سایر پارامترهای شوری، تغذیه شد:

در گذشته، مقدار این پارامتر توسط محققان متعدد، درباره سازند نمکی عنبل در مخزن گتوند، ثابت فرض شده است (Hashemi Heidari 2012, Baghdadashtaki et al. 2010, Mahab Ghods Consulting Engineering Company 2012, Mohammad Taheri 2014)؛ البته (Baghdashtaki et al. 2010). پس از تخمین S_v به میزان ۱/۱ سانتی‌متر بر ساعت در سال قبل از آبیگری مخزن، پیش‌بینی کردند که مقدار این پارامتر در ابتدای آبیگری مخزن، تا ۲۰ برابر افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر، با توجه به تغییرات زیاد و متغیر بودن این پارامتر، خصوصاً در طول دوره آبیگری مخزن، از مقادیر واسنجی شده توسط Naderkhanloo et al. 2017، برای استفاده در مدل SD و در بازه زمانی دوره آبیگری (۱۳۹۰/۰۵/۰۷ تا ۱۳۹۲/۰۲/۳۰) استفاده شد (جدول ۴). ایشان با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی مخزن گتوند با مدل MIKE3 و اجزاهای متعدد این مدل و مقایسه طیف وسیعی از خروجی‌های شبیه‌سازی با اطلاعات واقعی پارامترهای شوری اندازه‌گیری شده از مخزن سد گتوند، مقدار پارامتر ضریب سرعت انحلال را در بازه زمانی آبیگری مخزن، واسنجی، اعتبار سنجی و در نهایت تعیین کردند.

جدول ۴- مقادیر واسنجی نرخ انحلال در طول دوره آبیگری مخزن گتوند (Naderkhanloo et al. 2017)

Table 4 - Calibration values of dissolution rate (S_v) during Gotvand reservoir dewatering period (Naderkhanloo et al. 2017)

ردیف	از تاریخ	تا تاریخ	مقدار خوردگی یا S_v (cm/h)
۱	۱۳۹۰/۰۵/۰۷	۱۳۹۰/۰۵/۱۶	۴
۲	۱۳۹۰/۰۵/۱۷	۱۳۹۰/۰۷/۰۱	۱/۵
۳	۱۳۹۰/۰۷/۰۲	۱۳۹۰/۰۸/۳۰	۰/۵
۴	۱۳۹۰/۰۹/۰۱	۱۳۹۰/۱۰/۳۰	۲
۵	۱۳۹۰/۱۱/۰۱	۱۳۹۰/۱۱/۳۰	۳
۶	۱۳۹۰/۱۲/۰۱	۱۳۹۰/۱۲/۲۹	۷
۷	۱۳۹۱/۰۱/۰۱	۱۳۹۱/۰۱/۳۱	۱/۵
۸	۱۳۹۱/۰۲/۰۱	۱۳۹۱/۰۳/۲۹	۱
۹	۱۳۹۱/۰۳/۳۰	۱۳۹۲/۰۲/۳۰	۰/۵

آلودگی‌های ورودی، تغییر رژیم هیدرولیکی، تغییر وضعیت فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی داخل مخزن و برداشت انتخابی از لایه‌های مختلف صورت می‌گیرد و لایه‌بندی حرارتی و کیفی آب مخازن و دریاچه‌ها، موجب تغییر کیفیت آب در اعماق مختلف می‌شود؛ بنابراین، تراز برداشت آب در کیفیت آب خروجی از مخزن مؤثر است. بر این اساس در این مطالعه، قسمت سوم مدل SD (شکل ۷)، به گونه‌ای طراحی شده است که تراز را به‌عنوان تراز بهینه آبیگری پیشنهاد می‌کند که در آن EC کل آب خروجی از مخزن (مجموع آب ورودی به نیروگاه، آب خروجی از تراز دریاچه‌های تحتانی و سرریز)، مساوی یا کمتر از ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر باشد (Mahab Ghods Consulting Engineering Company 2012). تعیین مقدار آب خروجی از دریاچه‌های تحتانی، با توجه به این اصل است که در سدها، چون بار هیدرولیکی آب بر دریاچه‌های تحتانی بیشتر است، مدل SD، مقدار خروجی پیشنهادی از دریاچه‌های تحتانی را بیشتر از دریاچه‌های نیروگاه و سرریز، مشخص می‌کند.

جدول ۷- مقادیر واسنجی نرخ انحلال در طول دوره آبیگری مخزن گتوند

Table 7 - Calibration values of dissolution rate (Sv) during Gotvand reservoir dewatering period

ردیف	از تاریخ	مقدار خوردگی یا Sv (cm/h)
۱	۱۳۹۲ خرداد	۰/۵۷
۲	۱۳۹۲ اسفند	۰/۸
۳	۱۳۹۳ اسفند	۰/۵۱
۴	۱۳۹۵ شهریور	۰/۸

پس از محاسبه S_v ، مقادیر Q_{salt} ، S_m ، تعیین و بر این اساس، مقادیر نمک ورودی ناشی از انحلال کارست، محاسبه و به مقادیر نمک ورودی، به‌همراه رواناب بالادست اضافه شد؛ به این ترتیب، کل نمک ورودی به مخزن سد، مشخص شد.

قسمت سوم مدل SD مخزن گتوند (نمایش برداشت آب از ترازهای مختلف مخزن، در مقایسه با برداشت آب از تراز دریاچه‌های تحتانی و مشخص کردن تراز بهینه آبیگری) مدیریت کیفی آب مخازن و دریاچه‌ها عموماً از طریق کنترل

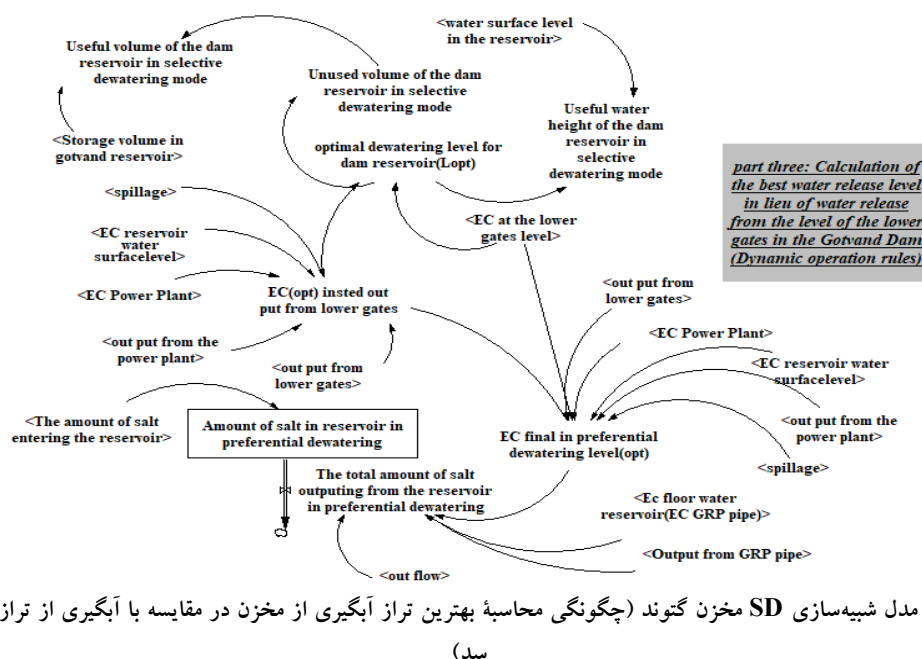
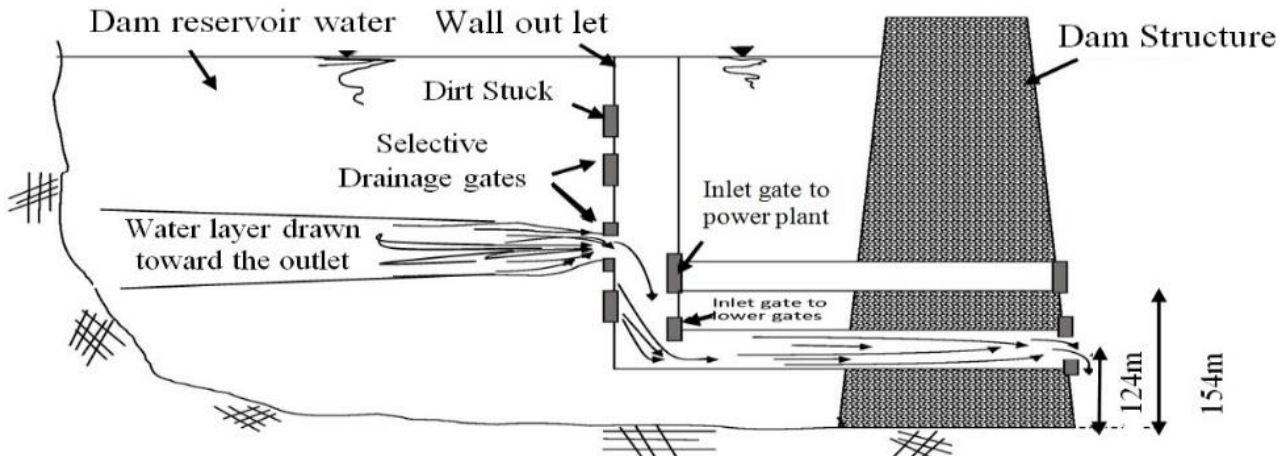


Fig 7 - Part 3 SD Simulation Model of Gotvand Reservoir (How to calculate the best level of dewatering from the reservoir compared to dewatering from the level of the lower valves of the dam)

تغییرات تراز سطح آب مخزن است، جهت آبیگری از ترازهای مختلف مخزن به‌دلخواه باشد (شکل ۸) و باید مقدار شوری در ترازهای مختلف مخزن مشخص شود

شایان ذکر است تراز دریچه‌های تحتانی سد گتوند، ۱۲۴ متر و تراز آبیگرهای نیروگاه، ۱۵۴ متر است. با توجه به اینکه تغییرات مقدار شوری، متناسب با تغییرات حجم آب و در نتیجه



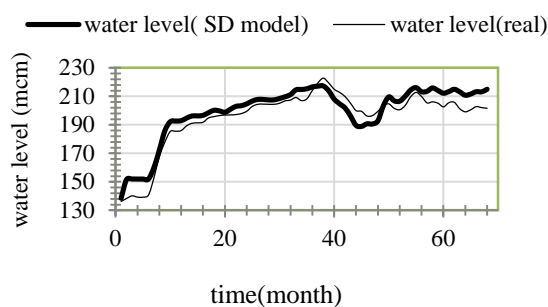
شکل ۸- نمایش شماتیک تخلیه آب از تراز انتخابی به جای آبیگری از تراز دریچه‌های تحتانی

Fig 8 - Shows a schematic diagram of water discharge from the selected level at dam reservoir instead of intake from the lower gate

کارست نمکی که در معرض انحلال با آب مخزن است، مقدار فرسایش و خوردگی گنبد نمکی (S_v)، غلظت نمک و مقدار نمک انباشته‌شده در مخزن است که نتایج خروجی مدل در این بخش، با داده‌های اندازه‌گیری‌شده شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، سازمان آب و برق خوزستان، گروه آب دانشگاه شهید چمران اهواز، مقایسه شد؛ در نهایت با رسم نمودارهای ۹ تا ۱۴ و مقایسه آماری بین پارامترهای مؤثر و مهم در مقدار انحلال نمک کارست نمکی و محاسبه ضریب رگرسیون، اعتبار مدل SD بررسی شد.

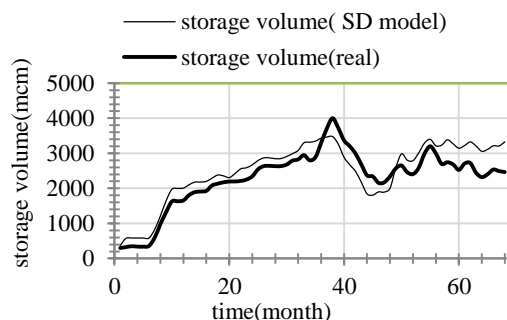
اعتبارسنجی مدل

به‌منظور بررسی صحت نتایج مدل SD و تعیین مقدار اعتبار آن، در این بخش خروجی‌های مدل SD با رفتار مرجع (اطلاعات واقعی مخزن)، مقایسه می‌شود. برای انجام این کار، دسته اول اطلاعات این سال‌ها، مانند مقادیر جریان ورودی و خروجی از مخزن، تراز ارتفاع آب در مخزن، حجم ذخیره مخزن از سازمان آب و برق خوزستان در بازه زمانی مردادماه ۱۳۹۰ تا اسفندماه ۱۳۹۵ اخذ و با مقادیر خروجی این پارامترها از مدل SD، مقایسه شد. دسته دوم اطلاعات پارامترهای مهم درباره سازند نمکی، نظیر اندازه سطح تماس



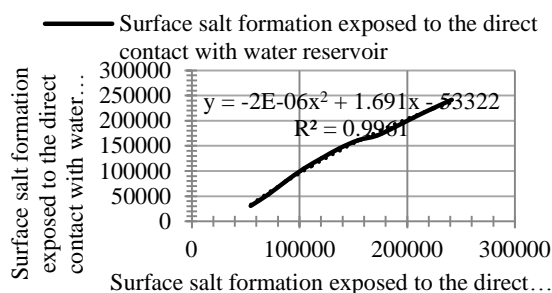
شکل ۱۰- مقایسه رفتار مدل SD و مرجع در تراز سطح آب در مخزن نسبت به زمان

Fig10 - Comparison of SD and reference model behavior in water surface level in the reservoir relative to time



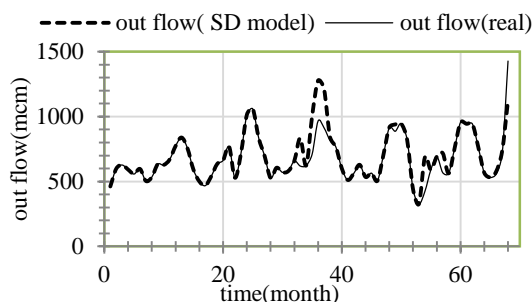
شکل ۹- مقایسه رفتار مدل SD و مرجع در مقدار حجم آب ذخیره شده در مخزن، در طول دوره شبیه‌سازی

Fig 9 - Comparison of SD and reference model behavior in the amount of water stored in the reservoir



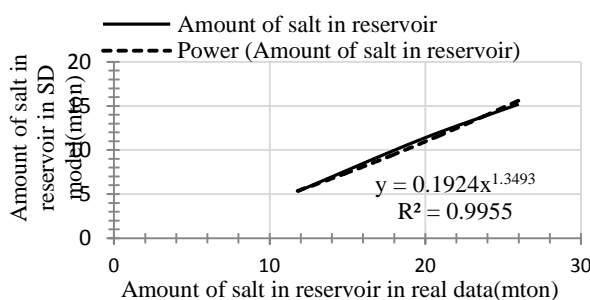
شکل ۱۲- مقایسه آماری مقادیر مدل SD و مرجع در سطح کارست نمک در معرض انحلال مستقیم

Fig 12- Statistical comparison of SD model and reference values at the surface of salt karst exposed to direct dissolution



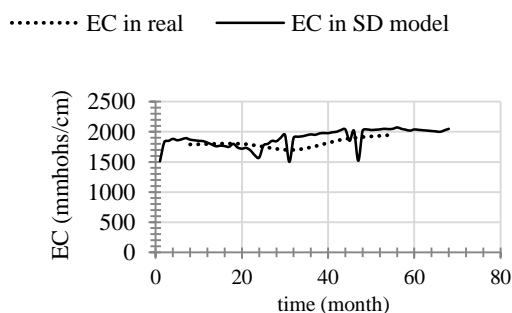
شکل ۱۱- مقایسه رفتار مدل SD و مرجع، در جریان خروجی از مخزن نسبت به زمان (مردادماه ۱۳۹۰ تا اسفندماه ۱۳۹۵)

Fig 11- Comparison of SD and reference model behavior in the output stream from the dam reservoir relative to time (August 2011 to september 2016)



شکل ۱۴- مقایسه آماری مقدار نمک انباشته‌شده در مخزن (خروجی مدل SD و مرجع) (مردادماه ۱۳۹۰ تا شهریورماه ۱۳۹۵)

Fig 14- Statistical comparison of the amount of salt accumulated in the reservoir (SD and reference model output) (August 2011 to september 2016)



شکل ۱۳- مقایسه آماری مقادیر EC آب خروجی از مخزن (خروجی مدل SD و مرجع) (مرداد ۱۳۹۰ تا اسفند ۱۳۹۴)

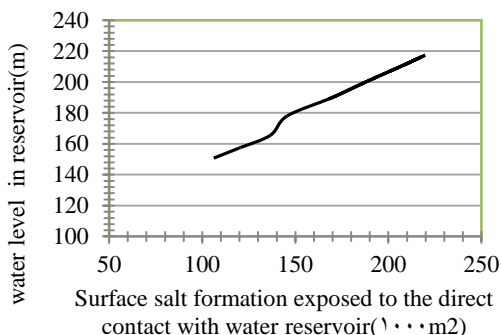
Fig 13- Statistical comparison of water salt concentration of reservoir output (SD model and reference output) (August 2011 to March 2016)

شکل ۱۵، تغییرات مقدار نمک انباشته‌شده در مخزن، در دوره شبیه‌سازی را در کنار تغییرات حجم آب مخزن نشان می‌دهد. با افزایش حجم آب در مخزن و به‌تبع آن افزایش ارتفاع آب در مخزن، چون سطح تماس بیشتری از کارست نمکی در تماس مستقیم با آب مخزن است (شکل ۱۶)، به این ترتیب، میزان انحلال و در نتیجه میزان ورود نمک به مخزن و مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن افزایش می‌یابد؛ در پایان دوره شبیه‌سازی، مقدار نمک انباشته‌شده، به دلیل انحلال کارست نمکی و همچنین مقدار نمک به‌همراه آب رودخانه بالادست، ۴۳/۷۲ میلیون تن باشد. در صورتی که نتایج مطالعه Jalali et al. 2019، نشان داد، در بازه زمانی اسفندماه ۱۳۹۰ تا اسفندماه ۱۳۹۲، مقدار نمک انباشته‌شده در مخزن گتوند، ۵۷ میلیون تن نمک به‌علت انحلال کارست، ۷ میلیون تن نمک به‌همراه آب رودخانه بالادست و ۲/۵ میلیون تن نمک به‌همراه رواناب ورودی به مخزن و در مجموع، ۶۶/۵ میلیون تن نمک تا پایان اسفندماه ۱۳۹۲ در مخزن گتوند انباشته شده است؛ ضمن اینکه Mohammd Taheri (2014)، مقدار نمک انباشته‌شده در مخزن گتوند را به‌علت انحلال کارست نمکی تا خردادماه ۱۳۹۳، ۱۱/۷ میلیون تن نمک برآورد کرده است؛ شایان ذکر است، برای مقایسه نتایج مدل SD در پژوهش حاضر با دو مطالعه اخیر یادشده، مدل SD مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن گتوند را تا پایان اسفندماه ۱۳۹۲، ۱۶/۶ میلیون تن، محاسبه کرده است.

همان‌طور که مشاهده شد، در نمودارهای ۹ تا ۱۱ و نمودار ۱۳، روند تغییرات داده‌های واقعی و خروجی مدل، کاملاً مشابه‌اند و در نمودارهای ۱۲ و ۱۴، مقادیر R^2 بالاتر از ۰/۹ است که نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن نتیجه صحت‌سنجی مدل و کالیبره‌بودن آن است. شایان ذکر است، اطلاعات هیدرومتری دریافت‌شده از ایستگاه هیدرومتری گتوند، بدون در نظر گرفتن مقادیر نفوذ و مقدار تبخیر از سطح مخزن است؛ همچنین با توجه به طول‌بودن مخزن گتوند، مسلماً برداشت آب از رودخانه و در طول مخزن بدون هیچ کنترلی صورت می‌گیرد و تا زمانی که آب رودخانه موجود باشد، برداشت آب از آن توسط کشاورزان با انحراف آب انجام می‌پذیرد؛ بنابراین احتمال دقیق‌نبودن مقادیر خروجی از مخزن وجود دارد؛ ضمناً وجود نشت و کم و زیاد شدن مقدار نشت از سد که به‌طور دقیق و مستمر اندازه‌گیری نمی‌شود نیز می‌تواند در مقادیر خروجی از مخزن، خطا ایجاد کند.

بحث و تحلیل یافته‌های پژوهش

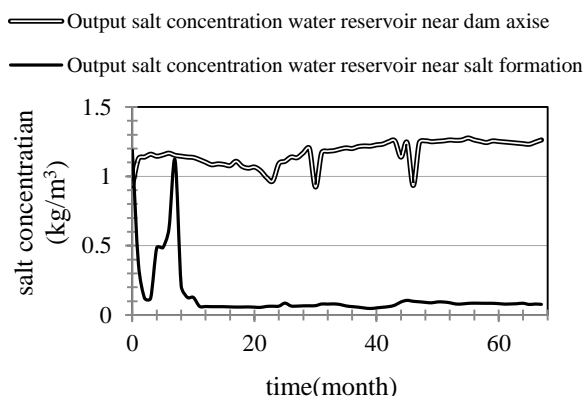
در این مطالعه سعی بر این بود که با استفاده از شبیه‌سازی مخزن گتوند با سیستم دینامیک، امکان مدیریت کیفی مخزن با اجرای منحنی فرمان‌های بهینه و انعطاف‌پذیر (آبگیری از ترازهای مختلف مخزن با مقادیر شوری متفاوت، به‌نحوی که آب خروجی از مخزن، کیفیت مورد تقاضای پایین‌دست را تأمین کند)، با توجه به وجود کارست نمکی در مخزن بررسی و در نهایت، راهکارهای مدیریتی ارائه شود. پس از طراحی مدل و اجرای آن، نتایج زیر حاصل شد:



شکل ۱۶- نمودار تغییرات سطح کارست نمکی در معرض انحلال در مقابل تغییرات تراز سطح آب مخزن گتوند
Fig 16 - changes in saline karst surface subject to dissolution versus water surface level in reservoir

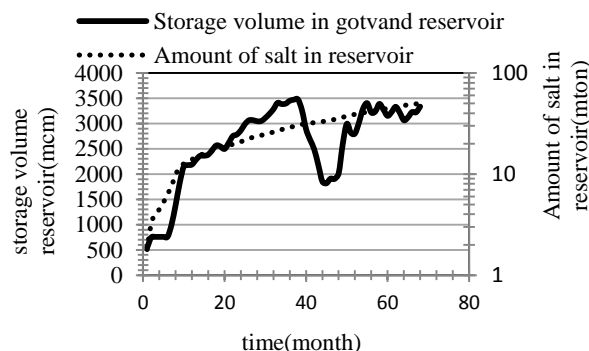
(شکل ۷)، استفاده شده است.

تغییرات دبی نمک ورودی به مخزن، ناشی از انحلال کارست (Q_{salt}) در طول زمان، در شکل ۱۷ نشان داده شده است؛ متوسط دبی نمک ورودی به مخزن، به علت انحلال کارست، برابر با 0.0454 متر مکعب در ثانیه (معادل $1/43$ میلیون متر مکعب در سال) است. نمودار تغییرات شوری در نزدیک کارست و محور سد در دوره شبیه‌سازی مخزن، به صورت شکل ۱۸ است.



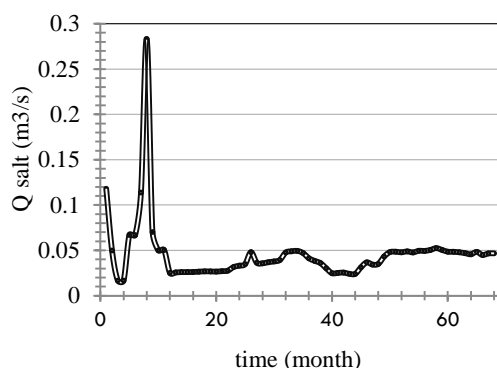
شکل ۱۸- تغییرات غلظت نمک در مخزن در نزدیکی سازند نمکی و در کنار محور سد در دوره شبیه‌سازی

Fig 18- Changes in salt concentration in the dam reservoir near the salt formation and near the dam axis during the simulation period



شکل ۱۵- تغییرات حجم آب در مخزن و تغییرات مقدار نمک انباشته شده در طول دوره شبیه‌سازی
Fig 15- Changes in the volume of water stored in the reservoir and changes in the amount of salt accumulated in the reservoir during the simulation period

مقدار نمک انباشته‌شده در اندازه‌گیری‌های میدانی، در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲، $11/2$ میلیون تن است که مدل SD، مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن را در پایان اردیبهشت ۱۳۹۲، $13/97$ میلیون تن برآورد کرده است. شکل ۱۶، رابطه تغییرات بین تراز سطح آب در مخزن و تغییرات سطح کارست در تماس مستقیم با آب مخزن را نمایش می‌دهد که از این رابطه، در توزیع عمقی میزان ورود نمک به مخزن و آبرگیری از ترازهای انتخابی مخزن، به منظور کنترل مقدار EC آب خروجی از مخزن در قسمت سوم مدل SD سد گتوند

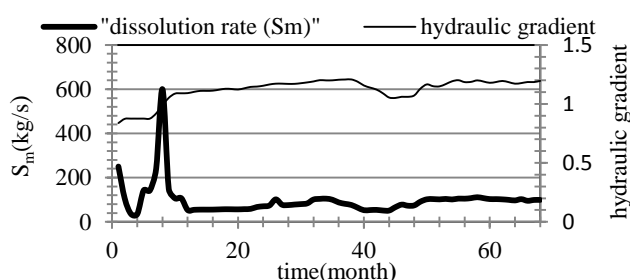


شکل ۱۷- تغییرات دبی نمک ورودی به مخزن ناشی از انحلال کارست نمکی

Fig 17 - changes in salt flow rate to the reservoir due to saline karst dissolution

جداشده از سازند، به‌همراه آب مخزن و جریان‌های بالادستی، حرکت می‌کند و پس از برخورد با بدنه سد، در پشت سد ته‌نشین و انباشته می‌شود (شکل ۱۹).

شکل ۱۹، تغییرات مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن را، در فاصله محور سد تا محل کارست نمایش می‌دهد و همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار نمک انباشته در مخزن، با فاصله‌گرفتن از محور سد کاهش می‌یابد و بیشترین حجم نمک ته‌نشین‌یافته در کنار محور سد است؛ همچنین شکل ۲۰، روند تغییرات ضریب انحلال نمک و روند تغییرات گرادیان هیدرولیکی (مشابه روند تغییرات غلظت نمک در آب، مطابق شکل ۱۸) را نشان می‌دهد.



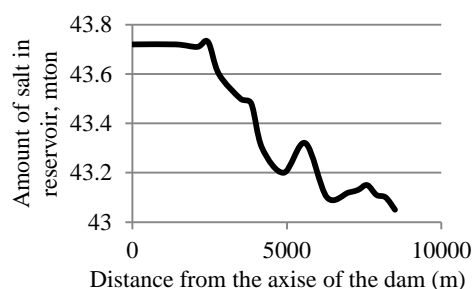
شکل ۲۰- تغییرات گرادیان هیدرولیکی و ضریب انحلال

Fig 20- Changes in hydraulic gradient and dissolution coefficient of salt karst

کارستی، باعث ایجاد مسیرهای نشتی برای آب مخزن و ایجاد جریان در این مناطق می‌شود و سرعت شسته‌شدن و انحلال را افزایش می‌دهد.

در پژوهش حاضر، دامنه تغییرات مقدار ضریب انحلال کارست نمکی، در ۶۸ ماه اول عمر بهره برداری سد توسط مدل SD، از ۳۵/۴۶ تا ۵۹۹/۸۶ کیلوگرم بر ثانیه و به‌طور متوسط ۹۶/۳ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه شد. علت افزایش مقدار این پارامتر تا مقدار ۵۹۹/۸۶، افزایش دبی نمک ورودی به مخزن (۲۸۳/۰ مترمکعب در ثانیه) ناشی از ضریب سرعت انحلال (میزان خوردگی سازند نمکی)، ۷ سانتی‌متر در ساعت است. در مقایسه متوسط، ضریب انحلال سازند نمکی (۹۶/۳)

در ابتدای آبگیری سد، انحلال با سرعت بسیار زیاد و با قابلیت انتقال جرم بالا صورت می‌پذیرد و به این ترتیب، مقدار غلظت نمک در آب مخزن، در نزدیکی سازند افزایش می‌یابد و بعد از گذشت زمان، انحلال با سرعت نسبتاً پایین، صورت می‌گیرد و بعد ثابت می‌ماند. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، در مراحل اولیه انحلال، تغییرات مقدار شوری در نزدیکی محور سد و در نزدیک سازند نمکی، یکسان است؛ با گذشت زمان، مقدار شوری آب مخزن در کنار سازند، کاهش می‌یابد؛ ولی شوری در کنار سازه سد، با همان روند قبلی در حال افزایش است (شکل ۱۸). این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با گذشت زمان، نمک



شکل ۱۹- مقادیر نمک انباشته‌شده در مخزن در فواصل مختلف از محور سد

Fig 19- Amounts of salt accumulated in the reservoir at different distances from the dam axis

شایان ذکر است، به‌علت وجود مناطق ضعیف و سست و شکستگی در محیط کارستی، به‌محض ایجاد جریان در این مناطق و برقراری گرادیان هیدرولیکی، نمک در جوار این نواحی به سرعت شسته می‌شود و با افزایش سرعت، جریان مقدار انحلال افزایش می‌یابد؛ ضمناً به‌دلیل اختلاف ارتفاع بسیار زیاد آب در دو طرف محور سد و در نتیجه اختلاف فشار هیدرولیکی در مناطق منفذی، گرادیان‌های هیدرولیکی بالایی مشاهده می‌شود که باعث افزایش سرعت‌های انحلالی در نواحی کارستی نزدیک محور سد می‌شود و این امر به سهم خود، می‌تواند در صورت وجود مناطق ضعیف در محیط

دارد؛ جدول ۸، بیشترین، کمترین و متوسط مقادیر EC آب مخزن را در ترازهای کف، دریاچه‌های تحتانی، ورودی به نیروگاه و تراز سطح آب مخزن، نشان می‌دهد. شکل ۲۱، ضمن نمایش تغییرات مقدار EC در اعماق مختلف مخزن، نشان می‌دهد گرادیان شوری در لایه‌های نزدیک کف مخزن شدید است.

یکی از پارامترهایی که بر مقدار شوری در ترازهای مختلف آب مخزن مؤثر است، نحوه افزایش تراز سطح آب در مخزن و افزایش حجم آب در مخزن^۱ است؛ شکل ۲۲، ضمن تأیید این فرآیند (افزایش مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن، با افزایش تراز سطح آب مخزن) نشان می‌دهد در یک عمق مشابه از مخزن، مقدار شوری در مخزن با تراز سطح آب بیشتر (حجم آب بیشتر) نسبت به مقدار شوری در مخزن، با تراز سطح آب مخزن کمتر (حجم آب کمتر)، بیشتر است و این موضوع بیان می‌کند، با گذشت زمان و افزایش ارتفاع آب در مخزن سد و عمر بهره‌برداری از سد، عمق لایه‌ها با شوری زیاد، کمتر است و به عبارتی حرکت لایه‌های شور به سمت بالاست و در کف مخزن، با یک لایه فوق اشباع از نمک، روبه رو هستیم.

کیلوگرم در ثانیه) محاسبه شده توسط مدل SD، Hashemi Heidari et al. 2012، با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی و تطبیق نتایج حاصل از آنها در بازه زمانی آبیگری اولیه، مقدار ضریب انحلال سازند کارست نمکی را در شرایط جریان مخزن، ۱۷۰ کیلوگرم بر ثانیه، محاسبه کرد و Mohammad Taheri 2014، در سال سوم پس از آبیگری از سد گتوند، ضریب انحلال را ۲۰۰ کیلوگرم بر ثانیه پیشنهاد داد.

نتایج شبیه‌سازی مدل SD در این پژوهش، با در نظر گرفتن اثر سیلاب ورودی به مخزن در افزایش سرعت آب در مخزن، در هر دوره زمانی و افزایش سرعت فرسایش کارست نمکی نشان داد، مقدار خوردگی کارست نمک در طول پنج سال اول بهره‌برداری سد، به طور متوسط، ۲۲/۱ سانتی‌متر در یک شبانه‌روز (۸۰/۷ متر در سال) است؛ بررسی نتایج خروجی مدل SD، نشان داد نرخ خوردگی سازند نمکی در دوره آبیگری مخزن، ۱/۳ سانتی‌متر در ساعت است؛ در مقایسه با نتایج مطالعات گذشته در این خصوص، Baghadastaki et al. 2010، در سال قبل از آبیگری سد گتوند و با استفاده از آزمایش‌های انحلال‌پذیری سیرکولاسیون نمونه‌های کارست موجود در مخزن گتوند، نشان داد، با فرض سرعت ۱ سانتی‌متر بر ثانیه، برای گردش آب در مخزن، مقدار خوردگی لایه‌های نمکی برابر ۲۴/۶۷ سانتی‌متر در روز (۱/۰۳ سانتی‌متر در ساعت) است؛ همچنین Hashemi Heidari et al. 2012، مقدار این پارامتر را برای کارست نمک عنبل با نرم‌افزار MIKE21، در سال اول بهره‌برداری مخزن، ۴/۸ سانتی‌متر در روز محاسبه کرد؛ Mohammad Taheri. 2014، درباره سد گتوند با نرم‌افزار MIKE3، برای دو سال اول بهره‌برداری مخزن، مقدار خوردگی کارست را ۴/۴۹ سانتی‌متر در روز و Naderkhanloo et al. 2017، ۲/۴ سانتی‌متر در ساعت (به‌طور متوسط طبق جدول ۴) تخمین زدند.

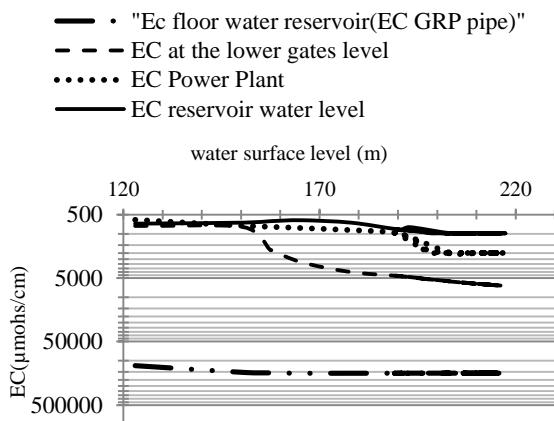
یکی از بهترین روش‌های مدیریت کیفیت آب خروجی از مخزن سد، آبیگری از ترازهای مختلف مخزن است؛ بنابراین شناخت مقدار شوری در ترازهای مختلف مخزن، اهمیت

^۱ قبلاً در شکل ۱۵، روند افزایش مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن، در پی افزایش حجم آب مخزن، نشان داده شده است.

جدول ۸- تغییرات مقادیر EC آب مخزن در ترازهای مختلف مخزن

Table 8- Independent changes of EC reservoir water at different reservoir levels

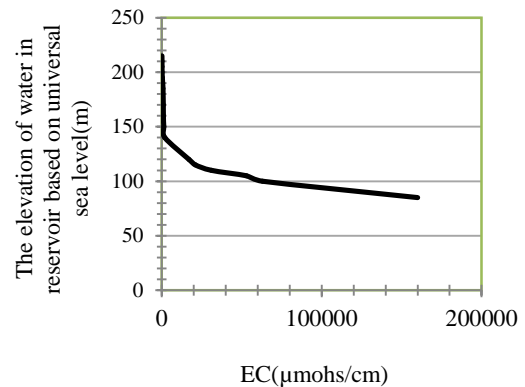
Time (Month)	max	min	ave
Ec floor water reservoir(EC GRP pipe)	168285	142500	160236
EC at the lower gates level	2073	904	1896
EC Power Plant	1390	650	1083
level EC reservoir water surface	980	400	685



شکل ۲۲- تغییرات EC در اعماق مختلف مخزن (ترازکف، تراز دریاچه‌های تحتانی، تراز نیروگاه و تراز سطح آب در مخزن)، نسبت به تغییرات تراز سطح آب در مخزن

Fig 22- EC changes at different depths of the reservoir relative to changes in reservoir water surface level

سرعت، کاهش می‌یابد و این امر، باعث کاهش اختلاط لایه‌ها، جلوگیری از زیاد شدن EC و به تعادل رسیدن غلظت نمک می‌شود؛ همچنین باعث افزایش ضخامت لایه‌های شور مخزن می‌شود و در نهایت با ثابت شدن روند تغییرات شوری در مخزن، لایه‌بندی شوری رخ می‌دهد (شکل ۲۲). در ترازهای نزدیک به سطح مخزن، شوری آب کمتر، کیفیت آن مناسب‌تر و تغییرات غلظت نمک حالت نوسانی دارد؛ علت نوسانی بودن مقادیر غلظت نمک در این ناحیه، آبیگری از ترازهای بالا، اثر جریان ورودی به مخزن، ایجاد و اختلاط لایه‌بندی حرارتی و افزایش زمان ماند هیدرولیکی مخزن - که به تنشینی جریان با چگالی زیاد منجر می‌شود- است. نتایج نشان داد، در صورتی که آبیگری از مخزن، فقط از تراز دریاچه‌های تحتانی صورت پذیرد، فقط در ۴۳ درصد از دوره

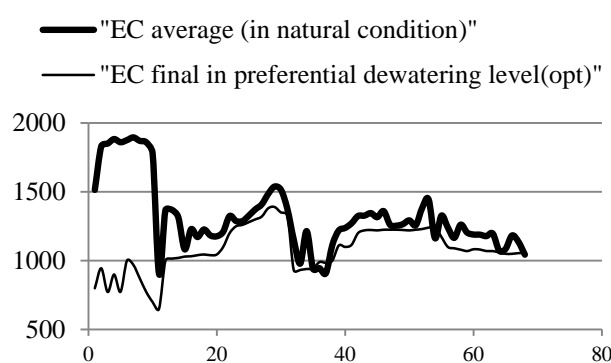


شکل ۲۱- تغییرات مقادیر EC در اعماق مختلف مخزن نسبت به زمان

Fig 21- Changes in reservoir water EC values at different depths of the reservoir over time

روند کلی تغییرات EC در ماه‌های ابتدای آبیگری، افزایشی است و سپس روند افزایش مقدار EC، با نرخ کم صورت می‌پذیرد و بعد تقریباً ثابت می‌شود. روند تغییرات EC در تراز آبیگرهای نیروگاه و سرریز، در محدوده مجاز شوری و در نهایت، ۱۳۹۰ میکروموس بر سانتی‌متر است (تقریباً مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی)؛ ولی مقدار EC در تراز دریاچه‌های تحتانی بسیار زیاد و نزدیک به ۲۰۷۳ میکروموس بر سانتی‌متر است و در ترازهای نزدیک به کف مخزن، نزدیک به ۱۶۸۲۸۵ میکروموس بر سانتی‌متر است. افزایش غلظت و شوری، بیانگر گسترش شوری از لایه‌های بالایی به کف، افزایش یا ثابت بودن میزان ورود نمک به مخزن و پیشروی جریان چگال شور به کف مخزن است. با نزدیک شدن به کف مخزن، شرایط هیدرودینامیکی مثل

و مدل SD، تقریباً ۶ متر بالاتر از تراز نیروگاه را به‌عنوان تراز مناسب آبیگری از مخزن پیشنهاد داده است (شکل ۲۳)؛ در شرایط معمول آبیگری، ارتفاع آب شیرین درون مخزن به‌طور متوسط، ۴۲ متر و در بهترین حالت، بیشترین ارتفاع آب شیرین، ۷۳ متر است و با آبیگری از ترازهای مختلف (به‌طور متوسط تراز ۱۴۷ متر)، به شرطی که EC آب خروجی از مخزن کمتر از ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر شود، ارتفاع آب شیرین درون مخزن، تا ۸۹ متر افزایش می‌یابد. شکل ۲۴، مقادیر EC آب خروجی از مخزن را در حالت معمول آبیگری از مخزن و در حالت آبیگری از تراز انتخابی نمایش می‌دهد.

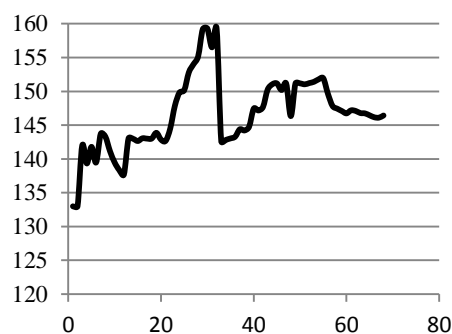


شکل ۲۴ - نمایش تغییرات EC آب خروجی از مخزن، در حالت معمول آبیگری از مخزن و نمایش تغییرات EC آب خروجی از دریاچه‌های تحتانی سد در حالت آبیگری از تراز انتخابی (تراز غیر از دریاچه‌های تحتانی)

Fig 24- Displays the EC changes of the out flow in the normal mode of dewatering from the dam reservoir and changes EC in outlet water from the lower gates of the dam by dewatering from the selected level specified by the SD model

همان‌گونه که شکل ۲۶ نشان می‌دهد، نتایج شبیه‌سازی مخزن گتوند با سیستم دینامیک ثابت کرد، به‌طور متوسط، حدود ۶۱٪ شوری آب مخزن گتوند به‌صورت مستقیم (ورود نمک به‌همراه رواناب بالادست به مخزن) است و مابقی (حدود ۳۹٪ شوری مخزن گتوند)، به‌صورت غیر مستقیم و با افزایش تراز سطح آب در مخزن، افزایش گرادیان هیدرولیکی و افزایش سطح کارست در تماس آب با مخزن و در نتیجه انحلال کارست نمکی، وارد مخزن می‌شود.

شبیه‌سازی، مقدار EC آب خروجی کوچک‌تر یا مساوی ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر (مقدار EC آب خروجی از مخزن سد) است و اگر آبیگری از مخزن از ترازهای بالاتر از دریاچه‌های تحتانی باشد، در ۱۰۰ درصد دوره شبیه‌سازی، مقدار EC آب خروجی کوچک‌تر یا مساوی ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است و مقدار بهره‌برداری بهینه از مخزن نسبت به حالت معمول، ۵۷ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۲۳)؛ شایان ذکر است در ۷/۳۵ درصد دوره بهره‌برداری (بازه زمانی دی‌ماه ۱۳۹۲، اردیبهشت ۱۳۹۳، گام زمانی ۳۰ تا ۳۴)، آب در تراز نیروگاه هم، EC بالاتر از ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر دارد

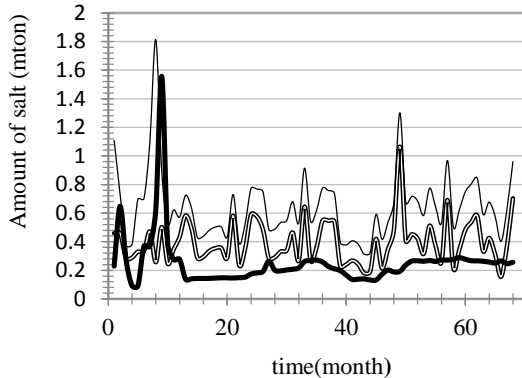


شکل ۲۳- تراز آب مخزن با EC برابر با ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر

Fig 23- The water level of the dam reservoir with EC is equal to 1300 $\mu\text{mho/cm}$

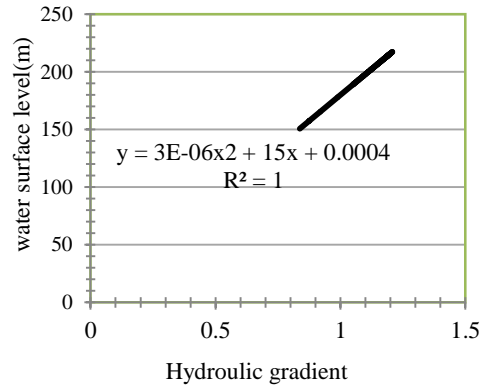
شکل ۲۵، نشان می‌دهد، روند تغییرات گرادیان هیدرولیکی و تغییرات تراز سطح آب در مخزن، کاملاً شبیه به هم و به صورت تقریباً خطی است. افزایش گرادیان هیدرولیکی در مخزن و افزایش جریان در خلل و فرج کارست، به افزایش انحلال کارست نمکی منجر می‌شود؛ زیرا با افزایش تراز سطح آب در مخزن، سطح بیشتری از گنبد نمکی در تماس با آب و در معرض انحلال است؛ همچنین به دلیل افزایش فشار مغذی در حفرات، گردش آب در آنها، فرسایش و تخریب خلل و فرج، مقدار انحلال بیشتر است.

- the input Salt arrival rate of flow of the river upstream
- The amount of salt entering the reservoir
- The input salt from dissolution of salt formation in reservoir



شکل ۲۶- نمایش مقدار کل نمک ورودی به مخزن (مجموع نمک ورودی به مخزن از طریق انحلال کارست و مقدار نمک ورودی به‌همراه آب رودخانه بالادست) **Fig 26 - Displays the total amount of salt entering the reservoir (Total salt entering the reservoir due to karst dissolution and the amount of salt entering the upstream river water)**

مقادیر پارامترهای مستقل یا پارامترهای وابسته‌ای است که به‌تنهایی قابل کنترل و بر مقدار و توزیع شوری در مخزن مؤثر است؛ در واقع در هر آنالیز حساسیت، به‌تنهایی مقادیر هر یک از پارامترهای سطح تماس گنبد نمکی با آب مخزن، دبی ورودی به مخزن، تراز سطح آب در مخزن و ضریب انحلال، کاهش یا افزایش داده می‌شود و در پی این تغییرات، میزان تغییرات نمک ذخیره‌شده در مخزن، ضریب انحلال، EC در تراز دریچه‌های تحتانی سد و همچنین حجم مفید آب مخزن سد را اندازه‌گیری می‌کنیم. جدول‌های ۹ و ۱۰ و شکل‌های ۲۷ و ۲۸، نمونه‌ای از نتایج خروجی آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر، بر توزیع شوری در مخزن گتوند و با مدل SD است:



شکل ۲۵- تغییرات تراز سطح آب مخزن در مقابل تغییرات گرادیان هیدرولیکی

Fig 25- Reservoir water level changes versus hydraulic gradient changes

در مقایسه با نتایج این پژوهش، Ghomeshi and Haghbin (2013) اثر سد گتوند را بر افزایش شوری رودخانه کارون، با اندازه‌گیری شوری آب در ایستگاه‌های منتخب، در مسیر کارون و دز تحلیل کرد. نتایج این پژوهش نشان داد، مقدار اثر سد گتوند بر افزایش شوری، تاکنون حداکثر ۲۳٪ و ۷۱٪ افزایش شوری ناشی از ورود زهکش‌های مختلف در مسیر کارون است و همچنین ۶٪ نیز به تغییرات شوری در رودخانه دز مربوط است که آن هم به ورود زهکش‌ها در مسیر این رودخانه مرتبط می‌شود.

آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری

هدف از این بخش، استفاده از مدل SD، به‌منظور بررسی تغییر در

جدول ۹- نتایج آنالیز حساسیت افزایش مقادیر پارامترهای مؤثر بر مقدار شوری در مخزن

Table 9 - Results of sensitivity analysis of increasing the values of parameters affecting the amount of salinity in the reservoir

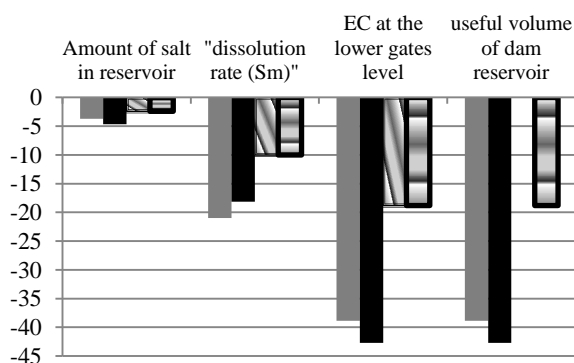
درصد تغییرات	درصد تغییرات	درصد تغییرات	درصد تغییرات	شرح
درصد تغییرات	درصد تغییرات	EC در تراز	حجم مفید آب	
میزان نمک ذخیره شده در مخزن	ضریب انحلال	دریچه‌های تحتانی سد	مخزن سد	
۲/۴	۱۰	۱۷	۰	افزایش ۱۰٪ سطح تماس کارست
۲	۶	۱۱/۶	۴/۴	افزایش ۱۰٪ دبی ورودی به مخزن
۶	۲۷/۸	۴۲	۱۰	افزایش ۱۰٪ تراز سطح آب در مخزن
۲/۶	۱۰	۱۳/۶	۰/۲۴	افزایش ۱۰٪ ضریب انحلال

جدول ۱۰- نتایج آنالیز حساسیت کاهش مقادیر پارامترهای مؤثر بر مقدار شوری در مخزن

Table 10 - Results of sensitivity analysis of reducing the values of parameters affecting the amount of salinity in the reservoir

درصد تغییرات	درصد تغییرات	درصد تغییرات	درصد تغییرات	شرح
میزان نمک ذخیره شده در مخزن	ضریب انحلال	در Ec در تراز دریچه‌های تحتانی سد	تغییرات حجم مفید آب مخزن سد	
-۲/۴	-۱۰	-۱۸/۸	۰	کاهش ۱۰٪ سطح تماس کارست
-۳/۷	-۲۱	-۳۹	-۳۰/۲	کاهش ۱۰٪ دبی ورودی به مخزن
-۴/۶	-۱۸	-۴۲/۷	-۱۹/۲	کاهش ۱۰٪ تراز سطح آب در مخزن
-۲/۳۸	-۱۰	-۱۸/۸	۰	کاهش ۱۰٪ ضریب انحلال

کاهش ۱۰٪ تراز سطح آب در مخزن ■ افزایش ۱۰٪ دبی ورودی به مخزن
 کاهش ۱۰٪ ضریب انحلال ■ افزایش ۱۰٪ سطح تماس کارست



شکل ۲۸- نتایج آنالیز حساسیت کاهش مقادیر پارامترهای مؤثر بر مقدار شوری در

مخزن

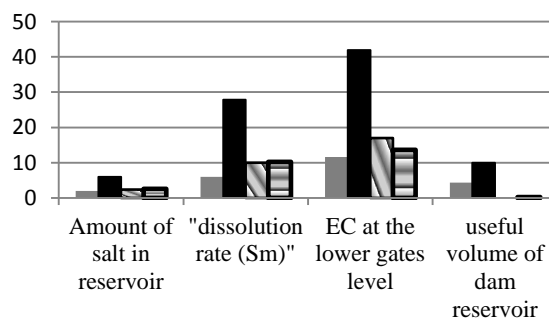
Fig 28 - Results of sensitivity analysis of reducing the values of parameters affecting the amount of salinity in the reservoir

نمکی داریم و با کاهش تراز سطح آب در مخزن، بیشترین کاهش را در میزان EC آب خروجی و مقدار نمک ذخیره‌شده در مخزن داریم. به عبارتی دیگر، با تغییر کوچکی، خصوصاً در تراز سطح آب در مخزن شوند، مقادیر پارامترهای بیانگر توزیع شوری در مخزن، تغییر می‌یابد.

نتیجه

این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی بهره‌برداری مخزن و نیروگاه سد گتوند و رفتار سازند نمکی عنبل در تعامل با آب مخزن و همچنین توزیع شوری در مخزن گتوند، با روش سیستم

افزایش ۱۰٪ تراز سطح آب در مخزن ■ افزایش ۱۰٪ دبی ورودی به مخزن
 افزایش ۱۰٪ ضریب انحلال ■ افزایش ۱۰٪ سطح تماس کارست



شکل ۲۷- نتایج آنالیز حساسیت افزایش مقادیر پارامترهای مؤثر بر مقدار

شوری در مخزن

Fig 27 - Results of sensitivity analysis of increasing the values of parameters affecting the amount of salinity in the reservoir

علت بررسی اثر تغییرات مقادیر تراز سطح آب در مخزن، سطح تماس کارست با آب مخزن، دبی ورودی از بالادست مخزن و ضریب انحلال کارست، این است که مقادیر این پارامترها را می‌توان جداگانه و به‌طور مستقل با اعمال تدابیری، کاهش یا افزایش داد.

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد، نسبت به شرایط واقعی مخزن، با افزایش تراز سطح آب در مخزن گتوند، بیشترین افزایش را در تغییرات مقادیر حجم مفید آب مخزن سد، نمک ذخیره‌شده، ضریب انحلال و EC آب خروجی از تراز دریچه‌های تحتانی سد، مشاهده می‌شود؛ همچنین نتایج این بخش نشان داد با کاهش دبی ورودی به مخزن، بیشترین کاهش را در میزان حجم مفید مخزن و ضریب انحلال سازند

انحلال نمک، بیشتر از ضریب انحلال مدل شبیه‌سازی است؛ ولی مطمئناً اصلی‌ترین عامل انحلال گنبد نمکی و افزایش شوری آب مخزن، انحلال سطحی در اثر تماس لایه‌های نمک سازند کارستی با حجم آب مخزن است که این پدیده به صورت آرام و مداوم و به‌صورت دینامیک در حال روی‌دادن است.

- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری نشان داد، پارامترهای تراز سطح آب در مخزن و سپس مقدار دبی ورودی به مخزن سد، اثر درخور توجهی در نحوه توزیع شوری و مقدار غلظت نمک در مخزن دارد.

- تغییرات بیشتر تراز سطح آب مخزن در طی یک مدت کوتاه، باعث افزایش بیشتر غلظت نمک می‌شود و علت آن افزایش گرادیان هیدرولیکی در مخزن و افزایش جریان در خلل و فرج کارست و درنهایت، انحلال بیشتر کارست نمکی است و رابطه تراز سطح آب در مخزن و گرادیان هیدرولیکی تقریباً خطی است.

- دبی ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست، به‌دلیل اثراتی که بر شرایط هیدرودینامیکی مخزن می‌گذارد، اثر مستقیم بر روند شوری در مخزن دارد؛ به همین دلیل، با کنترل دبی ورودی به مخزن از طریق مخازن سدهای بالادست، خصوصاً سد دز و اجرای منحنی فرمان‌های بهینه درباره مقدار آب ره‌اشده از طریق سد دز و همچنین سد گتوند، می‌توان روند پخش و توزیع شوری در مخزن را کنترل کرد.

- با قرارگیری دریچه‌های تخلیه‌کننده آب، جهت پایین‌دست در رقوم بالاتر یا آبیگری از ترازهای انتخابی و بالاتر از تراز دریچه‌های تحتانی (به‌طور متوسط تراز ۱۴۷ متر) به جای آبیگری از تراز دریچه‌های تحتانی (تراز ۱۲۴ متر) و اختلاط آن با آب خروجی از تراز نیروگاه، EC کلی آب خروجی از مخزن کوچک‌تر یا مساوی با مقدار ۱۳۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر و برای تأمین نیاز پایین‌دست، پذیرفتنی است.

دینامیک، در بازه زمانی مردادماه ۱۳۹۰ تا اسفندماه ۱۳۹۵ به مدت ۶۸ ماه، با استفاده از نرم‌افزار ونسیم انجام شد؛ در این مطالعه سعی بر این بود با ابزار مدل‌سازی، حتی‌الامکان پیش‌بینی درست و جامعی از شرایط کیفی مخزن در اندرکنش با کارست نمکی صورت گیرد؛ با توجه به نتایج شرح داده‌شده، مشاهده شد، شرایط مخزن در طی دوره آبیگری و بهره‌برداری از آن، شرایط گوناگونی است؛ در بازه زمانی شبیه‌سازی پژوهش حاضر نیز، پارامترهای هیدرولیکی، هیدرودینامیکی و آب‌وهوایی متغیر است که این موضوع را می‌توان در داده‌های مربوط به مخزن مشاهده کرد؛ به همین دلیل قابل پیش‌بینی است که در طی دوره شبیه‌سازی با SD با مراحل مختلفی از توزیع شوری در مخزن، در اثر انحلال سازند نمکی روبه‌رو شویم. نتایج پژوهش حاضر به شرح زیر بیان می‌شود:

- مقدار کل نمک انباشته‌شده در مخزن در پایان دوره شبیه‌سازی، ۴۳/۷۲ میلیون تن، محاسبه شد.

- متوسط وزن نمک ورودی به مخزن برابر با ۶۴۵ هزارتن در ماه (۳۹۵ هزارتن نمک به‌همراه روان آب ورودی از بالادست به مخزن و ۲۵۰ هزارتن به‌علت انحلال سازند نمکی عنبل) محاسبه شد.

- به‌دلیل برخورد جریان‌های شور بالادست مخزن با محور سد و انباشته‌شدن نمک در کنار محور سد، مقدار شوری در کنار محور سد، به‌طور متوسط ۸/۶۸ برابر مقدار شوری در کنار سازند نمکی است.

- مقدار نمک انباشته‌شده در مخزن، با فاصله‌گرفتن از محور سد کاهش یافته و بیشترین حجم نمک، در مجاورت محور سد ته‌نشین شده است.

- میانگین سرعت انحلال نمک در طول دوره شبیه‌سازی، ۰/۹۲۱ سانتی‌متر در ساعت (۱۹/۳۴ سانتی‌متر در روز) حاصل شد.

- در مخزن واقعی علاوه بر انحلال سطحی، نفوذ آب به داخل حفرات، شکستگی‌های موجود در منطقه و لغزش لایه‌های نمک به داخل مخزن از عوامل دیگر افزایش شوری در داخل آب مخزن هستند که تاکنون در مدل‌های شبیه‌سازی، این موارد در نظر گرفته نشده‌اند؛ بنابراین مقدار واقعی ضریب

References

- Afrasiabian A. and Rezaei M. T. 1999. Study of calcareous formations in the Persian Gulf catchment area in terms of karst water resources potential, Third Conference of the Geological Society of Iran, Shiraz (in Persian).
- Ahmadi M.H. and Zarghami M. 2019. Should water supply for megacities depend on outside resources? A Monte-Carlo system dynamics simulation for Shiraz, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 44: 163-170.
- Ahmad S. Simonovic SP. 2000. Dynamic modeling of flood management policies. In: 18th International Conference of the System Dynamics Society: Sustainability in the Third Millennium, Bergen, Norway, August 6 – 10
- Alkattan M. Oelkers E.H. Dandurand J.L. and Schott J. 1997. Experimental studies of halite dissolution kinetics. The effect of saturation state and the presence of trace metals. *Journal of Chemical Geology*, 137(4) 201-219.
- Asakere A. and Mansournejad M. 2013. Study of the negative consequences of salt mountain on water quality in Gotvand Oliya Dam Lake and its treatment method. In: 7th National Congress of Civil Engineering, Zahedan, Iran (in Persian).
- Baghdashtaki B. 2010. Investigation of the stability of the left bank walls of the Gotvand Dam reservoir with a special focus on the role of soluble materials, Master Thesis, Tehran, Iran (in Persian), 125p.
- Baghdashtaki B. Khamechiyan M. and Nazari S.M.H. 2010. Stability study of Gachsaran Formation slopes in reservoir of Gotvand Dam with effect of reservoir recharge and dissolution of salty materials. *Engineering Geology*, 4(1):809 – 826.
- Eftekhari M. 2008. Two-dimensional numerical simulation of heat and salinity distribution in dam reservoirs. PhD Thesis in Civil Engineering, Ph.D. Thesis, Tehran, Iran (in Persian), 270p.
- Ghomeshi M. 2016. Lessons to be learned from the fate of Gotvand Dam. *Strategic Studies in Public Policy*. 6 (20) (in Persian).
- Ghomeshi M. and Haghbina. 2013. Salinity analysis in Gotvand Dam and its effect on Karun River. In: 4th National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran (in Persian).
- Gutiérrez F. and Lizaga I. 2016. Sinkholes, collapse structures and large landslides in an active salt dome submerged by a reservoir: The unique case of the Ambal ridge in the Karun River, Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology*, 254: 88-103.
- Haddad A. Naeimi M. and Mohammadi. G. 2017. Environmental impact assessment of dams at construction and operation phases. In: 4th International Conference on Long-Term Behavior and Eco-Friendly Dams, Tehran, Iran (in Persian).
- Hashemi Heidari S.M. 2012. Numerical simulation and experimental investigation of halit karst dissolution in dam reservoirs, Master Thesis, Shahroud, Iran (in Persian), 122 p.
- Hashemi Heidari S.M. Jalili Ghazizadeh M.R. and Mahjoub D. 2012. Numerical study of the effect of salt dissolution coefficient on salinity distribution in reservoirs with salt formation. In: 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan, Iran (in Persian).
- Hosseini Balaei H. and Rahimi Dizaji M. 2011. Extraction of salt in the reservoir wall of the Oliya Gotvand Dam and providing remedial solutions to control wall collapse. In: 8th Mining Engineering Student Conference, Tehran, Iran (in Persian).
- Jalali L. Zarei M. and Gutiérrez F. 2019. Salinization of reservoirs in regions with exposed evaporites. The unique case of Upper Gotvand Dam, Iran. *Water Research*, 157: 587-599.
- Jalali M.R. and Afshar A. 2004. Simulation of dynamic energy production system of hydropower dam reservoirs. In: 1th annual conference of Iran Water Resources Management, Tehran, Iran (in Persian).
- Jeschke A. Vosbeck K. and Dreybrodt W. 2001. Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solution exhibit nonlinear dissolution kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(1):27-34.
- Karimi Vardanjani H. 2010. Karst hydrogeology - Concepts and methods. Erame Shiraz, Shiraz, 414 p.
- Kaufmann G. and Dreybrodt W. 2007. Calcite dissolution kinetics in the system CaCO₃-H₂O-CO₂ at high undersaturation. *Journal of Geochimica ET Cosmochimica Acta*, 71(6): 1398-1410.
- Mohammad Taheri H. 2014. Analysis of field data and simulation of salinity distribution in the reservoir of the dam with salt formations, Master Thesis, Tehran, Iran (in Persian)
- Mahab Ghods Consulting Engineering Company. 2012. Investigation of the effects of Gachsaran Anbal massif in Upper Gotvand dam reservoir on Karun river water quality and salinity of Gotvand dam reservoir.
- Mozaffarizadeh J. and Chit Sazan M. 2007. Investigation of the effect of geological formations on the quality of groundwater resources in Gotvand Plain, First Conference on Environmental and Medical Geology, Tehran (in Persian).
- Mozaffarizadeh J. and Cheet sazan M. 2006. The Impact of Geological Formations on the Water Quality of karun River in Gotvand – Shushtar. In: 14th Iranian Conference on Crystallography and Mineralogy, Birjand, Iran (In Persian).

- Naderkhanloo V. Mazaheri M. and Samani M. V. 2017. Investigation and modeling of Upper Gotvand Dam Challenge (hydrodynamics and reservoir salinity). *Ecology*, 43(2): 251-265(in Persian).
- Plummer L.N. Wigley T.M. and Parkhurst D.L.1978. The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 degrees to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *American Journal of Science*. 278(2):179-216.
- Rasoulimanesh M. 2014. Environmental risk assessment of salinity pollution in dam reservoirs and strategies to deal with it. Master Thesis, Tehran, Iran (in Persian), 125p.
- Rostami Paydar GH. Shahrokhi S. and Hosseinian S. A. 2013. Environmental geological effects of Lali Anbal salt dome in Gotvand dam reservoir on agriculture and aquaculture industry of Gotvand, Aghili plain and Shushtar. In: 1th National Conference on Geography, Environmental Hazards and Sustainable Development, Ahvaz, Iran (In Persian).
- Sayadi A. Khodadadi A. and Partani S. 2009. Environmental impact assessment of Gotvand hydro-electric dam on the Karoon River using ICOLD technique. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 3(6): 118-125.
- Sharifi A.R. and Tajrishi M. 2008. Modeling system dynamics to investigate the effect of upstream development of Karkheh River catchment on hydropower generation of Koran Bozan Dam. Proc. of 2nd National Conference on Hydropower., Tehran, Iran (in Persian).
- Sheikh Khozani Z. and Hosseini Kh. 2012. Multi purpose reservoir modeling with the aim of increasing existing water efficiency in the future using the system dynamics method. In: 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan, Iran (in Persian).
- Svensson U. and Dreybrodt W. 1992. Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO₂-water systems approaching calcite equilibrium. *Journal of Chemical Geology*, 100(1-2) 129-145.
- Taheri M. Ghobadi M.H. Yari M. and Taheri K. 2018. Laboratory simulation of karst media dissolution: an experimental approach and a case study. *Carbonates and Evaporites*, 33(2): 301-314.
- Zahiri A.R. Shafaei Bajestan M. and Dehghani A.A. 2011. Estimation of sediment volume due to muddy flows in Dez Dam reservoir. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 18(1), 143-161 (in Persian).
- Zareei H. and Ajdari A. 2006. Chemical quality of water resources of Abolfars Dam catchment and the impact of Gachsaran Formation on it, 10th Conference of Iranian Geological Society, Tehran, Iran (in Persian).



<http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.129789.1209>



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1401.38.1.4.7>