Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

CC BY

Research Article
Vol. 37, No. 3, Jul.-Agu. 2023, p. 367-382

Management and Simulation of the Latian Multi-purpose Reservoir Dam and Its Performance Evaluation Based on the Operation Policy on Daily Time Scale

M. Babaei[1], M.T. Sattari[2]*

Received: 08-02-2023
Revised: 06-04-2023
Accepted: 09-05-2023
Available Online: 10-05-2023

How to cite this article:
Babaei, M., & Sattari, M. (2023). Management and simulation of the Latian multi-purpose reservoir Dam and its performance evaluation based on the operation policy on daily time scale. *Journal of Water and Soil, 37*(3), 367-382. (In Persian with English abstract).
https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81012.1252

Introduction

Development of reservoirs helps to meet food and energy needs by supplying water for agriculture and hydropower plants. Efficient management of water resources is important and vital to overcome the problems of water leakage and meet agricultural, industrial and drinking needs. Each of these requirements creates limitations in the way the reservoir is operated, which requires accurate information on the changes in the reservoir storage and other influential components during the operation period. In order to manage and plan water resources at country scale, using reservoir simulation models as a suitable tool in simulating processes related to dams, such as the operation of water reservoirs, will be very effective. Reservoir simulation models such as the HEC-ResSim model provide the opportunity to simulate the natural and hydrological processes related to the water resources system and the relationships between the supply and demand sectors by implementing a schematic structure of a real reservoir. Two scenarios of water savings of 20 and 30 percent were used in the current investigation. Additionally, using this method, the objectives of water resource management can be assessed.

Materials and Methods

In the present study, the use of the Latian reservoir in real conditions was simulated using the HEC-ResSim model. The simulation was carried out according to the river's inflow from 1968 to 2018, downstream water needs, energy production capacity by turbines, physical characteristics and reservoir building. The implementation of the HEC-ResSim model is summarized in three steps. The Watershed Setup module is used to introduce the general outline of the watershed. In this module, the shape and geographical location of the basin and related elements such as rivers, reservoirs, hydrometric stations and other projects in it should be specified. The Reservoir Network module is used to introduce the desired reservoir network and to enter the physical characteristics and how to use them. The Simulation module is designed to introduce the simulation period and display the model outputs. In this module, the simulation time and period and the operation pattern should be determined.

Results and Discussion

According to the results obtained from the reservoir simulation model, the average storage capacity of Latian dam for the simulation period was estimated to be 41 million cubic meters, which shows a significant drop of 49% compared to the normal level (83 million cubic meters). Additionally, for the same period, it was estimated that the average discharge was equivalent to 5.4 cubic meters per second and the average inflow to the reservoir of the Latian dam was equal to 5.7 cubic meters per second. This is in contrast to the period's average demand, which for the area downstream of the Latian Dam is 12.1 cubic meters. The findings indicate that the reservoir of the dam frequently, and particularly at the conclusion of the simulation period, is unable to satisfy the needs of the

1 and 2- Ph.D Student and Associate Professor Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir)
DOI: 10.22067/JSW.2023.81012.1252

downstream. Additionally, according to the findings of the current study, the Latian dam power plant's (Kalan) average annual hydro-electric energy production was projected to be 68,000 MWh, and the results show that in accordance with the policy of operating the Latian dam in the majority ofthe years, the Kalan power plant is able to supply the electricity required in the study area. According to the results, the average reservoir volume of Latian dam for the entire period in the first and second scenario was estimated to be 49 and 63 million cubic meters, respectively. Also, by applying the first and second water saving scenarios, the Latian dam reservoir will be able to generate 66,000 and 63,000 MWh of energy annually.

Conclusion

In this study, the functioning and operation of the Latian dam reservoir was used by applying the Hec-ResSim reservoir simulation model. After entering data such as the elevation and length of the dam, surface-volume-elevation curve, evaporation from the surface of the reservoir, elevation and uncontrolled outlet coefficient, dam storage areas, rule curve, were simulated by the model. In the present study, the values of inactive volume and conservation volume of Latian Dam were estimated as 28 and 83 million cubic meters, respectively. The average water release of Latian dam for the first and second 25 years of operation was equal to 6.1 and 3.7 cubic meters per second, respectively, which met 50 and 32% of the downstream demand on average. The results indicate that the success rate of Latian dam in supplying drinking, industry and downstream environment for the period of operation is 42%. Also, 16 years out of 50 years of operation, Kalan hydropower plant has fully met 100% of the needs. On average, the large power plant is able to provide 80% of the energy needs of the study area for the entire simulation period.

Keywords: Energy production, HEC-ResSim model, Reservoir operation, Reservoir storage changes, Water saving

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص.۳۸۲-۳۶۷

مدیریت و شبیه‌سازی مخزن چندمنظوره سد لتیان و ارزیابی عملکرد آن براساس سیاست بهره‌برداری در مقیاس زمانی روزانه

محمد بابایی[۱] - محمد تقی ستاری[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

چکیده

توسعه مخازن به برآورده شدن نیازهای غذایی و انرژی با تامین آب برای کشاورزی و نیروگاه‌های آبی، کمک می‌کند. مدیریت کارآمد مخزن چندمنظوره مستلزم اطلاع دقیق از تغییرات ذخیره مخزن و سایر مولفه‌های تاثیرگذار در بیلان مخزن در طول دوره بهره‌برداری است. شبیه‌سازی مخازن چندمنظوره فرآیندی پویا در راستای ارزیابی مستمر رفتار و عملکرد مخزن در شرایط مختلف پرآبی و کم آبی از یک سو و سیاست‌های بهربرداری از سوی دیگر است. در این مطالعه سیاست بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره سد لتیان در شرایط واقعی با استفاده از مدل HEC-ResSim شبیه‌سازی و ارزیابی گردید. شبیه‌سازی با توجه به دبی ورودی رودخانه از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۸، نیازهای آبی پایین‌دست، ظرفیت تولید انرژی توربین‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و بدنه مخزن انجام گردید. مطابق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، متوسط ذخیره مخزن سد لتیان برای کل دوره معادل ۴۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید که افت محسوس ۴۹ درصدی را نسبت به تراز نرمال ۸۳ میلیون‌متر مکعبی مخزن نشان می‌دهد. براساس داده‌های تاریخی متوسط جریان ورودی به مخزن سد لتیان معادل ۵/۷ متر مکعب برثانیه می‌باشد و متوسط رهاسازی برای کل دوره شبیه‌سازی معادل ۵/۴ متر مکعب برثانیه برآورد شد. این درحالی است که متوسط نیاز پایین دست سد لتیان برای کل دوره ۱۲/۱ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. براین اساس مخزن سد در اکثر مواقع بخصوص در اواخر دوره شبیه‌سازی قادر به تأمین نیازهای پایین‌دست نمی‌باشد. همچنین متوسط سالانه تولید انرژی برق- آبی نیروگاه سد لتیان (کلان) معادل ۶۸۰۰۰ مگاوات‌ساعت برآورد گردید که با توجه به سیاست بهره‌برداری از سد لتیان در اکثر سال‌ها نیروگاه کلان قادر به تامین برق مورد نیاز محدوده مطالعاتی می‌باشد. در مطالعه حاضر به‌منظور مدیریت نتیجه‌محور در راستای حل مشکل کمبود مخزن، از اعمال دو سناریو صرفه‌جویی در مصرف آب به‌ترتیب به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد استفاده گردید. طبق نتایج به دست آمده متوسط ذخیره مخزن سد لتیان برای کل دوره در سناریو اول و دوم به ترتیب معادل ۴۹ و ۶۳ میلیون متر مکعب برآورد گردید. همچنین مخزن سد لتیان طبق این دو سناریو قادر خواهد بود که به ترتیب سالانه معادل ۶۶۰۰۰ و ۶۳۰۰۰ مگاوات‌ساعت تولید انرژی برق- آبی داشته باشد. طبق نتایج با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصارف خانگی تهران، علاوه بر اینکه به جهت تامین انرژی در حد قابل قبول، نیازی به رهاسازی بیشتر آب به نیروگاه کلان، به منظور تولید انرژی لازم نخواهد بود. همچنین کمبود آب در سد لتیان به میزان مناسبی به‌خصوص در سناریو دوم رفع می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات ذخیره مخزن، تولید انرژی برق- آبی، شبیه‌سازی و بهره‌برداری مخزن، صرفه‌جویی در مصرف آب، مدل HEC-ResSim

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2023.81012.1252

مقدمه

به علت تغییر اقلیم، خشکسالی‌های پی‌درپی و افزایش جمعیت به‌ناچار میزان بهره‌برداری از مخازن آب فزونی یافته است. در این میان اطلاع از وضعیت مخازن آبی در دشت‌های مختلف می‌تواند در مدیریت مناسب منابع آب منطقه کمک کند. بررسی مستندات موجود درخصوص سدهای کشور و تغییر ظرفیت ذخیره مخازن در طول سال‌های اخیر نشان می‌دهد که سدهای کشور به لحاظ حجم ذخیره مخزن در برخی از سال‌ها دچار کمبود آب می‌شوند. بنابراین برای کاهش اثرات سوء آن باید راهکار مناسبی را جستجو کرد. مدیریت بهینهٔ بهره‌برداری از مخازن آب سدها که از مهمترین منابع تأمین آب و انرژی می‌باشند، با اهدافی از قبیل تأمین نیاز آبی پایین‌دست، تولید انرژی، مدیریت سیلاب و ملاحظات زیست‌محیطی که عمدتاً غیرهمسو هستند، سر و کار دارد. مخازن سدهای چندمنظوره ممکن است به‌منظور پاسخگویی به چندین هدف از اهداف فوق احداث و بهره‌برداری شوند. مهمترین مسئله در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سدها، تعیین میزان ذخیره و رهاسازی از مخزن در هریک از گام‌های دورهٔ بهره‌برداری جهت تأمین نیازها می باشد (Bazzi *et al.*, 2021; Oli *et al.* 2019; Saab *et al.* 2022; Sattari *et al.* 2013).

مدل‌های مرسوم مهندسی سیستم‌ها که در مخازن به کار گرفته شده‌اند، مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب بهینه‌سازی و شبیه سازی می‌باشند (Hatamkhani *et al.*, 2021). هدف مدل‌های شبیه-سازی، بهبود بخشیدن به طرح‌ها و سیاست‌های بهره‌برداری است. این مدل‌ها با توجه به مقدار متغیرهایی که توسط کاربر مشخص می‌شود، به پیش‌بینی رفتار سیستم می‌پردازند. اعتبار روش‌های شبیه‌سازی در توانایی آنها برای حل مدل‌هایی از تحلیل سیستم‌های منابع آب است که دارای روابط و قیدهای غیرخطی هستند در حالی که روش‌های بهینه سازی به ندرت توانایی رسیدگی به آن‌ها را دارند (Saab *et al.*, 2022).

مدل‌های ریاضی این فرصت را فراهم می‌کنند که با پیاده‌سازی ساختار شماتیکی از یک حوضه واقعی، فرآیندهای طبیعی و هیدرولوژیکی مرتبط با سیستم منابع آب و روابط حاکم بین بخش‌های عرضه و تقاضا شبیه‌سازی گردد و نحوه حصول به اهداف مدیریت منابع آب را با این رویکرد می‌توان ارزیابی نمود. همچنین در سال‌های اخیر مدل‌ها و بسته‌های نرم‌افزاری متعددی در راستای شبیه‌سازی سیستم های منابع آب توسعه یافته‌اند. از مدل‌های مطرح در شبیه‌سازی مخازن می‌توان به مدل‌های AQUQQTOOL، MADISM، MIKE BASIN، WEAP، RIBASIM و HEC-ResSim اشاره کرد. اکثر مدل‌های هیدرولوژیکی قابلیت‌های محدودی برای نشان دادن رفتار واقعی مخازن دارند، زیرا اپراتورها اغلب به صورت دستی و بر اساس ترکیبی از دانش محلی از سیستم، منحنی های فرمان و شرایط آب و هوایی تصمیم می‌گیرند (Munir *et al.*, 2022; Uysal *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2016; Yoon *et al.*, 2016). مطالعات بسیاری در زمینه بکارگیری این مدل‌ها برای تخصیص منابع آب انجام گرفته است که در ادامه به برخی مطالعات استفاده شده از مدل HEC-ResSim که در این پژوهش از آن بهره گرفته، اشاره می‌شود.

بابازاده و همکاران (Babazadeh *et al.*, 2007) عملکرد مخزن سد جیرفت در تأمین آب مورد نیاز با استفاده از مدل Hec-ResSim را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که این مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم می‌باشد. در این راستا، سد جیرفت بر اساس سناریوهای مختلف در شرایط حاضر، با توجه به رسوب دوره‌های مختلف، گسترش پروژه و افزایش بهره‌وری شبیه‌سازی شد. مدل کمبود جدی و شکست قابل توجهی را در ۲۵ درصد از دوره زمانی بهره‌برداری نشان داد. اما نتایج نشان داد که با افزایش بهره‌وری آبیاری از ۳۰ درصد کنونی به ۵۰ درصد، شکست در سیستم ۱۲ درصد کاهش و انعطاف پذیری به ۱۷ درصد افزایش می‌یابد.

مودینی و همکاران (Modini *et al.*, 2010) از مدل Hec-ResSim به منظور شبیه‌سازی سیلاب رودخانه کلمبیا تا سال ۲۰۲۴ استفاده کردند. نتایج نشان داد که این نرم‌افزار به خوبی قادر به شبیه‌سازی تغییرات ظرفیت ذخیره مخزن می‌باشد و می‌تواند در مطالعات ارزیابی کنترل سیلاب بعد و قبل از ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گیرد.

کوچرانه و همکاران (Cochrane *et al.*, 2010) در مطالعه‌ای چگونگی توسعه چندین سد و بهره‌برداری از آن‌ها در انشعابات سی‌سان[1] و سرپک[2] که می‌تواند در جریان شاخه اصلی مکونگ (واقع در کشور ویتنام) تأثیر بگذارد را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، بهره برداری از سد در امتداد انشعابات سی‌سان و پرپک با HEC-HMS (مدل‌سازی سیستم هیدرولوژیکی) و HEC-ResSim (شبیه‌سازی مخزن) مدل شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدیریت هماهنگ سدها تحت یک مجموعه وسیع‌تری از قوانین بهره‌برداری می‌تواند راه‌حلی برای به حداکثر رساندن بازدهی کل اقتصادی پایین دست داشته باشد. ایشان به این نتیجه رسیدند که این مدل برای شبیه-سازی سیستم تک مخزنی و چند منظوره قابل اجراست و ابزاری مؤثر و قدرتمند برای تصمیم‌گیری در زمان واقعی و به منظور استفاده در مطالعات برنامه‌ریزی بسیار کاربردی است.

1- Se San
2- Sre Pok

عمادی و خادمی (Emadi and Khademi, 2011) برای سد مخزنی درودزن بـا استفاده از مدل آبدهی چهار سیاست بهره‌برداری با هدف تامین صددرصد نیاز شرب و صنعت و ۸۰، ۷۰، ۶۰ و۵۰ درصد نیاز کشاورزی تعریف و مجموع مربعات کمبود مربوط به هر یک از آن‌ها را محاسبه کردند. ایشان نتیجه گرفتند فقط سیاست‌های اول و دوم به‌ترتیب با مجموع مربعات کمبود ۹۰۵/۰۲، ۲۰۳۶/۳۱ که کمتر از مجموع مربعات کمبود در مدل SOP می‌باشند، قابل پذیرش هستند. در سیاست‌های اول و دوم به ترتیب ۷۳/۲۶ و ۳۹/۸۴ درصد بهبود در بهره‌برداری نسبت به مدل SOP مشاهده شده است. سیاست‌های سوم و چهارم با مجموع مربعات کمبود بیشتری نسبت به مدل SOP غیر قابل اجرا می‌باشند.

در مطالعه‌ای، مدل HEC-ResSim برای شبیه‌سازی مخزن به منظور بررسی تأثیر تغییرات آب و هوا بر تولید برق در مخزن مانگلاپاکستان استفاده شد. از آنجایی که مخزن مانگلا در سال ۲۰۰۹ به میزان ۱۲ متر افزایش یافته بود، این مدل برای دو سناریو تنظیم شد، پیش از بالا رفتن و پس از بالا رفتن. بر اساس شبیه‌سازی‌ها، به این نتیجه رسیدند که در آینده افزایش تولید سالانه نیروگاه‌های آبی برای سناریوی پیش از بالا رفتن ۱۳ تا ۱۵/۳ درصد و برای سناریوی پس از بالا رفتن ۱۶/۶ تا ۲۰/۴ درصد افزایش خواهد داشت (Mahmood, 2013).

تقیان (Taghian, 2016) به منظور تعیین ظرفیت بهینه مخزن سد برای تامین نیازهای مختلف از یک مدل شبیه‌سازی مجهز به فرآیند برنامه‌ریزی خطی شبکه جریان استفاده کرد. با پیاده‌سازی این مدل در سیستم منابع آب رودخانه خمین، مطابق نتایج به دست آمده ظرفیت بهینه سد مخزنی نیشهر معادل با ۴/۶ میلیون متر مکعب برآورد گردید که در این حالت قادر به حفظ اعتمادپذیری ۸۵ درصد در تامین نیازها است. نتایج حاکی از حساسیت ابعاد حجم مخزن نسبت بـه انتخاب اعتمادپذیری دارد که میزان این حساسیت ناشی از شدت و طول دوره های کمبود آب است.

در مطالعه دیگری مونیر و همکاران (Munir *et al.*, 2022) به منظور بررسی و پیش‌بینی ظرفیت ذخیره مخزن سد تاربلا از مدل شبیه سازی HEC-ResSim استفاده کردند. همچنین این مطالعه را با در نظر گرفتن تاثیر رسوب بر بهره‌برداری و کاهش ظرفیت ذخیره مخزن سد تاربلا انجام دادند. پس از واسنجی و اعتبارسنجی، این مدل برای پیش‌بینی اثرات بهره‌برداری مخزن در آینده به صورت ۵ ساله از سال ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۵ برای تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی، رهاسازی‌های آبیاری و تولید انرژی استفاده شد. مطابق با نتایج به دست آمده پیش‌بینی گردید که با کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن به دلیل رسوب‌گذاری، رهاسازی آبیاری از April تا September به میزان ۷ درصد افزایش و از October تا March به میزان ۵۰ درصد کاهش یابد همچنین تولید برق به ترتیب به میزان ۴ درصد افزایش و به میزان ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مخزن سد تاربلا بطور کل میانگین تولید انرژی سالانه ۶/۵ درصد کاهش می‌یابد.

چندل و همکاران (Chandel *et al.*, 2022) در مطالعه‌ای با هدف مدیریت ارتفاع مخزن و مدیریت حجم ذخیره سازی مخزن از مدل شبیه‌سازی HEC-ResSim استفاده کردند. در این مطالعه از داده‌های تغییرات ارتفاع سطح آب و دبی روزانه ورودی به مخزن از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ به عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. علاوه بر این، داده‌های هندسی و هیدرولیکی از سد و مخزن در فرآیند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این مطالعه ارتفاع سطح آب برای حجم مرده مخزن معادل ۳۸۵/۴ متر درنظر گرفته شد. به‌طوری که ارتفاع سطح آب برای حجم مفید مخزن در حالت بیشینه و کمینه به ترتیب معادل ۳۸۹/۹۷ و ۴۲۱/۳۸ متر اعمال گردید. همچنین ارتفاع مخزن به منظور کنترل سیلاب معادل ۴۳۴/۳۴ متر قرار داده شد. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ضریب تعیین برای مولفه‌های موردنظر مانند ارتفاع مخزن و ذخیره‌سازی مخزن از طریق نمودار رگرسیون برآورد گردید که نتایج حاکی از دقت ۹۵ درصدی مدل می باشد. همچنین، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر دو مولفه‌شبیه‌سازی شده محاسبه شد و در محدوده قابل قبولی برآورد گردید.

با توجه به قابلیت‌های مدل شبیه‌سازی HEC-ResSim و با توجه به نیازهای موجود پایین‌دست سد لتیان و ضرورت مدیریت صحیح منابع آب نحوه بهره‌برداری از مخزن سد لتیان با استفاده از مدل HEC-ResSim شبیه‌سازی و عملکرد مخزن این سد مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین ضمن شبیه‌سازی منابع و مصارف آب در پایین دست سد لتیان، به بررسی تغییرات ظرفیت ذخیره مخزن، تغییرات ارتفاع سطح آب، تغییرات تولید انرژی و رهاسازی آب پرداخته می‌شود. از طرفی اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصارف آب و تغییر مولفه‌های مخزن سد لتیان تحت سناریوهای صرفه‌جویی و مقایسه آن با شرایط واقعی از جمله اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

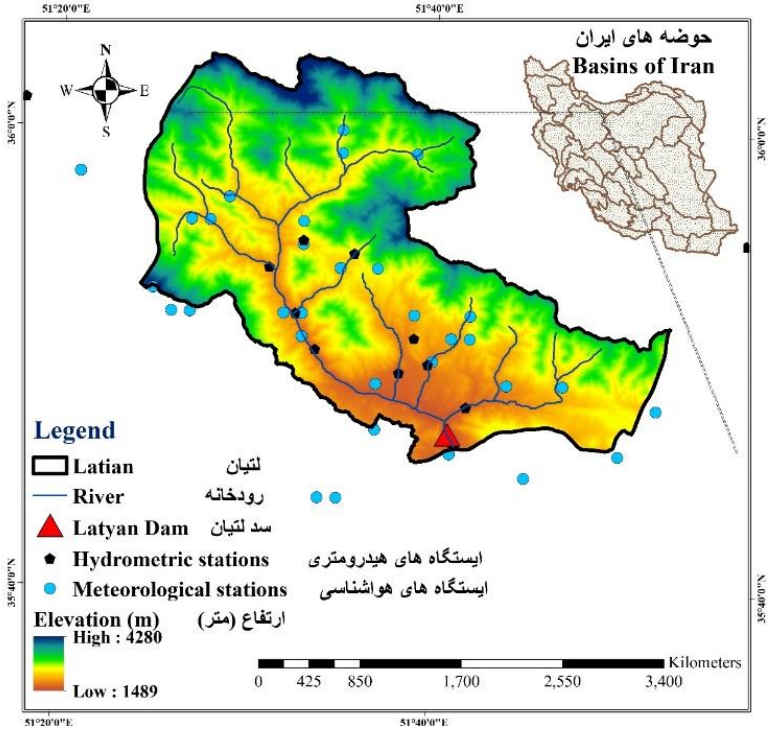
حوضه آبریز جاجرود تا محل سد لتیان بین طول‌های جغرافیایی ′۲۳ °۵۱ تـا ′۵۱ °۵۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۴۵ °۳۵ تا ′۵۰ °۳۶ شمالی واقع شده است. همچنین در پایین دست سد لتیان شهرستان جاجرود واقع شده است که طولی در حدود ۲۲ کیلومتر را شامل می‌شود. تراز ارتفاعی کف رودخانه در بالادست ۱۵۰۶ متر و در پایین دست ۱۲۵۹ متر نسبت به سطح آب‌های آزاد می‌باشد. مطالعات سد لتیان در سال ۱۳۳۸ آغاز گردید و در سال ۱۳۴۲ عملیات احداث آن شروع و در سال ۱۳۴۶ به بهره برداری رسید. این سد بر روی رودخانه جاجرود با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۶۹۸۰۰ کیلومتر مربع و با

متوسط جریان آب سالانه به میزان ۳۵۰ میلیون متر مکعب در استان تهران و در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال شرقی تهران و ۵ کیلومتری بخش جاجرود قرار دارد. نیروگاه کلان در فاصله ۲۰ کیلومتری در منطقه کلان، بالادست سد لتیان احداث گردیده است (IWRMC, 2013). طبق گزارشات شرکت مدیریت منابع آب ایران (IWRMC, 2015) از جمله اهداف احداث سد لتیان می‌توان به تأمین آب شرب تهران به میزان ۲۹۰ میلیون متر مکعب از طریق تونل ۹/۵ کیلومتری به تصفیه خانه تهرانپارس، تامین آب زراعی دشت ورامین به میزان متوسط ۱۶۰ میلیون متر مکعب و تولید متوسط سالانه ۷۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی برق – آبی جهت شبکه سراسری اشاره کرد. طبق برنامه اولیه احداث سد، یک‌سوم حجم قابل تنظیم سالانه سد (۸۰ میلیون‌متر مکعب در سال) به تهران و بقیه به دشت ورامین اختصاص داده شده بود. اما به دلیل افزایش بی رویه نیاز تهران ناگزیر سالانه از سهمیه ورامین کاسته و به سهمیه تهران افزوده شد به نحوی که در سنوات اخیر میزان آب انتقالی به تهران به بیش از سه برابر سهمیه اولیه رسیده است. در شکل ۱ موقعیت سد لتیان در حوضه آبریز جاجرود مشاهده می‌گردد.

مدل شبیه‌سازی HEC-ResSim

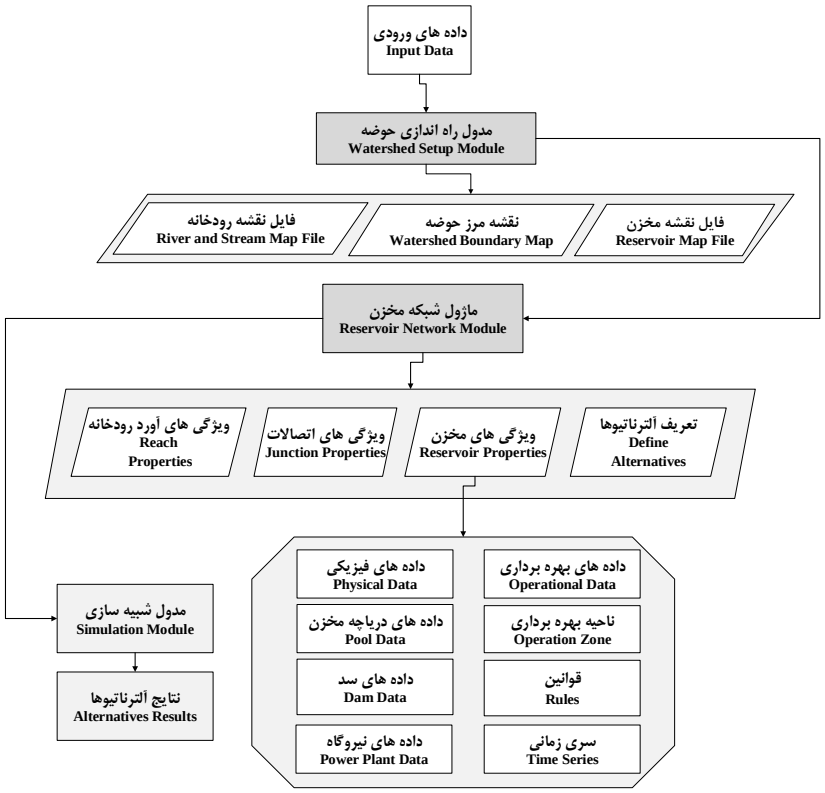
در این پژوهش از مدل HEC-ResSim که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC)، مهندسین ارتش ایالات متحده (USACOE) برای کمک به کارشناسان آب در پیش‌بینی رفتار مخزن با تغییرات بهره‌برداری خاص ایجاد شده است، استفاده گردید. مدل HEC-ResSim قادر به شبیه‌سازی عملکرد مخزن و الگوهای مختلف بهره برداری از آن می‌باشد. همچنین یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی بهره‌برداری مخزن و فرآیندهای مختلف در کاربردهای برق آبی و آبیاری است. از خروجی‌های این مدل می‌توان در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، تخصیص منابع آبی، طراحی مخازن سدها، بررسی مسائل زیست محیطی، برنامه‌ریزی توان تولید انرژی برق–آبی، کنترل سیلاب و ... استفاده نمود.

شکل ۲ نشان‌دهنده مدل مفهومی مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود اجرای مدل HEC-ResSim در سه مرحله خلاصه می‌شود. مدول Watershed Setup به منظور معرفی شمای کلی حوضه به کار می‌رود. در این مدول می‌بایست شکل و موقعیت جغرافیایی حوضه و عناصر وابسته از قبیل رودخانه‌ها، مخازن، ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سایر پروژه‌های موجود در آن مشخص گردد. مدول Reservoir Network به منظور معرفی شبکه مخازن مورد نظر و ورود مشخصات فیزیکی و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها به کار می‌رود. مدول Simulation به منظور معرفی دوره شبیه‌سازی و نمایش خروجی‌های مدل طراحی گردیده است. در این مدول می‌بایست زمان و دوره شبیه سازی و الگوی بهره‌برداری موردنظر تعیین گردد.



شکل ۱- نقشه موقعیت سد لتیان

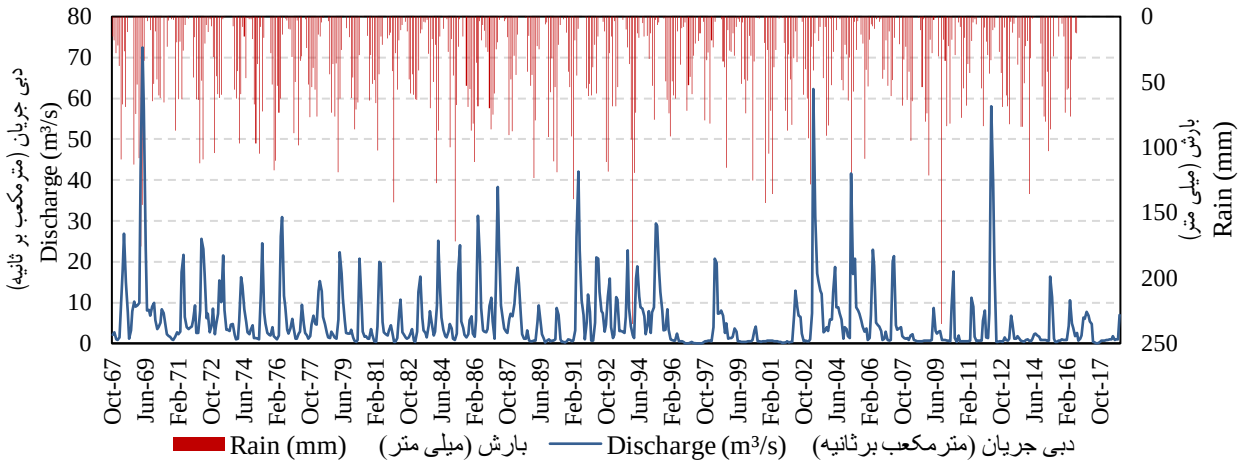
Figure 1- Location of Latian Dam



شکل ۲- مراحل شبیه‌سازی مدل HEC-ResSim

Figure 2- Flow chart for the HEC-ResSim Simulation

در شکل ۳ تغییرات توام دبی و بارندگی به صورت ماهانه برای ایستگاه هیدرومتری و هواشناسی لتیان قرار داده شده است. بررسی درصد آورد ماهانه ایستگاه هیدرومتری رودخانه جاجرود گویای آن است که در ۳ ماه میلادی March، April و May معادل ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت تقریبا ۶۳ درصد از کل جریان سالانه رخ می‌دهد و در ۴ ماه میلادی July، August، September و October معادل ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر کمتر از ۸ درصد از کل جریان سالانه مورد انتظار است. طبق بررسی داده‌های بارندگی ایستگاه هواشناسی لتیان متوسط بارندگی ماهانه برای کل دوره آماری ۳۴/۹ میلی‌متر و بیشترین میزان بارندگی نیز برابر ۲۳۵ میلی‌متر محاسبه گردید.



شکل ۳- روند تغییرات دبی مشاهداتی و بارندگی برای دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۸

Figure 3- The trend of changes in observed discharge and rainfall for the simulation period from 1968 to 2018

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - E_t - O_t \quad (۱)$$

معادله حاکم مدل HEC-ResSim را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

که در آن S_{t+1} ذخیره در روز t+1، S_t ذخیره در روز t، I_t ورودی به مخزن، E_t تبخیر از دریاچه سد و O_t خروجی از مخزن می‌باشد. حداکثر افزایش سطح مخزن به ظرفیت تخلیه سرریز در ارتفاعات مختلف مخزن بستگی دارد. میزان جریان خروجی از سرریز سد در مدل شبیه‌سازی با معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q = C.B.a.\sqrt{2}.g.Do \quad (۲)$$

که در آن Q دبی (m3/s)، C ضریب سرریز، B عرض سرریز، a دریچه سرریز، g شتاب و Do عمق آب روی سرریز است. همچنین از رابطه (۳) برای تعیین میزان رهاسازی از تونل برق به منظور تولید برق استفاده می‌شود (Munir *et al.*, 2022).

$$Q = 0.102 \times \left(\frac{E_n}{\eta \times h \times t}\right) \quad (۳)$$

که در آن E_n تولید انرژی (MWh)، η بازده، h ارتفاع (m)، t زمان (h) و Q آزادسازی مخزن (m3/s) است. در نهایت ذخیره‌سازی پس از خروجی از طریق نشت، تبخیر و تعرق و رهاسازی از سرریزها، تونل‌های برق و آبیاری، توسط مدل HEC-ResSim از معادله زیر برآورد می گردد.

$$S_2 = S_1 - E_{VAP} + (INFLOW - OUTFLOW).CQS \quad (۴)$$

که در آن E_{VAP} تبخیر در طول بازه زمانی، OUTFLOW مجموع خروجی از طریق رهاسازی و نشت، CQS تخلیه حجم مفید مخزن است (Munir *et al.*, 2022).

به علت ظرفیت تنظیم محدود سد لتیان (متوسط سالانه میزان آب سرریز شده از سد بیش از چهل درصد متوسط سالانه ورودی به مخزن می‌باشد) سهم نسبتاً کمی از آورد سالانه رودخانه را می‌توان کنترل نمود و بخش قابل توجهی از آن سالانه بصورت سرریزهای غیر قابل تنظیم به پائین دست منتقل می‌گردد. اما با گذشت زمان با کاهش میزان ورودی به مخزن سد لتیان، میزان حجم ذخیره‌سازی شده در مخزن نیز کاهش یافته و در بسیاری از سال‌ها علاوه بر اینکه ظرفیت ذخیره مخزن تکمیل نمی‌شود از طرفی سرریز هم از سد اتفاق نمی‌افتد.

داده‌های تحقیق

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در مطالعه‌حاضر از متوسط گیری مقادیر ایستگاه‌های هواشناسی داخل حوضه استخراج شده است. همچنین با توجه به اینکه ایستگاه هیدرومتری لتیان روی رودخانه جاجرود، تنها ایستگاهی بود که داده‌های کامل برای کل دوره شبیه سازی در آن ثبت شده بود. بنابرین از داده‌های این ایستگاه به عنوان ورودی به مخزن استفاده گردید. همچنین سایر اطلاعات ورودی از جمله مشخصات مخزن و نیروگاه در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ و در شکل-های ۴ و ۵ سایر داده‌های ورودی مورد نیاز مدل شبیه‌سازی ارائه گردیده است. در جدول ۱ مشخصات هندسی سازه سد لتیان نشان شده است. این مشخصات شامل ارتفاع سد، طول سد، عمق آب در پایین دست سد، ضریب سرریز و طول سرریز می‌باشد (IWRMC, 2015).

همچنین در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات نواحی ذخیره سد لتیان و مشخصات ظرفیت تولیدی و منحنی فرمان نیروگاه کلان ارائه شده است. طبق جدول ۲ ارتفاع ۵۸ متر به عنوان حجم مرده سد، ارتفاع ۸۰ متر به عنوان کنترل سیلاب و بین آن‌ها به عنوان حجم مفید مخزن در نظر گرفته می‌شود (IWRMC, 2015).

جدول ۱- مشخصات هندسی سازه سد لتیان

Table 1- Geometrical characteristics of the Latian Dam structure

ارتفاع از بستر رودخانه (متر) Elevation at top of Dam (m)	**80**
طول تاج سد (متر) Length at top of Dam (m)	**450**
ارتفاع آب در پایین دست سد (متر) Tailwater Elevation (m)	**21**
ارتفاع خروجی (متر) Outlet Elevation (m)	**70**
ضریب سرریز Weir Coef.	**0.67**
طول (متر) Length (m)	**140**

جدول ۲- مشخصات نواحی ذخیره سد

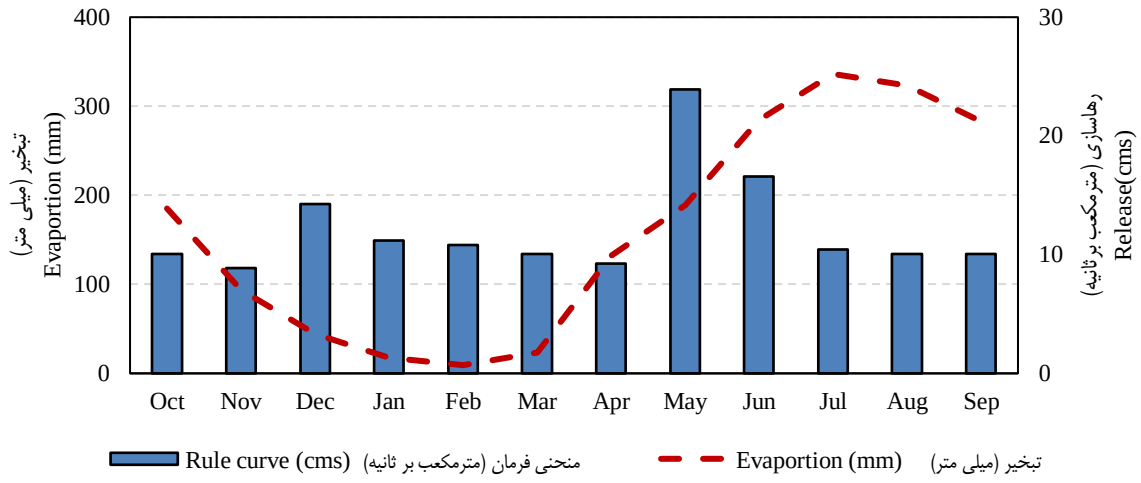
Table 2- Characteristics of Reservoir storage Zones

ناحیه‌های سد Reservoir Zones			
حجم مرده (ذخیره رسوب) Inactive (Sediment Storage)	حجم مفید (تامین آب) Conservation (Water Supply)		کنترل سیلاب Flood Control
	تاریخ Date	ارتفاع (متر) Top Elevation(m)	
58			**80**
-	Jan	62	-
-	Apr	70	-
-	Sep	70	-
-	Dec	62	-

جدول ۳- مشخصات ظرفیت تولیدی و منحنی فرمان نیروگاه کلان

Table 3- Specifications of production capacity and rule curve of Kalan power plant

خروجی کنترل شده Controlled Outlet		نیروگاه Power Plant		
ارتفاع (متر) Elevation (m)	حداکثر ظرفیت (مترمکعب بر ثانیه) Max Capacity (cms)	ظرفیت نیروگاه (مگاوات) Power Plant Capacity (MW)	تاثیر توان (درصد) Power Pl. Eff. (%)	عامل اضافه بار Overload Factor
58	50	45	65	1.1
62	135	-	-	-
65	180	-	-	-
68	210	-	-	-
70	250	-	-	-



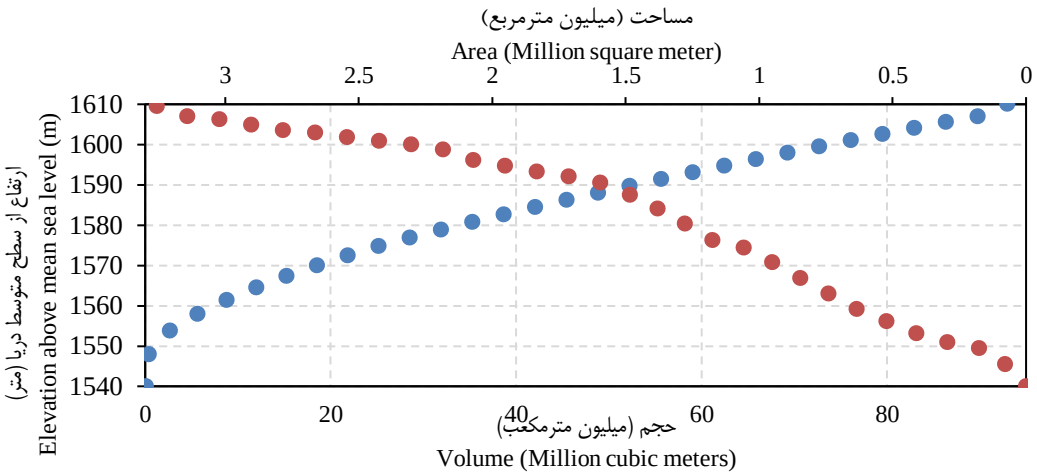
شکل ٤- منحنی فرمان سد و متوسط تبخیر از تشت ایستگاه هواشناسی برای کل دوره زمانی ۵۰ سال

Figure 4- Rule curve of Dam and average monthly evaporation of meteorological station for a period of 50 years

طبق بررسی مطالعات انجام شده قوانین بهره‌برداری از مخزن (منحنی فرمان سد) طبق نیاز پایین دست (شرب، کشاورزی، صنعت، محیط زیست) در هر ماه به همراه متوسط ماهانه تبخیر در شکل ۴ قرار داده شده است. منحنی سطح–حجم–ارتفاع مخزن سد لتیان نیز به عنوان یکی از ورودی‌های مدل HEC-ResSim، در شکل ۵ مشخص نشان داده شده است (Behrangi *et al.*, 2014).

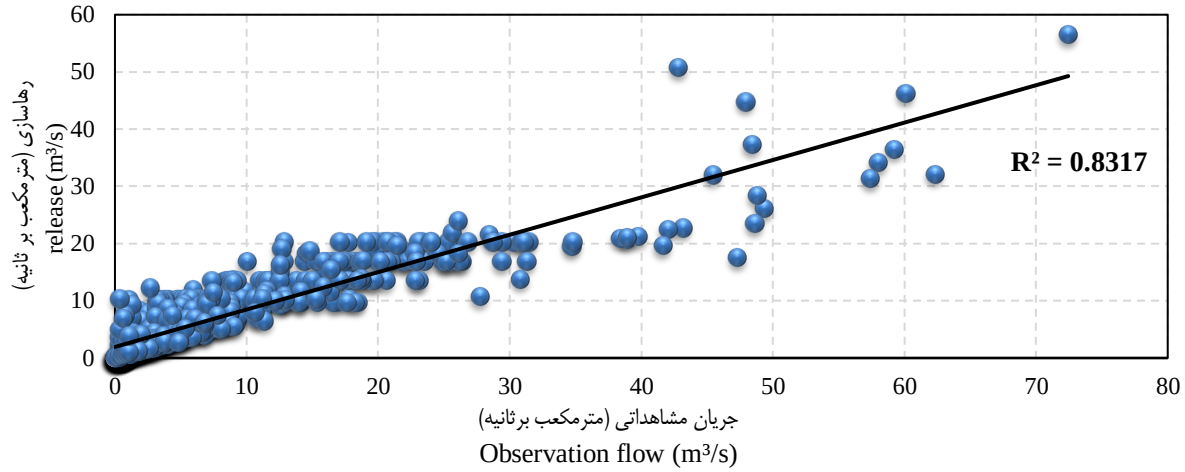
نتایج و بحث

دوره آماری از سال ۱۹۶۸ تا سال ۲۰۱۸ به عنوان دوره شبیه‌سازی این مطالعه انتخاب شده است. مدل HEC-ResSim برای دوره زمانی مورد نظر با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه هیدرومتری رودخانه جاجرود اجرا گردید. به منظور کنترل و اطمینان به صحت عملکرد مدل شبیه‌سازی از داده‌های مشاهداتی جریان رودخانه و مقادیر رهاسازی شده استفاده گردید (شکل ۶). کنترل مدل با در نظر گرفتن ضریب تبیین برای کل دوره شبیه‌سازی انجام گردید که معادل ۰/۸۳ برآورد شد.



شکل ۵- منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد لتیان

Figure 5- The volume, surface area, and elevation curves of the Latian Reservoir



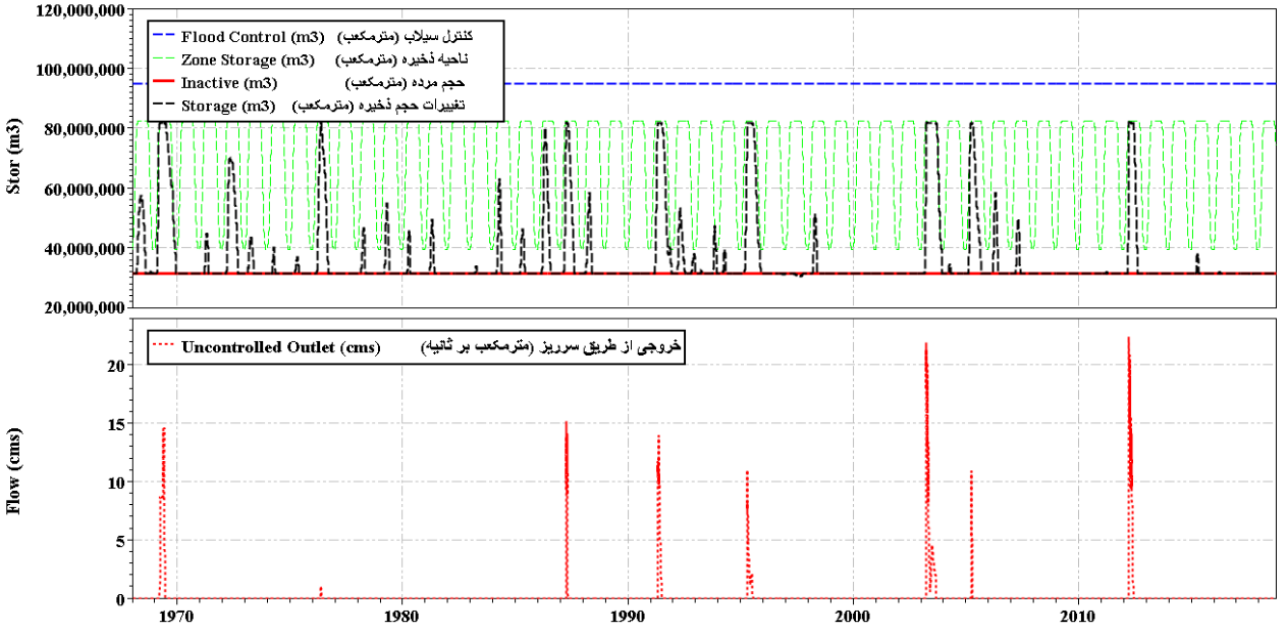
شکل ٦- نمودار پراکنش جریان مشاهده‌ای و رهاسازی برآورد شده توسط مدل HEC-ResSim

Fig. 6- Scatter plot of observation flow and release estimated by HEC-ResSim model

بعد از اجرای موفق مدل شبیه‌سازی مخزن نتایج به دست آمده از مدل برای مولفه‌های مختلف ارائه می‌گردد. شکل ۷ تغییرات ذخیره مخزن و مقادیر سرریز برای دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۶۸ تا سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. طبق این شکل بیشترین مقدار ذخیره مخزن در کل دوره شبیه سازی تقریبا معادل ۸۳ میلیون متر مکعب می باشد. همچنین کمترین میزان ذخیره مخزن تقریبا معادل ۳۲ میلیون متر مکعب می باشد. این مقدار حدبالای حجم مرده سد (۲۸ میلیون‌متر مکعب) می‌باشد. طبق بررسی گزارشات و مطالعات انجام شده حجم قابل تنظیم سالانه سد لتیان معادل ۸۰ میلیون متر مکعب گزارش شده است. در مطالعه حاضر مقادیر حجم مرده و حجم مفید سد لتیان به ترتیب معادل ۲۸ و ۸۳ میلیون‌متر مکعب برآورد گردید که نشان‌دهنده همگرایی نتایج مدل با سایر مطالعات انجام شده می‌باشد. مطابق با شکل ۷ سطح آب در مخزن در مواقعی بخصوص در اواخر دوره شبیه سازی حتی پایین‌تر از تراز قابل بهره‌برداری (۶۰ متر) می‌رسد که ناشی از کاهش آورد رودخانه جاجرود می‌باشد.

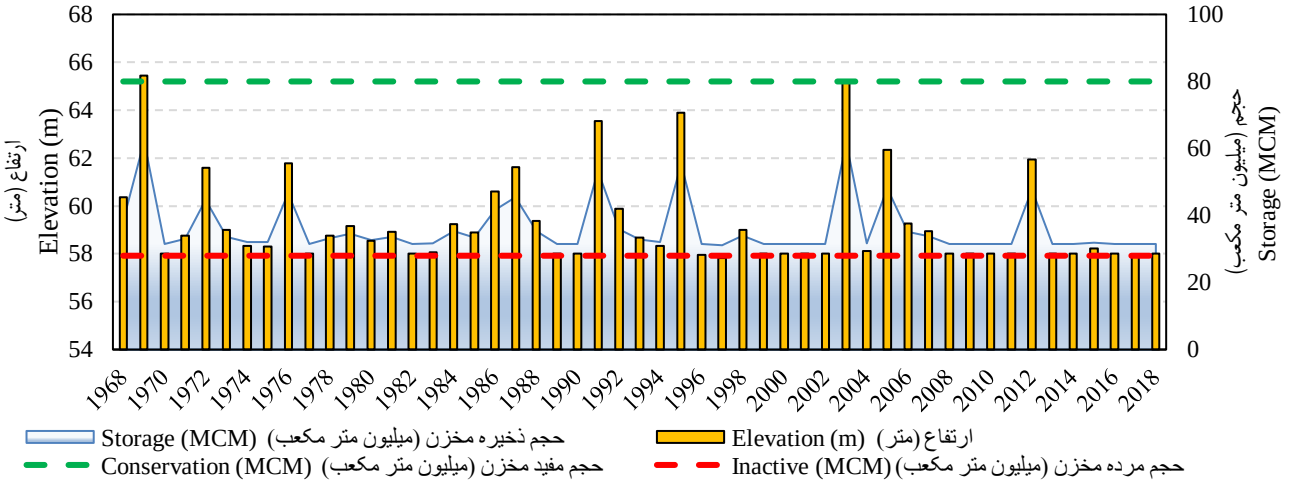
میانگین سالانه حجم ذخیره مخزن از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۸ در شکل ۸ قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان حجم ذخیره مخزن در سال ۲۰۰۳ معادل ۶۲/۷ میلیون متر مکعب برآورد شده است. همچنین متوسط ارتفاع آب در مخزن نیز در این سال به میزان ۶۵/۲ متر محاسبه شد که بیشتر از سایر سال‌ها می‌باشد. ملاحظه می‌شود به طور متوسط ۴۵ درصد از حجم مخزن خالی از آب است. که مستلزم توجه به مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح و ارائه راهکارهای مناسب می‌باشد.

میانگین حجم مخزن سد لتیان در مطالعه مهین‌خواه و همکاران (Mihankhah *et al.*, 2012) از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۹ با استفاده از مدل بهینه‌سازی تصادفی ۴۸ میلیون متر مکعب برآورد شده بود که این میزان در مطالعه حاضر برای کل دوره ۵۰ ساله معادل ۴۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید. از طرفی مدل مقدار آب سرریز شده را هم در طول دوره شبیه‌سازی محاسبه می‌کند. مطابق با نتایج به دست آمده از مدل در شکل ۸ ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار سرریز اتفاق افتاده در کل دوره شبیه‌سازی معادل ۲۵ متر مکعب بر ثانیه می باشد. همانطور که مشخص است سرریز از مخزن در مواقعی اتفاق افتاده است که ظرفیت حجم مفید مخزن به صورت کامل پر شده باشد که نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل نیز می‌باشد.



شکل ۷- نمودار مقایسه حجم مخزن شبیه‌سازی شده و سرریز از مخزن برای دوره شبیه‌سازی

Figure 7- The comparison chart of the volume of the simulated reservoir and the uncontrolled Outlet from the reservoir for the simulation period



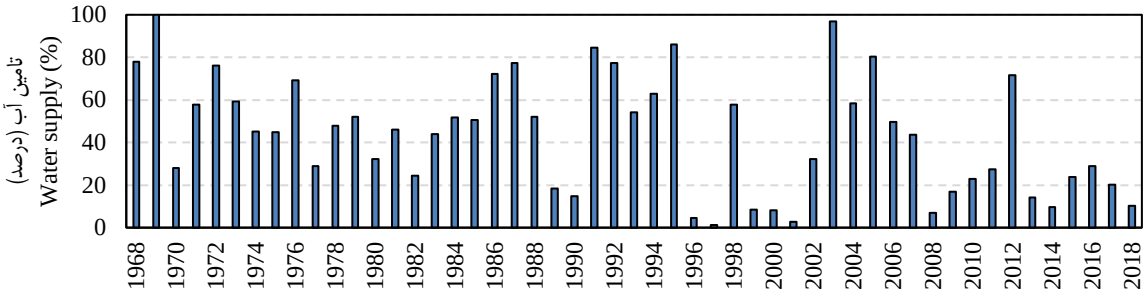
شکل ۸- نمودار متوسط سالانه حجم مخزن شبیه‌سازی شده و ارتفاع سطح آب

Figure 8- Annual average simulated reservoir volume and water level height

شکل ۹ درصد رسیدن به هدف در تامین آب مورد نیاز توسط سد لتیان را برای سال‌های مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در سال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ سد لتیان توانسته به ترتیب ۱۰۰ و ۹۷ درصد نیاز پایین دست را تامین کند. میزان موفقیت سد لتیان در تامین نیاز شرب، صنعت

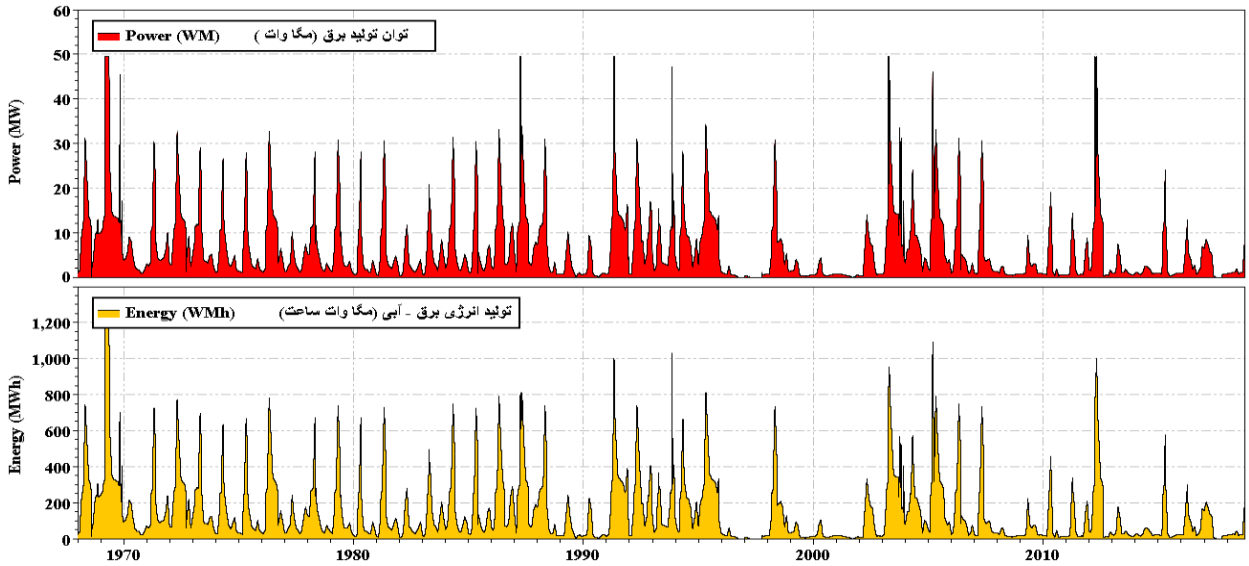
و محیط زیست پایین دست در کل دوره بهره‌برداری ۴۲ درصد می باشد. همچنین در سال ۱۹۹۷ با توجه به اینکه متوسط دبی ورودی به مخزن ۰/۲ متر مکعب برثانیه بوده، سد لتیان فقط ۱/۳ درصد از نیاز آب پایین دست را تامین کرده است. مطابق نتایج حاصل از اجرای مدل میانگین آب رهاسازی سد لتیان برای ۲۵ سال اول و دوم بهره‌برداری به ترتیب معادل ۶/۱ و ۳/۷ متر مکعب برثانیه بوده که به‌طور متوسط ۵۰ و ۳۲ درصد از نیاز پایین دست برآورده شده است. این درحالی است در اواخر دوره شبیه‌سازی به خصوص از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸ سد لتیان فقط قادر به تأمین ۲۴ درصد نیاز پایین دست می‌باشد.

میزان تولید انرژی برق-آبی از طریق توربین و ژنراتور سد بستگی به میزان آب رهاسازی شده به نیروگاه دارد. طبق شکل ۱۰ که شامل نمودار توان تولید و تولید انرژی برق-آبی می‌باشد. ملاحظه می‌شود هر چقدر میزان رهاسازی بیشتری صورت بگیرد میزان برق تولید شده افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به مشخصات ظرفیت تولیدی برق سد لتیان (جدول ۳)، مقدار توان تولید برق در سد لتیان ۴۵ مگا وات می‌باشد که با احتساب ۱/۱ درصد (Overload Factor) حداکثر توان تولید برق در نیروگاه کلان برای هر گام زمانی معادل ۴۹/۵ مگاوات می‌شود. مطابق نتایج به دست آمده در شکل ۱۰ ملاحظه می شود که در طول دوره شبیه‌سازی بیشترین و کمترین توان تولیدی برق برای هرگام زمانی به ترتیب معادل ۴۹/۵ و ۷/۷۵ برآورد گردید که نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل شبیه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد.



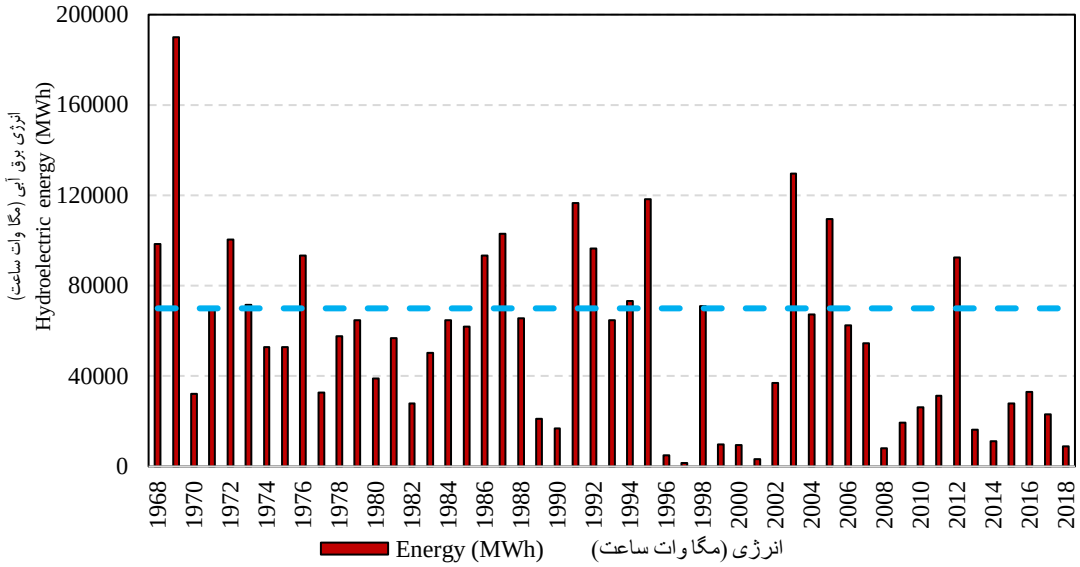
شکل ۹- درصد تامین آب مورد نیاز پایین دست سد لتیان با مدل HEC-ResSim

Figure 9- Percentage of required water supply downstream of Latian dam with HEC-ResSim model



شکل ۱۰- نمودار مقایسه توان تولید برق و تولید انرژی برق- آبی شبیه‌سازی شده از مخزن سد لتیان برای دوره شبیه‌سازی

Figure 10- The comparison chart of the production power and the simulated water-electric energy production from the Latian reservoir for the simulation period



شکل ۱۱- متوسط سالانه انرژی برق- آبی تولید شده سد لتیان با مدل شبیه‌سازی

Figure 11- Average annual energy production from Latian dam with simulation model

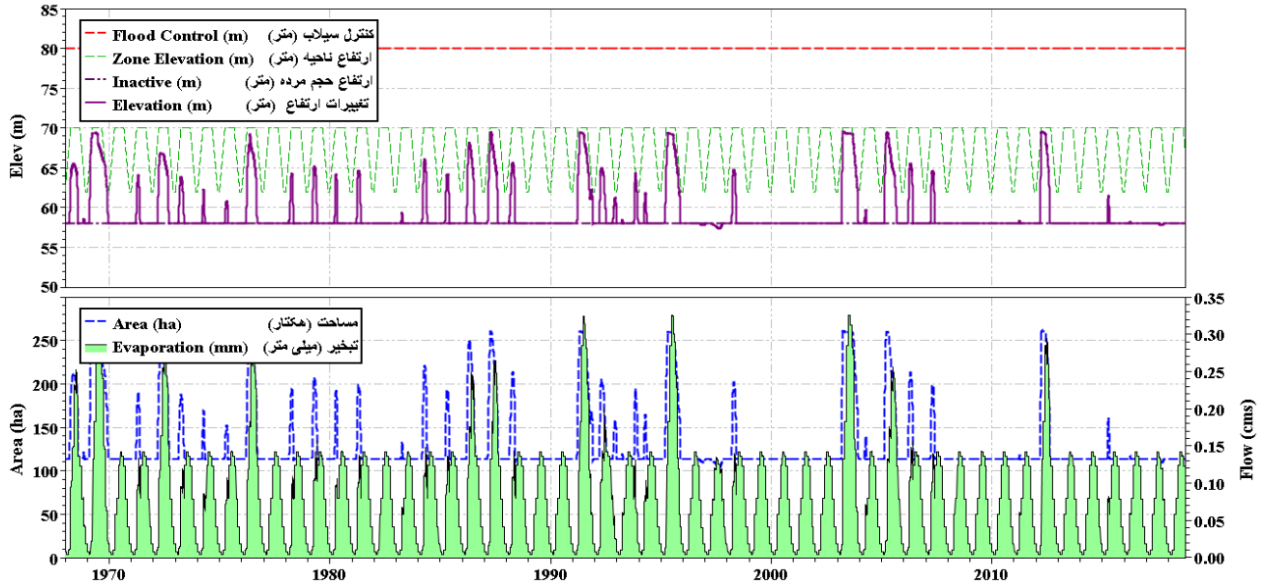
همانطور که اشاره گردید یکی از اهداف احداث سد لتیان تولید متوسط سالانه ۷۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی برق - آبی جهت شبکه سراسری می‌باشد (IWRMC, 2015). مطابق با نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی مخزن، متوسط سالانه تولید انرژی برق- آبی نیروگاه سد لتیان معادل ۶۸۰۰۰ مگاوات ساعت برآورد گردید که نشان‌دهنده همگرایی نتایج مدل HEC-ResSim با مقادیر واقعی می‌باشد.

در شکل ۱۱ مقادیر انژی برق-آبی تولید شده از سد لتیان با مدل شبیه‌سازی برای سال‌های مختلف قرار داده شده است. مطابق نتایج در ۱۶ سال از ۵۰ سال بهره‌برداری، نیروگاه برق-آبی کلان ۱۰۰ درصد نیاز را به طور کامل تامین کرده است. به طور متوسط نیروگاه کلان برای کل دوره شبیه سازی قادر به تامین ۸۰ درصد نیاز برق-آبی محدوده مطالعاتی می‌باشد.

شکل ۱۲ نشان دهنده توام تغییرات ارتفاع سطح آب در سد لتیان در مقابل تغییرات مساحت دریاچه سد و تبخیر برای کل دوره شبیه‌سازی می‌باشد. مطابق با محدودیت‌های بهره‌برداری در ارتفاعات مختلف و مشخصات نواحی ذخیره‌سازی سد لتیان (جدول ۲) مشاهده می‌شود که تغییرات بازه ارتفاع آب در مخزن بین ارتفاع ۵۸ و ۷۰ متر می‌باشد. با توجه به سیاست بهره‌برداری سد لتیان در مطالعه حاضر امکان بهره برداری از حجم مرده مخزن لتیان (ارتفاع کمتر از ۵۸ متر) در واقعیت و مدل شبیه‌سازی قرار نگرفته است. همچنین با توجه به اینکه سرریز سد لتیان در ارتفاع ۷۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد بر این اساس ارتفاع سطح آب در مخزن سد لتیان به بیشتر از ۷۰ متر نمی‌رسد مگر در مواقعی که حجم آب مازاد در سد از ظرفیت تخلیه سرریز بیشتر باشد. از طرفی در این شکل مساحت دریاچه سد برای ارتفاع ۵۸ و ۷۰ متر به ترتیب معادل ۱۲۵ و ۲۷۰ هکتار برآورد گردید. تبخیر از سطح دریاچه سد لتیان نیز به عنوان یکی از خروجی‌های معادله بیلان می‌باشد که مطابق نتایج با افزایش مساحت دریاچه سد افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به شبیه‌سازی مناسب مخزن توسط مدل HEC-ResSim، نتایج حاکی از آن است که مقادیر ماهانه نیاز پایین‌دست به‌خصوص در دهه اخیر به مراتب بیشتر از ورودی به مخزن سد لتیان بوده است. بنابرین تنها رویکرد به‌منظور مدیریت نتیجه‌محور در راستای حل مشکل کمبود مخزن، صرفه‌جویی در مصرف آب می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه بیش از ۹۰ درصد تقاضای آب از سد لتیان برای آب شرب تهران می‌باشد، بنابرین با ارائه یک سناریو صرفه‌جویی در مصرف آب شرب می‌توان هم به استفاده بهینه از منابع آبی کمک کرد و هم می‌توان میزان انرژی مورد نیاز را نیز تا حد قابل قبولی تامین کرد.

در راستای ضرورت این مسئله در پژوهش حاضر از دو سناریو صرفه‌جویی در مصارف به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد استفاده گردید. نتایج به دست آمده از این دو سناریو در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات ارتفاع سطح آب در مقابل تغییرات مساحت دریاچه و تبخیر از سطح دریاچه

Figure 13- Chart of water level changes against lake area changes and evaporation from the lake surface

به طور کلی مطابق با نتایج حاصل شده میزان حجم مخزن در شرایط واقعی از هر دو سناریو صفرجویی کمتر برآورد گردید. این امر به‌خاطر نیاز زیاد پایین دست می‌باشد که مانع از ذخیره آب در مخزن می‌شود. اما در دو سناریو ۱ و ۲ با اعمال صرفه‌جویی در مصرف، مطابق انتظار میزان ذخیره نیز نسبت به شرایط واقعی افزایش پیدا می‌کند. این مورد در زمینه ارتفاع سطح آب در مخزن، مساحت دریاچه و تبخیر از سطح دریاچه نیز صدق می‌کند. اما این امر در خصوص تولید انرژی برق–آبی رابطه عکس دارد. به‌طوری که با اعمال سناریوهای صرفه جویی در مصرف آب، میزان آب رهاسازی به نیروگاه مطابق با هر سناریو کاهش داشته که این امر منجر به کاهش تولید انرژی در دو سناریو شده است اما این کاهش تولید انرژی در دو سناریو محسوس نیست و نیروگاه کلان مطابق با سناریو ۱ و ۲ به ترتیب ۹۴ و ۹۰ درصد نیاز برق را تامین می‌کند.

طبق نتایج به دست آمده متوسط ذخیره مخزن سد لتیان برای کل دوره در سناریو اول و دوم به ترتیب معادل ۴۹ و ۶۳ میلیون متر مکعب برآورد گردید. همچنین مخزن سد لتیان با اعمال سناریو صرفه‌جویی اول و دوم قادر خواهد بود که سالانه معادل ۶۶۰۰۰ و ۶۳۰۰۰ مگاوات ساعت تولید انرژی برق– آبی داشته باشد. بطور کلی نتایج حاکی از آن است که با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصارف خانگی تهران، علاوه بر اینکه به جهت تامین انرژی در حد قابل قبول، نیازی به رهاسازی بیشتر آب به نیروگاه کلان، به منظور تولید انرژی لازم نخواهد بود. همچنین کمبود آب در سد لتیان به میزان مناسبی به‌خصوص در سناریو دوم رفع گردید اما همچنان از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به دلیل کاهش شدید آورد رودخانه جاجرود، مشکل کمبود مخزن سد لتیان وجود دارد که نیازمند صرفه‌جویی بیشتر در مصارف آب می‌باشد.

جدول ٤- مقایسه متوسط سالانه نتایج شبیه‌سازی مدل برای سناریوهای اول و دوم با شرایط واقعی بهره‌برداری سد لتیان

Table 4- Average annual comparison of the simulation results of the model for the first and second scenarios with the actual operating conditions of the Latian Dam

تبخیر از سطح دریاچه Evaporation from the lake (cms)	مساحت دریاچه Lake area (ha)	تولید انرژی برق- آبی Energy production (MWh)	ارتفاع سطح آب Water level height (m)	میانگین حجم ذخیره مخزن Average reservoir storage volume (MCM)	میزان صرفه جویی Water saving (%)	سناریو Senario
0.15	202.1	66000	66.1	49	%20	1
0.21	278.9	63000	71.8	63	%30	2
0.09	130.1	68000	59.3	41	-	شرایط واقعی Real conditions

نتیجه‌گیری

در این مطالعه نحوه عملکرد و بهره‌برداری مخزن سد لتیان با استفاده از مدل شبیه‌سازی مخزن Hec-ResSim مورد بررسی قرار گرفت. پس از وارد کردن داده‌هایی نظیر ارتفاع و طول سد، منحنی‌های سطح – حجم و حجم – ارتفاع، تبخیر از سطح مخزن سد، ارتفاع و ضریب سرریز، نواحی ذخیره سد، منحنی فرمان و ... به مدل، دبی خروجی از سد توسط مدل شبیه‌سازی شد. در مطالعه حاضر مقادیر حجم مرده و حجم مفید سد لتیان به ترتیب معادل ۲۸ و ۸۳ میلیون‌متر مکعب برآورد گردید. میانگین آب رهاسازی سد لتیان برای ۲۵ سال اول و دوم بهره‌برداری به ترتیب معادل ۶/۱ و ۳/۷ متر مکعب برثانیه بوده که به‌طور متوسط ۵۰ و ۳۲ درصد از نیاز پایین دست برآورده شده است. این درحالی است در اواخر دوره شبیه‌سازی به خصوص از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸ سد لتیان فقط قادر به تأمین ۲۹ درصد نیاز پایین دست می باشد. اما در زمینه تولید انرژی برق–آبی به جز اواخر دوره شبیه‌سازی در سایر زمان‌ها کمبودی دیده نمی‌شود. همچنین متوسط حجم آب ذخیره شده سد لتیان برای کل دوره معادل ۴۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید که افت محسوس ۴۹ درصدی را نسبت به زمانی که مخزن پر است، نشان می‌دهد. با گذشت زمان با کاهش میزان ورودی به مخزن سد لتیان، میزان حجم ذخیره‌سازی شده در مخزن نیز کاهش یافته و در بسیاری از سال‌ها علاوه بر اینکه ظرفیت ذخیره مخزن تکمیل نمی شود از طرفی سرریز هم از سد اتفاق نمی‌افتد. متوسط سالانه تولید انرژی برق– آبی نیروگاه سد لتیان معادل ۶۸۰۰۰ مگاوات ساعت برآورد گردیدکه نشان‌دهنده همگرایی نتایج مدل HEC-ResSim با سایر روش‌های انجام شده می‌باشد. با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع و مصارف آب و شناخت نیازهای موجود می‌توان بر مسئله کمبود آب فائق آمد. تغییر الگوی کشت مناسب و تغییر شیوه آبیاری از سنتی به تحت فشار یکی دیگر از راهکارهای پیشنهادی برای بهره‌وری مناسب از آب موجود در محدوده مطالعاتی این پژوهش می‌باشد.

منابع

1. Babazadeh, H., Sedghi, H., Kaveh, F., & Jahromi, H. M. (2007, March). *Performance evaluation of Jiroft storage dam operation using HEC-RESSIM 2.0*. In Eleventh International Water Technology Conference (pp. 449-459).
2. Bazzi, H., Ebrahimi, H., & Aminnejad, B. (2021). A comprehensive statistical analysis of evaporation rates under climate change in Southern Iran using WEAP (Case study: Chahnimeh Reservoirs of Sistan Plain). *Ain Shams Engineering Journal*, *12*(2), 1339-1352. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.030
3. Behrangi, F., Banihashemi, M.A., Mahani, S., & Rahmanian, M.R. (2014). Sediment settling in the Latian Dam in Iran. *International Journal of Sediment Research*, *29*(2), 208-217. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60037-8
4. Chandel, A., Shankar, V., & Jaswal, S. (2022). Employing HEC-ResSim 3.1 for Reservoir Operation and Decision Making. In Boundary Layer Flows-Modelling, Computation, and Applications of Laminar, *Turbulent Incompressible and Compressible Flows*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.101673
5. Cochrane, T.A., Arias, M.E., Teasley, R.L., & Killeen, T.J. (2010). Simulated changes in water flows of the Mekong River from potential dam development and operations on the Se San and Sre Pok tributaries.
6. Emadi, A., & Khademi, M. (2011). Reservoir Operation Rule Curve of Doroodzan Dam using Yield Model. *Water and Soil*, *25*(5). (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v0i--.11217
7. Hatamkhani, A., Shourian, M., & Moridi, A. (2021). Optimal Design and Operation of a Hydropower Reservoir Plant Using a WEAP-Based Simulation–Optimization Approach. *Water Resources Management*, *35*(5), 1637-1652.

mailto:https://doi.org/10.1007/s11269-021-02821-7
8. IWRMC (Iran Water Resources Management Company) (2013) Report of alt Lake watershed. Water resources balance report of the Lavasanat study area.Yekom Consulting Engineers Company. (In Persian)
9. IWRMC (Iran Water Resources Management Company), (2015). Zoning of eco-hydrological sustainability status Of dams and hydro-electric power plants downstream with the purpose of determining the minimum environmental water requirements, using integrated SMCE and CEQUALW2 Models (Case study: Latian dam of Tehran province), R-1276695. (In Persian)
10. Mahmood, R. (2013). Assessment of Climate Change Impact on Water Resources and Hydropower in the Jhelum River Basin, Pakistan (Doctoral dissertation, Asian Institute of Technology).
11. Mihankhah, N., Chizari, A., & Khalilian, S. (2012). Optimum Operational Management from Surface Water Resources with Application Dynamic Programming. *Journal Of Agricultural Economics and Development*, *26*(4), 244-251. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jead2.v1391i4.19893
12. Modini, C. (2010). Using HEC-ResSim for Columbia River treaty flood control. In 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, *Water Resource Systems Division*, Davis, CA.
13. Munir, M.M., Shakir, A.S., Rehman, H.U., Khan, N.M., Rashid, M.U., Tariq, M.A.U.R., & Sarwar, M.K. (2022). Simulation-optimization of tarbela reservoir operation to enhance multiple benefits and to achieve sustainable development goals. *Water*, *14*(16), 2512. https://doi.org/10.3390/w14162512
14. Oli, H.B., Patra, J.P., & Mishra, S.K. (2019). Nalgad dam and reservoir operation simulation using Hec-Ressim model for hydropower generation. *Advance and Innovative Research*, 27.
15. Saab, S.M., Othman, F.B., Tan, C.G., Allawi, M.F., & El-Shafie, A. (2022). Review on generating optimal operation for dam and reservoir water system: simulation models and optimization algorithms. *Applied Water Science*, *12*(4), 1-28. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01593-8
16. Sattari, M. T., Apaydin, H., & ÖZTÜRK, F. (2013). Stochastic operation analysis of irrigation reservoir in low-flow conditions: a case study from Eleviyan Reservoir, Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *37*(5), 613-622. https://doi.org/10.3906/tar-1210-89
17. Taghian, M. (2016). Estimating the optimal capacity for reservoir dam based on reliability level for meeting demands. *Water and Soil*, *30*(3), 672-684. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v30i3.34436
18. Uysal, G., Aynur Şensoy, A., Arda Şorman, M., Cansaran, E., & Emmanuel, R. (2014). Evaluation of reservoir model integration with deterministic and probabilistic streamflow forecasts."
19. Yoon, Y., Beighley, E., Lee, H., Pavelsky, T., & Allen, G. (2016). Estimating flood discharges in reservoir-regulated river basins by integrating synthetic SWOT satellite observations and hydrologic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, *21*(4), 05015030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001320
20. Zhao, G., Gao, H., Naz, B.S., Kao, S.C., & Voisin, N. (2016). Integrating a reservoir regulation scheme into a spatially distributed hydrological model. *Advances in Water Resources*, 98, 16-31. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.014