



Evaluation of the Effects of Mechanical Watershed Management Measures on Reducing Sedimentation in the Zayandeh Rood Dam Reservoir

Hamid Nouri,^{1*}  Hasan Vahid²

1. Associate Professor of Climatology, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Natural Resources and Watershed Management Organization, International Center for Integrated Watershed Management and Biological Resources in Arid and Semi-arid Regions under the auspices of UNESCO (ICIMWB), Iran, climatology. E-mail: h.nori@malayeru.ac.ir

2. PhD student in Rangeland Management, Gorgan University of Natural Resources and Agriculture, Natural Resources and Watershed Management Organization, Iran. E-mail: hasanvahid1399@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 July 2025
Received in revised form 09 August 2025
Accepted 08 September 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:

Zayandeh Rood Dam,
Suspended Sediment,
Bedload,
Sediment Gauge Curve,
Watershed Management,
Check Dams

ABSTRACT

Research Topic: Estimation of river sediment load plays a fundamental role in understanding the ecohydrological relationships of the watershed and the useful life of dams. The structural complex in watershed management, including the management of the bed slope and banks of waterways, always has a significant impact on the sediments transported to rivers and dam reservoirs.

Method: In this paper, hydraulic and sedimentological data from 11 stations in the Zayandeh-Rood Dam basin were analyzed (1960 to 2019) to select the best methods for estimating suspended load and bed load, and to determine the cumulative effect of sediments stored by watershed management check dams that prevent the transport of these sediments downstream, by province and structure.

Results: Sediment gauge curve methods without correction factors estimate values lower than the actual sediment discharge, and among these methods, the single-line, bilinear, and median curve methods have estimated the lowest sediment amount, respectively. On the other hand, the results showed that the FAO correction factor in all gauge curve methods is overestimated compared to other methods. Measurement and calculation of sediment trapping show that the sediment storage volume by the total watershed dams was approximately equivalent to 4 years of sediment transport in the 2001s or 5 years of sediment transport in the 2011s in the Zayandeh-Roud Dam basin.

Conclusions: The volume of sediment storage behind of check dams of watershed management in the Zayandeh-Roud Dam basin indicates the importance and role of these structures in managing river sediment and reducing inflow to the dam reservoir.

Cite this article: Nouri, H., Vahid, H. (2025). Evaluation of the Effects of Mechanical Watershed Management Measures on Reducing Sedimentation in the Zayandeh Rood Dam Reservoir. *ECOHYDROLOGY*, 12(3), 812-831. <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.397787.1876>



© Hamid Nouri, Hasan Vahid.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2025.397787.1876>

Abstract

The study of the amount of sediment transported by rivers is one of the fundamental issues in river engineering and ecohydrology of watersheds. In this study, with the aim of determining the most accurate methods for estimating suspended load and bed load, hydraulic and sedimentological data from 11 stations in the Zayandeh Rood Dam basin were studied over a 49-year period (1960 to 2019). The contribution of the cumulative effect of sediments stored by watershed management check dams were investigated in the two provinces of Isfahan and Chaharmahal Bakhtiari, by types of structure. The results of this study show that the Lane, Kalinske, and Brooks methods have higher accuracy in estimating suspended load. Measurement show that the sediment stored behind the watershed check dams is about 1,023,000 cubic meters, so in general, the volume of sediment storage by the total watershed check dams was approximately 4 years of sediment transport in the 2000s or 5 years of

sediment transport in the 2010s in the Zayandeh Rood Dam Basin. However, given that about 45 percent of the check dams have been damaged, there is an approximate risk of transferring 50 percent of the stored sediment to the dam reservoir.

Introduction

Assessing sediment transport in rivers and accurately determining suspended and bed loads provide crucial information for sustainable water resource management. Various empirical relationships and models are used to estimate sediment load. However, the complexity of sediment transport processes and their spatiotemporal variations necessitate the development and evaluation of different methods. This study evaluates and compares various hydraulic and sediment estimation methods using data from monitoring stations in the Zayandeh-Rud Basin. The research aims to estimate and assess sediment transport variations (suspended load, bed load, and total sediment) over a long-term period at hydrometric stations in the Zayandeh-Rud Dam Basin. The objective is to identify the most accurate methods for estimating suspended and bed loads, given their significance in hydraulic structure design, erosion control, and watershed management. Also, In this study, by accurately measuring all watershed management structures and Check dams and the volume of sediment trapping, the effectiveness of watershed management check dams in reducing sediment entering the Zayandeh Rood Dam reservoir were investigated and evaluated. This valuable research clearly shows the effectiveness of watershed management measures in sediment management in the Zayandeh Rood Dam basin with a field and accurate perspective.

Materials and Methods

This study utilizes hydrometric and sediment data from 10 stations in the Zayandeh-Rud Basin, including Chelgerd, Dareh Namaki, Vahdatabad, Dimeh, Khorasanak, Eskandari, Ghal'eh Shahrukh, Heydari, and Mandarjan, over a 49-year statistical period (1970–2018). To determine the most suitable statistical method for estimating suspended load, streamflow and sediment discharge data were collected and analyzed. Suspended load estimation was conducted using single-line, two-line, and intermediate rating curves, both with and without correction coefficients. The estimated values were compared with observed values (20% of total data) using RMSE and MAE efficiency criteria. Due to the lack of direct bed load data, indirect methods based on physiographic parameters and suspended load statistics were used for its estimation. Initially, the location and characteristics of the watershed dams in each sub-basin and upstream of the sediment measurement stations were determined and investigated, and the effect of watershed management measures on sediment storage was evaluated, as well as the relationship between the sediment transport values recorded at the sediment measurement stations and the sediment storage values by the watershed dams. It is worth noting that the sediment storage values by the watershed dams are related to field measurements in the early spring of 1402, and it is not possible to relate sediment storage to sediment transport values during the long-term statistical period, and only the cumulative effect of sediment stored by the watershed dams that prevented the transport of these sediments downstream is presented. The watershed management measures implemented in the Zayandeh Rood Dam basin include mortar rock structures, concrete dams, earth dams, gabions or stone mesh, and drywall dams. It is worth noting that in addition to the above, a large number of embankments have been implemented by local communities with the goals of feeding wells and aqueducts, diverting water flow, sedimentation, etc. in the course of the waterways. Also, watershed dams were examined based on the volume of sediment storage, separated by each structure and province, as well as the stability status. One of the important factors for preventing the transfer of sediments stored in the reservoir of watershed dams is the stabilization of sediments by vegetation. Watershed dams were categorized based on the percentage of protective vegetation cover on the surface of the reservoir behind the dam.

Results

Findings indicate that sediment rating curve methods without correction coefficients underestimate actual sediment discharge, with the single-line rating curve providing the lowest estimates. In contrast, rating curve methods with correction coefficients performed better, although the FAO correction coefficient resulted in overestimation across all methods. Based on RMSE and MAE efficiency criteria, intermediate rating curves with MVUE and Smearing correction coefficients and two-line rating curves

with QMLE and MVUE correction coefficients exhibited the best performance in estimating suspended load at various hydrometric stations. The analysis of suspended load variations showed that the highest sediment transport occurred at Eskandari and Ghal'eh Shahrukh stations during the 1970s and 1990s. Eskandari and Ghal'eh Shahrukh stations recorded the highest sediment transport in the 1970s, with 75,000 and 240,000 tons, respectively. In general, 1645 dams in Isfahan province and 904 dams in Chaharmahal and Bakhtiari province are completely filled with sediment or permeable structures that lack the capacity to store water. It is worth noting that a very important issue regarding sediment storage and transport is related to the state of destruction and stability of watershed dams. In general, 1289 of the dams in Isfahan province are completely intact and 612 dams have been destroyed from 5 to 100 percent. Of the dams in Chaharmahal and Bakhtiari province, 764 dams are completely intact and 299 dams have been destroyed from 5 to 100 percent. One of the important factors for preventing the transfer of sediments stored in the reservoir of watershed dams is the stabilization of sediments by vegetation. In general, 1737 dams lack protective vegetation behind the reservoir. This has led to increased structural instability and sometimes their destruction. Based on the results, 781 sections have 5 to 20 percent coverage, 388 sections have 20 to 40 percent coverage, 43 sections have 40 to 60 percent coverage, 7 sections have 60 to 80 percent coverage, and one section has 80 to 100 percent protective coverage.

Discussion and Conclusion

This study demonstrates that selecting an appropriate method for estimating suspended and bed load depends on the specific hydrological and physiographic conditions of the basin. The use of appropriate correction coefficients improves estimation accuracy, but caution is needed when applying the FAO coefficient. Intermediate rating curves with MVUE and Smearing correction coefficients, as well as two-line rating curves with QMLE and MVUE correction coefficients, were identified as suitable methods for estimating suspended load in this basin. The findings of this research can assist in selecting appropriate sediment estimation methods, improving water resource management, and mitigating the negative impacts of sedimentation in the Zayandeh-Rud Dam reservoir. Future studies should consider direct measurement methods for bed load and develop more comprehensive sediment transport models. Additionally, analyzing data over shorter time periods and investigating the effects of climatic and anthropogenic factors on sediment transport can provide a better understanding of these processes. Then, the contribution of the cumulative effect of sediments stored by watershed management dams that prevent the transport of these sediments downstream has been investigated. It is worth noting that the sediment storage values by watershed management dams are related to field measurements in the early spring of 1402, and therefore, there is no possibility of relating sediment storage to sediment transport values during the long-term statistical period. In general, the volume of sediment storage by all watershed management dams was approximately 4 years of sediment transport in the 1380s or 5 years of sediment transport in the 1390s in the Zayandeh Rood Dam basin, which is a significant volume. In total, the sediments stored behind watershed management dams are about 1,023,000 cubic meters, so these structures have led to a reduction in this amount of sediment to the Zayandeh Rood Dam reservoir. However, given that about 45 percent of watershed dams have been damaged and destroyed by between 5 and 100 percent, if they are not repaired and organized, there is an approximate risk of transferring 50 percent of the stored sediments to the downstream and reservoir of the Zayandeh Rood Dam, as well as intensifying the risk and damage of floods in the coming years.

Author Contributions

All authors 1-2 led the analysis, writing, and interpretation of the paper.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgements

We would like to thank the following people for helping with this research project: Representatives from Geoscience Innovators Company for their willingness to impart their knowledge and attempts and also, some members who took the time to complete our project in Natural Resources and watershed Management Organization.

Ethical considerations

This research did not involve human or animal participants. All data used were obtained from open or authorized institutional sources. The authors affirm that the study complies with the journal's ethical standards.

Funding

"The research leading to these results has received funding from the PROJECT titled " **Analysis of watershed management structures and their effects on water changes in the Zayandeh Rood Dam lake** " in the frame of the program "integrated watershed management "This work was supported by the Natural Resources and Watershed Management Organization.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

ارزیابی اثرات اقدامات مکانیکی آبخیزداری در کاهش رسوب مخزن سد زاینده رود

حمید نوری^۱ , حسن وحید^۲

۱. دانشیار آب و هواشناسی، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، مرکز بین المللی مدیریت جامع حوزه های آبخیز و منابع زیستی در مناطق خشک و نیمه خشک تحت نظارت یونسکو (ICIMWB)، رایانامه: h.nori@malayeru.ac.ir
 ۲. دانشجوی دکتری مرتعداری دانشگاه منابع طبیعی و کشاورزی گرگان، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری ایران. رایانامه: hasanvahid1399@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: برآورد بار رسوبی رودخانه ها نقش اساسی در شناخت روابط اکوهیدرولوژی حوزه آبخیز و عمر مفید سدها دارد. مجموعه اقدامات سازه ای در آبخیزداری با مدیریت شیب بستر و کناره آبراهه ها، همواره تأثیر قابل توجهی بر رسوبات انتقالی به رودخانه ها و مخازن سدها دارند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲	هدف: تعیین دقیق ترین روش های برآورد بار معلق و بار بستر و ارزیابی اثرات سازه های آبخیزداری در کاهش رسوب ورودی به مخزن سد زاینده رود.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸	روش تحقیق: در این پژوهش، داده های هیدرولیکی و رسوب سنجی ۱۱ ایستگاه حوزه سد زاینده رود طی یک دوره ۵۰ ساله (۱۳۴۹ تا ۱۳۹۸) برای انتخاب بهترین روش های برآورد بار معلق و بار بستر، بررسی و سهم اثر تجمعی رسوبات ذخیره شده توسط اقدامات آبخیزداری که مانع از انتقال این رسوبات به پایین دست شده است، به تفکیک استان و سازه ها تعیین گردید.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷	یافته ها: روش های منحنی سنج رسوب بدون ضرایب اصلاحی، مقادیر کمتر از میزان واقعی دبی رسوب را برآورد می کنند و در بین این روش ها به ترتیب روش منحنی یک خطی، دو خطی و حد وسط کمترین مقدار رسوب را برآورد نموده اند. از طرفی، نتایج نشان داد که ضریب اصلاحی FAO در همه روش های منحنی سنج نسبت به سایر روش ها دارای بیش تخمینی است. اندازه گیری و محاسبه تله اندازی رسوبات نشان می دهد که حجم ذخیره رسوب توسط مجموع بندهای آبخیزداری تقریباً معادل ۴ سال انتقال رسوب در دهه ۱۳۸۰ و یا ۵ سال انتقال رسوب در دهه ۱۳۹۰ در حوضه سد زاینده رود بوده است.
کلیدواژه ها: سد زاینده رود، رسوب معلق، بار کف، منحنی سنج رسوب، بندهای اصلاحی آبخیزداری.	نتیجه گیری: حجم ذخیره رسوب توسط مجموع بندهای آبخیزداری حوضه سد زاینده رود، نشان دهنده اهمیت و نقش این سازه ها در مدیریت رسوب رودخانه ها و ورودی به مخزن سد دارد.

استناد: نوری، حمید؛ وحید، حسن. ارزیابی اثرات اقدامات مکانیکی آبخیزداری در کاهش رسوب مخزن سد زاینده رود. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲ (۳)، ۸۱۲-۸۳۱.

<http://doi.org/10.22059/IJE.2025.397787.1876>

© حمید نوری، حسن وحید.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها نقش اساسی در شناخت اکوهیدرولوژی حوزه آبخیز، تغییرات بستر و کناره‌های رودخانه، تعیین حجم و عمر مفید سدها، ظرفیت کانال‌های آبگیر، پتانسیل برداشت مصالح و برنامه‌ریزی عملیات لایروبی دارد (عزیزی، ایلدرومی و نوری، ۱۳۹۸). رودخانه‌ها همواره تحت تأثیر فرایندهای فرسایش و انتقال رسوب قرار دارند؛ از این رو برآورد دقیق میزان رسوب در مطالعات حفاظت خاک و بهره‌برداری از منابع آبی از اهمیت ویژه‌ای در منابع علمی برخوردار است (صادقی، معتمدنیا، و بهزادفر، ۱۳۸۹؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۰؛ صادقی، خیرفام، و درکی، ۱۳۹۸؛ نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). ارزیابی شدت انتقال رسوب شامل بار معلق، بار بستر و رسوب کل، در مطالعات حوزه‌ای و رودخانه‌ای اهمیت بسزایی دارد، اما اندازه‌گیری مستقیم بار بستر به دلیل پیچیدگی‌های فیزیکی و محدودیت‌های اجرایی، بسیار دشوار بوده و در اغلب موارد به تخمین آن براساس درصدی از بار معلق بسنده می‌شود (دنیادیده و رستمی راوری، ۱۳۹۵؛ ثاقبیان، ۱۴۰۰؛ مرادی‌نژاد، ۱۴۰۳). بررسی‌های گذشته نشان می‌دهد که رابطه مشخصی بین بار معلق و بار بستر وجود دارد، به‌طوری‌که در مناطق کوهستانی و رودخانه‌های پرشیب، سهم بار بستر نسبت به بار معلق بیشتر است، درحالی‌که در مناطق کم‌شیب و جلگه‌ای، این نسبت به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد (خیرفام و همکاران، ۱۳۹۷؛ نظام فنی و اجرای کشور، ۱۳۸۶). با این حال، در شبکه هیدروگرافی رودخانه‌ها، توزیع ایستگاه‌های هیدرومتری به گونه‌ای نیست که بتواند اطلاعات جامعی از انتقال رسوب ارائه دهد (صمدیان‌فرد و همکاران، ۱۳۸۶؛ راتون^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). داده‌های موجود عمدتاً محدود به اندازه‌گیری بار معلق در جریان‌های غیرسیلابی است و برآورد سهم بار بستر همچنان با عدم قطعیت‌های فراوانی مواجه است. در ایران، اندازه‌گیری مستقیم بار بستر تنها در تعداد محدودی از ایستگاه‌های هیدرومتری و آن هم در شرایط کم‌آبی انجام شده است (فردی، ۱۴۰۱؛ خدانشناس و یاراحمدی، ۱۳۸۸). در نتیجه، شرکت‌های آب منطقه‌ای و مهندسين مشاور معمولاً بار بستر را به‌صورت درصدی از بار معلق (در دامنه ۱۰ تا ۲۰ درصد و عموماً معادل ۱۵ درصد) در نظر می‌گیرند. با توجه به نبود یک رابطه ریاضی جامع برای تخمین بار بستر براساس بار معلق، بررسی پارامترهای مؤثر بر این نسبت و توسعه روابط کاربردی برای برآورد دقیق آن از اهمیت بالایی برخوردار است (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ باسوماتاری^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). تاکنون معادلات مختلفی توسط متخصصان برای تعیین بار بستر ارائه شده است که هر یک متناسب با شرایط آزمایشگاهی یا میدانی خاص خود کاربرد دارند (آزادی، نادری و افضل‌مهر، ۱۴۰۰)، اما به دلیل پیچیدگی‌های فرایند انتقال رسوب، تاکنون هیچ معادله جهانی واحدی برای تعیین دقیق بار بستر توسعه نیافته است. از این رو، تحلیل دقیق ویژگی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی رودخانه‌ها، بررسی داده‌های رسوبی ایستگاه‌های هیدرومتری، و ارزیابی روش‌های برآورد رسوب، برای کاهش عدم قطعیت‌ها و دستیابی به تخمین‌های قابل اعتماد ضروری به نظر می‌رسد. انتقال رسوب در رودخانه‌ها یک پدیده پیچیده است که به دلیل عوامل مختلفی مانند نوع بستر، شرایط هیدرولوژیکی و ریخت‌شناسی رودخانه، دارای پیچیدگی‌های زیادی است. در برخی از مقالات، به استفاده از روش‌های رگرسیونی نوین برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب بستر در رودخانه‌های شنی اشاره شده است. در این تحقیقات، از رگرسیون فرایند گاوسی (GPR) برای پیش‌بینی نرخ انتقال رسوب استفاده شده و نتایج نشان داده است که این روش عملکرد بهتری در مقایسه با مدل‌های دیگر دارد (آزادی، نادری و افضل‌مهر، ۱۴۰۰). در تحقیقات اخیر، از مدل Gstars3 برای شبیه‌سازی انتقال رسوب در رودخانه‌های شنی استفاده شده است. این مدل با استفاده از مفهوم لوله جریان، قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات بستر رودخانه در جهات طولی و عرضی است. در یک مطالعه موردی در رودخانه گاورود، این مدل برای برآورد انتقال رسوب استفاده شد و نتایج نشان داد که تابع انتقال رسوب یانگ در سال ۱۹۷۹ (یانگ و سایمن، ۱۹۹۸ و ۲۰۰۲) بهترین معادله برای شبیه‌سازی انتقال رسوب است و با شرایط رودخانه مطابقت خوبی دارد (گلماعی، ضیاء تبراحمدی، و باتنی، ۲۰۱۵).

در تحقیقات دیگری، از مدل‌های هیدرومورفودینامیکی برای پیش‌بینی انتقال رسوب در محیط‌های رودخانه‌ای استفاده شده است. این مدل‌ها می‌توانند در پیش‌بینی دقیق تر انتقال رسوب و پهنه‌بندی سیلاب کمک‌کننده باشند. مدل‌های هیدرومورفودینامیکی به دلیل توانایی شبیه‌سازی پیچیدگی‌های جریان و انتقال رسوب، در پروژه‌های مهندسی رودخانه از جمله طراحی سدها و مخازن آب بسیار مهم هستند (عزیزیان و همکاران، ۲۰۱۹؛ شاماکووا^۴، ۲۰۲۲). در یک مطالعه، به توسعه مدل‌های ریاضی برای انتقال رسوب در

1. Ratton

2. Basumatary

3. Golmaee, Zia Tabar Ahmadi, & Batny

4. Shmakova

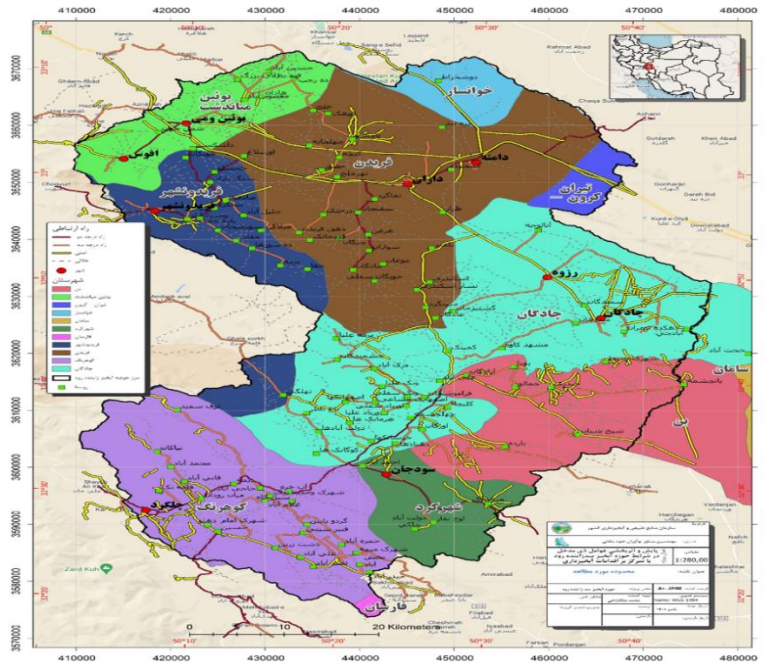
رودخانه‌های شنی اشاره شده و به اهمیت استفاده از مدل‌های ریاضی برای درک بهتر فرایندهای رسوبی اشاره شده است (شجاعیان و خدابخشی، ۱۳۹۶). از مدل HEC-RAS هم برای برآورد انتقال رسوب در رودخانه‌ها استفاده شده است. این مدل می‌تواند در پیش‌بینی شرایط جریان و انتقال رسوب در سیستم‌های رودخانه‌ای مفید باشد. در یک مطالعه در رودخانه شاهرود، این مدل برای برآورد انتقال رسوب استفاده گردید و نتایج نشان داد که می‌تواند در پیش‌بینی دقیق‌تر انتقال رسوب سودمند باشد (آجاو، ۲۰۲۴). در برخی تحقیقات، به اهمیت استفاده از مدل‌های عددی برای درک بهتر فرایندهای رسوبی اشاره شده است (اناری، ۱۴۰۲؛ تاجمهر، حسونی‌زاده و عبدویس، ۱۳۹۳).

هدف اصلی این تحقیق، تخمین رسوبات کل منتقل شده به مخزن سد زاینده‌رود در دهه‌های مختلف و میزان تله‌اندازی رسوب پشت سازه‌های مختلف آبخیزداری است تا نشان داده شود اثربخشی این چک‌دم‌ها در مدیریت رسوب چگونه است. در این مطالعه تغییرات رسوب بر رودخانه این سد مهم در ایران مرکزی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است و مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق و بار کف در مطالعات در حوزه سد زاینده‌رود انتخاب و معرفی گردید. علاوه بر آن، هدف از این تحقیق بررسی سلامت و وضعیت چک‌دم‌ها و اندازه‌گیری حجم مخزن و نگاه میدانی و دقیق به آن‌هاست تا اثربخشی اقدامات مکانیکی آبخیزداری در مدیریت رسوب کل حوزه سد زاینده‌رود را که وارد آبراهه‌ها و خروجی حوزه می‌شود، به‌روشنی نشان دهد.

مواد و روش‌ها

معرفی موقعیت مورد مطالعه

حوضه آبخیز زاینده‌رود به مساحت ۴۱۲۱۱۲/۹۲ هکتار در مختصات جغرافیایی $50^{\circ} 02' 01''$ تا $50^{\circ} 45' 24''$ طول شرقی و $54^{\circ} 17' 33''$ تا $33^{\circ} 11' 39''$ عرض شمالی قرار دارد. محیط حوضه ۵۳۶/۷۳ کیلومتر بوده و کمترین و بیشترین ارتفاع منطقه به ترتیب ۱۹۹۱ و ۳۹۴۶ متر است. شکل ۱ موقعیت حوضه را در کشور و استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری نشان می‌دهد. از نظر سیاسی این منطقه در استان‌های اصفهان (۶۸/۳۲ درصد) و چهارمحال و بختیاری (۳۱/۶۸ درصد) واقع شده است. جدول ۱ تقسیمات سیاسی (استان، شهرستان، بخش، دهستان) واقع در حوضه آبخیز زاینده‌رود را براساس مساحت نشان می‌دهد. همچنین حوضه مورد نظر از نقطه نظر هیدرولوژیکی و تقسیمات حوضه‌های آبریز (تماب) جزء حوضه آبریز درجه ۱ فلات مرکزی، زیرحوضه درجه ۲ گاوخونی و زیرحوضه درجه ۳ زاینده‌رود محسوب می‌شود.



شکل ۱. موقعیت حوضه مورد مطالعه در کشور و استان‌های اصفهان و چهارمحال بختیاری

مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

در مطالعات حاضر، از اطلاعات ۱۱ ایستگاه هیدرومتری در محدوده حوضه سد زاینده‌رود استفاده می‌شود (شرکت مدیریت منابع آب ایران). فهرست و مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ و ۲ و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در داخل حوضه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه سد زاینده‌رود

ردیف	ایستگاه	کد ایستگاه	رودخانه	دوره آماری آب‌سنجی	دوره آماری رسوب‌سنجی
۱	چلگرد	۴۲۰۰۱	تونل اول کوهرنگ	۱۳۲۶ تا ۱۳۹۹	۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹
۲	دره در	۴۲۰۳۵	تونل دوم کوهرنگ	۱۳۸۲ تا ۱۳۶۶	-
۳	دره‌نمکی	۴۲۵۱۴	جمع تونل اول و دوم کوهرنگ	۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴	۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹
۴	وحدت‌آباد	۴۲۰۰۶	تونل چشمه لنگان	۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷	۱۳۸۶ تا ۱۳۹۴
۵	دیمه	۴۲۷۱۱	چشمه دیمه	۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷	۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹
۶	خراسانک	۴۲۰۰۲	دره گاو	۱۳۸۲ تا ۱۳۹۷	۱۳۸۳ تا ۱۳۹۴
۷	سواران	۴۲۰۵۱	-	۲۵ سال نواقص آمار	-
۸	اسکندری	۴۲۰۰۵	پلاسجان	۱۳۴۹ تا ۱۳۹۷	۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴
۹	قلعه شاهرخ	۴۲۰۰۳	زاینده‌رود	۱۳۵۱ تا ۱۳۹۷	۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴
۱۰	حیدری	۴۲۶۷۲	دراز دره	۱۳۷۹ تا ۱۳۹۷	۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴
۱۱	مندرجان	۴۲۰۴۷	سمندگان	۱۳۵۸ تا ۱۳۹۷	۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴
	ورودی مخزن سد	-	زاینده‌رود	۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱	-
۱۲	خروجی سد	-	زاینده‌رود	۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱	-
	تراز و حجم آب مخزن	-	زاینده‌رود	۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱	-



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری نسبت به هم در حوضه مورد مطالعه به صورت شماتیک

مشخصات سازه‌ها و وضعیت ذخیره رسوب توسط بندهای آبخیزداری در حوزه مورد مطالعه

در ابتدا موقعیت و مشخصات بندهای آبخیزداری در هر زیرحوزه و بالادست ایستگاه‌های رسوب‌سنجی تعیین و بررسی و اثر اقدامات آبخیزداری بر ذخیره رسوب و همچنین ارتباط بین مقادیر انتقال رسوب ثبت‌شده در ایستگاه‌های رسوب‌سنجی با مقادیر ذخیره رسوب توسط بندهای آبخیزداری ارزیابی گردید. شایان ذکر است مقادیر ذخیره رسوب توسط بندهای آبخیزداری مربوط به اندازه‌گیری میدانی در اوایل بهار سال ۱۴۰۲ است و امکان ارتباط ذخیره رسوب با مقادیر انتقال رسوب در طی دوره آماری بلندمدت وجود ندارد و صرفاً سهم اثر تجمعی رسوبات ذخیره‌شده توسط بندهای آبخیزداری که مانع از انتقال این رسوبات به پایین‌دست شده، ارائه شده است. اقدامات آبخیزداری اجراشده در سطح حوضه سد زاینده‌رود شامل سازه‌های سنگ ملاتی،

بندبستی، بند خاکی، گابیونی یا توری‌سنگی، بندهای خشکه‌چین است. شایان ذکر است علاوه بر موارد فوق، تعداد زیادی خاکریز توسط جوامع محلی با اهداف تغذیه چاه و قنات، انحراف جریان آب، رسوب‌گذاری و... در مسیر آبراهه‌ها اجرا شده است. همچنین بندهای آبخیزداری براساس حجم ذخیره رسوب به تفکیک هر سازه و استان و نیز وضعیت پایداری مورد بررسی قرار گرفت. یکی از عوامل مهم برای جلوگیری از انتقال رسوبات ذخیره‌شده در مخزن بندهای آبخیزداری، تثبیت رسوبات توسط پوشش گیاهی است. بندهای آبخیزداری براساس درصد پوشش گیاهی حفاظتی در سطح مخزن پشت‌بند دسته‌بندی شدند.

محاسبه بار معلق در شرایط وجود آمار ایستگاه هیدرومتری / روش های هیدرولوژیکی

از جمله راهکارهای مناسب برای تعیین بار معلق استفاده از آمار ثبت شده در محل ایستگاه های آب سنجی است. در این ایستگاه ها ضمن اندازه گیری دبی جریان (Q) نمونه های آب نیز با هدف تعیین غلظت رسوب (C) تهیه می شود و پس از انتقال به آزمایشگاه غلظت بار معلق مشخص می گردد. در عمل سالانه، تعداد معدودی عملیات اندازه گیری و تعیین کمیت بده جریان و غلظت رسوب انجام می گیرد. و مبنای تعیین بار رسوبی روزانه، ماهانه و سالانه می شود. بدین منظور از روش های مختلفی می توان بهره جست که از جمله آن ها روش منحنی سنج رسوب و منحنی بده کلاسه موسوم به روش USBR^۱ متداول است.

به دلیل بهبود کارایی مطلوب روش های منحنی سنج رسوب، محققان و کارشناسان روش های متنوع و ضرایب اصلاحی زیادی را ارائه کرده اند. در این بخش از تحقیق اقدام به برآورد بار رسوب معلق ایستگاه های هیدرومتری در حوضه های معرف با به کارگیری منحنی سنج رسوب یک خطی، دو خطی و حد وسط و پنج روش USBR، FAO، MVUE، QMLE و Smearing شد. سپس نتایج روش های مختلف براساس دو معیار آماری R.M.S.E و M.A.P.E مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت و مناسب ترین روش معرفی گردید.

۱. روش های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه ها

در روش هیدرولوژیکی ابتدا در ایستگاه های رسوب سنجی پس از کنترل کیفیت داده ها و حذف داده های مشکوک و پرت، غلظت مواد معلق (C) برحسب میلی گرم بر لیتر و گذر حجمی متناظر با آن (QW) برحسب مترمکعب بر ثانیه طی یک دوره آماری بلندمدت اندازه گیری می شود و با استفاده از رابطه (۱)، بار معلق (Qs) برحسب تن در روز محاسبه می شود.

$$Q_s = 0.0846 \times C \times Q_w \quad \text{رابطه (۱)}$$

در واقع از طریق داده های هیدرومتری و رسوب سنجی و با توجه به اینکه دبی رسوب تابعی از دبی جریان است، رابطه ای بین Qs و Qw ایجاد شده و با استفاده از داده های بلندمدت گذر حجمی رودخانه، بار معلق بلندمدت رودخانه برآورد می شود. در این تحقیق، از روش های برون یابی منحنی سنج شامل روش یک خطی، دو خطی و حد وسط، برگرفته از رابطه اداره عمران اراضی ایالات متحده آمریکا برای برآورد و ارزیابی نتایج استفاده شد که در ادامه، هریک از روش های مذکور به اختصار ارائه می شود.

۲. ترسیم منحنی سنج رسوب

در این مرحله با استفاده از ۸۰ درصد از آمار تفکیک شده کل داده های برداشت شده، منحنی سنج رسوب یک خطی، دو خطی و حد وسط در محیط برنامه Excel ترسیم و بار معلق با فرایند ذیل برآورد گردید.

الف) روش اداره عمران اراضی ایالت متحده (USBR)

در این روش پس از تعیین غلظت نمونه های رسوب، با اطلاع از مقدار آبدهی رودخانه در زمان برداشت نمونه، یک رابطه ریاضی (معمولاً غیر خطی) بین بار رسوبی معلق رودخانه و آبدهی آن برقرار می گردد. در عمل با توجه به داده های دبی آب و دبی رسوب متناظر با آن، هر دو سری داده به صفحه مختصات لگاریتمی منتقل شده و خط بهترین برازش بر مبنای روش حداقل مربعات از میان آن ها عبور داده می شود و رابطه ای به صورت رابطه (۲) که به منحنی سنج رسوب معروف است، بین دو متغیر برقرار می گردد. در مختصات لگاریتمی مقدار a و b ضرایب ثابت معادله رگرسیونی هستند. تغییرات ضریب a در طول زمان در یک حوضه آبریز، نشان دهنده فشارها و مداخلات انسانی در فرایند هیدرومورفولوژیکی رودخانه است؛ همچنین پارامتر توانی b برای تعیین مقدار انتقال رسوب یک حوضه بسیار حائز اهمیت است و به طور معمول مقدار آن بین ۰/۵ تا ۳ به دست می آید. مقدار بالای این پارامتر به معنای حجم بالای انتقال رسوب در جریان رودخانه است. شیب و شکل منحنی سنج رسوب می تواند جهت پی بردن به فرایندها و عوامل هیدرولوژیکی خاص به کار آید؛ برای مثال، منحنی صاف نشان می دهد که تقریباً در تمام جریان های دبی، به علت فرسایش پذیر بودن حوضه یا وجود مداخلات پیوسته شدید انسانی، رسوبات برای انتقال وجود دارد، شکل مقعر یا برآمده منحنی سنج نیز نشان دهنده آن است که عمده رسوبات حوضه در هنگام رخداد جریان های بالاتر انتقال پیدا می کنند (هنگ و سوئسوجی، ۲۰۱۴).

1. USBR

2. Heng & Suetsugu

$$Q_s = aQ_w^b \quad \text{رابطه ۲}$$

ب) روش سازمان خواروبار جهانی کشاورزی (FAO) جونز و همکاران (۱۹۸۱) برای نزدیک کردن مقادیر برآوردشده از منحنی سنج رسوب به مقادیر مشاهده شده، توصیه نمودند که روابط دبی آب-دبی رسوب به جای ضریب a از ضریب $\hat{a}$ طبق رابطه (۳) استفاده شود (جونز^۱ و همکاران، ۱۹۸۱).

$$\hat{a} = \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_w^b} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، $\bar{Q}_s$ متوسط دبی رسوب، $\bar{Q}_w$ متوسط دبی جریان متناظر با آن و b همان ضریب معادله USBR است.

ج) روش برآوردکننده نااریب با حداقل واریانس (MVUE)

در این روش، تصحیح اریب برای هریک از مقادیر دبی روزانه با استفاده از رابطه (۴) بیان شده است.

$$Q_s = CF_{MVUE} \cdot aQ_w^b \quad \text{رابطه ۴}$$

در این معادلات Q_s رسوب برآوردشده از روش MVUE، CF_{MVUE} ضریب اصلاحی، aQ_w^b رسوب برآوردشده از منحنی‌های سنج (روش USBR) برای هر روز است (اندرنی و هاست،^۲ ۲۰۰۵).

د) روش تخمینگر شبه بیشینه درست‌نما (QMLE)

این روش بر معادله کلی ارائه شده به صورت رابطه (۵) استوار است.

$$Q_s = CF_{QMLE} \cdot aQ_w^b \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، Q_s رسوب برآوردشده از روش QMLE، CF_{QMLE} ضریب اصلاحی، aQ_w^b رسوب برآوردشده از منحنی‌های سنج (روش USBR) است (عطالو، نظرنژاد، و میریعقوبزاده، ۱۳۹۴).

ر) روش اصلاحگر

یک روش غیرپارامتری بوده که شکل کلی آن به صورت رابطه (۶) است.

$$Q_s = CF_{Smearing} \cdot aQ_w^b \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن، Q_s رسوب برآوردشده از روش Smearing، $CF_{Smearing}$ ضریب اصلاحی، aQ_w^b رسوب برآوردشده از منحنی‌های سنج (روش USBR) است (پاوانلی و بیگی،^۳ ۲۰۰۲).

۳. ارزیابی کارایی روش‌ها

با استفاده از ۲۰ درصد دیگر داده‌های رسوب و دو معیار آماری، دقت پنج روش‌های فوق مورد ارزیابی قرار گرفت. دو معیار عبارت‌اند از جذر میانگین مربع خطا^۴ و میانگین مطلق خطا^۵ که روابط آن‌ها به شرح ذیل است:

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^N |Q_o - Q_e| \quad \text{رابطه ۸}$$

که در این معادلات، Q_o مقدار مشاهداتی در طبیعت و Q_e مقدار رسوب برآوردی است.

1. Jones
2. Endreny & Hassett
3. Pavanelli & Bigi
4. RMSE
5. MAE

۴. روش محاسبه بار بستر

نرخ بار بستر تابع شرایط هیدرولیکی بوده و با افزایش دبی جریان مقدار آن نیز رو به افزایش می‌گذارد و در دبی‌های کم به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. خصوصیات فیزیکی دانه‌ها نیز نقش مهمی در میزان بار بستر ایفا می‌کند (نشریه ۵۹۰، ۱۳۹۱). در برخی کشورهای جهان به‌علت عدم مدیریت صحیح حوزه‌های آبخیز ممکن است بار بستر بیشتر از بار معلق باشد. بررسی‌های انجام گرفته توسط بهادری، اصفهانی و توکلی (۱۳۷۸) نشان می‌دهد که روند تغییرات این نسبت و ارتباط آن با شیب رودخانه تا حدودی از دیدگاه و نظریه کاراشف تبعیت می‌کند. با استفاده از نیمرخ طولی رودخانه که از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه استخراج می‌شود، شیب طولی رودخانه (SR) را در محل ایستگاه آب‌سنجی می‌توان تعیین نمود. با مشخص شدن شیب طولی رودخانه، نسبت بار بستر به بار معلق (k) را می‌توان با استفاده از نمودار تجربی بهادری، اصفهانی و توکلی (۱۳۷۸) تعیین نمود. با مشخص شدن k از نمودار تجربی بهادری، اصفهانی و توکلی (۱۳۷۸)، مقدار بار بستر از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$Q_{sb} = k Q_s \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در این رابطه، Q_{sb} متوسط بار بستر سالیانه (تن)، k نسبت بار بستر به بار معلق و Q_s متوسط بار معلق سالیانه (تن) است. با استفاده از روش‌های موجود نظیر منحنی سنج رسوب و یا روش منحنی بده کلاسه متوسط بار معلق سالانه در دوره آماری تعیین می‌گردد. با استفاده از نیمرخ طولی رودخانه که از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه استخراج می‌شود، شیب طولی رودخانه (SR) را در محل ایستگاه آب‌سنجی می‌توان تعیین نمود. با مشخص شدن شیب طولی رودخانه، نسبت بار بستر به بار معلق (k) را می‌توان با استفاده از نمودار تجربی روش بهادری، اصفهانی و توکلی (۱۳۷۸)، که با تحلیل داده‌های ۱۸ رودخانه ایران، رابطه لگاریتمی معادله (۱۰) برای ضریب K را پیشنهاد کردند:

$$K = \exp(A * (U^* / U) + B * C) \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن، K ضریب انتقال رسوب (بی‌بعد) است. این ضریب نسبت غلظت واقعی رسوب در جریان (C) به غلظت تعادلی یا ظرفیت انتقال رسوب (C) است. U^* سرعت برشی (m/s)، g شتاب گرانش (m/s^2)، R شعاع هیدرولیکی (m) است که غالباً با عمق جریان (d) تقریب زده می‌شود. S شیب انرژی (که معمولاً با شیب کف رودخانه تقریب زده می‌شود). U سرعت متوسط جریان (m/s) و C غلظت رسوب (معمولاً برحسب ppm یا mg/l بیان می‌شود) است. A و B ضرایب تجربی است که توسط بهادری، اصفهانی و توکلی (۱۳۷۸) از برازش منحنی بر روی داده‌ها به دست آمدند. مقادیر پیشنهادی ضرایب A و B: $A = -7.4$ و $B = 0.0012$ (اگر C برحسب ppm باشد) $B = 0.0000012$ (اگر C برحسب mg/l باشد). همچنین با مشخص شدن k از نمودار تجربی نسبت بار بستر به بار معلق در رودخانه‌ها (با لحاظ محدوده‌های کوهستانی و جلگه‌ای پیشنهادشده اشمیت^۱ و همکاران، ۲۰۱۸)، نسبت بار بستر به بار معلق در رودخانه‌ها برای شیب مشخص، مقدار بار بستر محاسبه می‌شود. روش بهادری، اصفهانی و توکلی (۱۳۷۸)، یک روش تجربی مفید و نسبتاً ساده برای برآورد ضریب انتقال رسوب (K) در رودخانه‌های ایران است. این روش با ترکیب پارامترهای U^*/U و C در یک رابطه نمایی، سعی در بهبود دقت برآورد K نسبت به برخی روش‌های قدیمی‌تر دارد. با این حال، مانند همه روش‌های تجربی، محدودیت‌های خود را دارد و نتایج آن باید با احتیاط و با در نظر گرفتن شرایط خاص محل مورد مطالعه تفسیر شوند.

نتایج

تحلیل اقدامات مکانیکی و بندهای آبخیزداری بر ذخیره رسوب حوزه

خلاصه‌ای از اقدامات مکانیکی انجام شده در این حوضه که در پروژه حاضر مورد ارزیابی قرار گرفت، در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین تعداد بند به ترتیب مربوط به بند سنگ ملات، بند گابیونی، بند خشکه‌چین، بند خاکی و بند بتنی است. همچنین تعداد ۳۱۲ خاکریز/آب‌بند توسط جوامع محلی در دو استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری احداث شده است.

جدول ۳ به ترتیب تعداد بندهای آبخیزداری براساس حجم ذخیره رسوب به تفکیک دو استان را نشان می‌دهد. به طور کلی، ۱۶۴۵ بند در استان اصفهان و ۹۰۴ بند در استان چهارمحال و بختیاری کاملاً پر از رسوب یا سازه‌های تراوایی هستند که فاقد ظرفیت برای ذخیره آب هستند. از طرفی، صرفاً ۲۴۲ بند در استان اصفهان و ۱۳۴ بند استان چهارمحال و بختیاری ظرفیت ذخیره آب را دارند.

شایان ذکر است موضوع بسیار مهم درخصوص ذخیره و انتقال رسوب مربوط به وضعیت تخریب و پایداری بندهای آبخیزداری است. تعداد زیادی از بندها که حجم زیادی از رسوب را ذخیره کردند، از لحاظ ساختار، ناپایدارند و اگر مرمت نشوند، در آینده نزدیک احتمال تخریب کامل آن‌ها و انتقال رسوبات ذخیره شده به پایین دست وجود دارد. به طور کلی، از مجموعه بندها در استان اصفهان ۱۲۸۹ کاملاً سالم و ۶۱۲ بند از ۵ تا ۱۰۰ درصد تخریب شده‌اند. از مجموعه بندها در استان چهارمحال و بختیاری، ۷۶۴ بند کاملاً سالم و ۲۹۹ بند از ۵ تا ۱۰۰ درصد تخریب شده‌اند. در سطح حوضه مورد مطالعه ۵۵ بند کاملاً تخریب شده‌اند. برای جلوگیری از انتقال حجم بالای رسوب از این بندهای آسیب به مخزن سد زاینده‌رود و از طرفی، برای جلوگیری از تشدید خطر و خسارت سیل ضرورت دارد این بندها در اولویت مرمت و سامان‌دهی قرار گیرند.

یکی از عوامل مهم برای جلوگیری از انتقال رسوبات ذخیره شده در مخزن بندهای آبخیزداری، تثبیت رسوبات توسط پوشش گیاهی است. بندهای آبخیزداری براساس درصد پوشش گیاهی حفاظتی در سطح مخزن پشت‌بند دسته‌بندی شده است. به طور کلی پشت مخزن ۱۷۳۷ بند فاقد پوشش گیاهی حفاظتی است و این امر منجر به افزایش ناپایداری سازه و گاهی تخریب آن‌ها شده است. براساس نتایج، ۷۸۱ بند دارای ۵ تا ۲۰ درصد پوشش، ۳۸۸ بند دارای ۲۰ تا ۴۰ درصد پوشش، ۴۳ بند دارای ۴۰ تا ۶۰ درصد پوشش، ۷ بند دارای ۶۰ تا ۸۰ درصد پوشش و یک بند دارای ۸۰ تا ۱۰۰ درصد پوشش حفاظتی است.

جدول ۲. فهرست عملیات مکانیکی اجراشده در حوضه سد زاینده‌رود

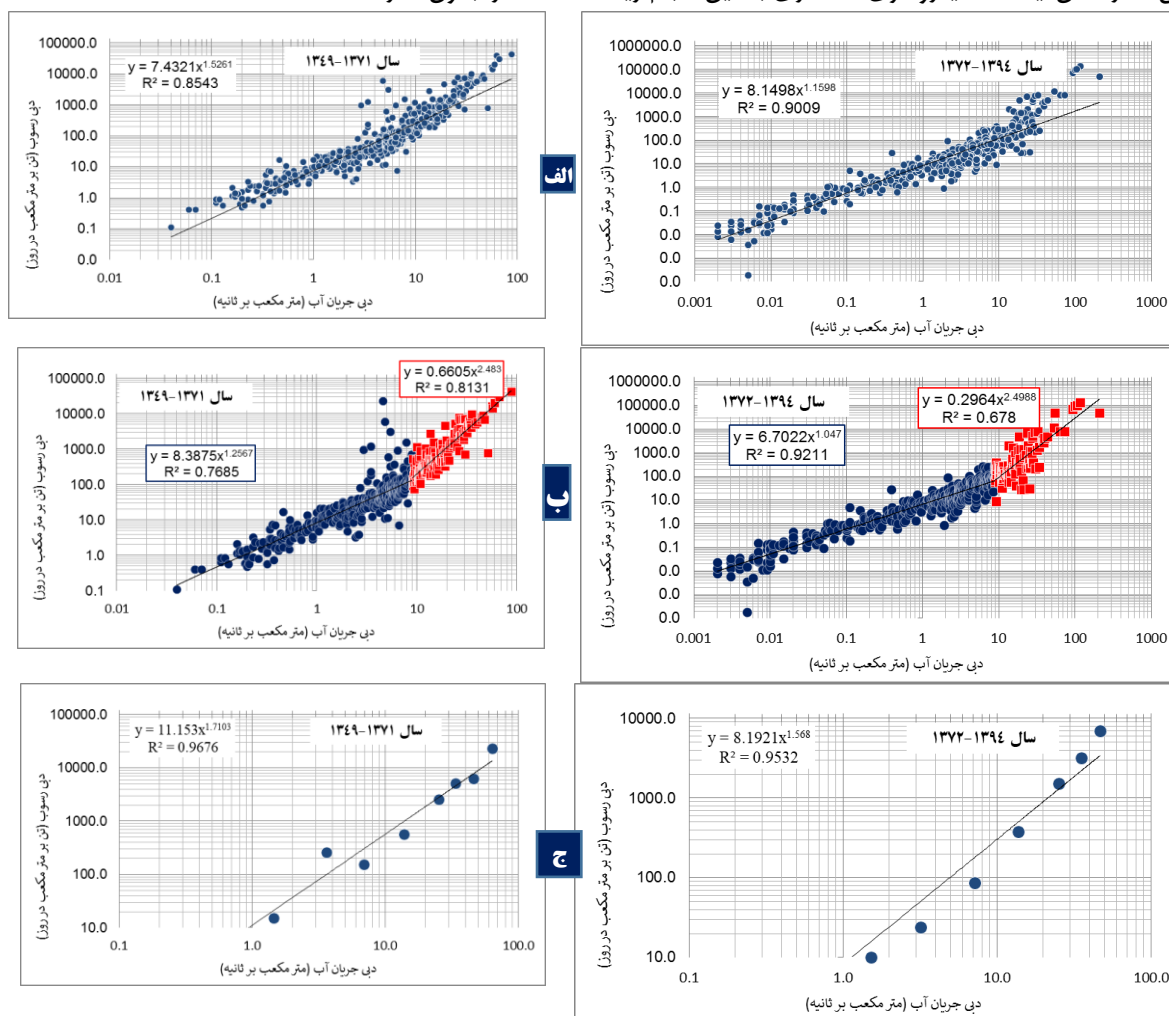
ردیف	نوع عملیات مکانیکی	تعداد	مجموع تعداد
۱	بند سنگ ملات	۱۶۸۱	۲۹۵۶
۲	بند خاکی	۴۱	
۳	بند گابیونی	۶۲۹	
۴	خشکه‌چین	۶۰۳	
۵	بند بتنی	۳	
۶	خاکریز و آب‌بندهای احداث شده در آبراهه‌ها توسط جوامع محلی	۳۱۲	

جدول ۳. دسته‌بندی تعداد بندهای آبخیزداری براساس حجم ذخیره رسوب (متر مکعب) به تفکیک استان

ردیف	حجم ذخیره رسوب	بند سنگ ملات		بند خاکی		بند گابیونی		خشکه‌چین		بند بتنی		مجموع بندها	
		اصفهان	چهارمحال و بختیاری	اصفهان	چهارمحال و بختیاری	اصفهان	چهارمحال و بختیاری	اصفهان	چهارمحال و بختیاری	اصفهان	چهارمحال و بختیاری	اصفهان	چهارمحال و بختیاری
۱	۰	۱۸	۱۴	۰	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰	۰	۲۸	۱۴
۲	۰-۲۰	۱۹	۱۹	۰	۰	۴۸	۶	۵۸	۱۵۶	۰	۰	۱۲۶	۱۸۱
۳	۲۰-۵۰	۱۷۹	۸۷	۰	۰	۲۳۲	۳۲	۱۹۱	۲۷	۰	۰	۶۰۲	۱۳۸
۴	۵۰-۱۰۰	۲۰۱	۷۴	۰	۰	۲۱۶	۶	۱۱۵	۰	۰	۰	۵۳۲	۸۰
۵	۱۰۰-۲۰۰	۱۷۱	۲۲۲	۱	۰	۵۵	۶	۴۶	۰	۰	۰	۲۷۴	۲۲۸
۶	۲۰۰-۵۰۰	۱۸۰	۲۰۰	۱	۱	۲۴	۳	۰	۰	۱	۰	۲۰۸	۲۰۴
۷	۵۰۰-۱۰۰۰	۸۲	۱۰۰	۴	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۸۸	۱۰۰
۸	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۴۰	۷۵	۸	۱۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۴۹	۸۵
۹	۱۰۰۰۰-۵۰۰۰۰	۳	۱	۵	۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸	۱۰
۱۰	بیش از ۵۰۰۰۰	۱	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲

منحنی‌های سنجۀ رسوب

منحنی سنجۀ یک‌خطی، دوخطی و حدوسط ایستگاه‌ها، حاصل از روش USBR در شکل ۲ ارائه شده است. برای تهیه منحنی سنجۀ دوخطی پس از ترسیم نمودار منحنی تجمعی دبی رسوب و دبی آب، مناسب‌ترین نقطه تغییر شیب ناگهانی منحنی تجمعی رسوب و دبی جریان متناظر با آن مورد بررسی قرار گرفت. دامنه دسته‌ها برای ترسیم منحنی سنجۀ حد وسط در دو دوره آماری مذکور نیز برحسب تغییرات شیب منحنی تجمعی رسوب و دبی آب تعیین شد. نتایج مناسب‌ترین منحنی سنجۀ برای برآورد بار معلق تن‌ها در محل ایستگاه هیدرومتری اسکندری به‌دلیل حجم زیاد اطلاعات در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳. منحنی سنجۀ (الف) یک‌خطی؛ (ب) دوخطی و (ج) حد وسط ایستگاه هیدرومتری اسکندری در دو دوره آماری براساس روش USBR

انتخاب مناسب‌ترین روش منحنی سنجۀ و ضرایب اصلاحی برای ایستگاه‌های هیدرومتری

در این مرحله، مقادیر برآوردی حاصل از سه منحنی سنجۀ رسوب شامل هشت معادله سنجۀ با و بدون احتساب ضرایب اصلاحی با مقادیر مشاهده‌ای (۲۰ درصد از کل داده‌ها) مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به اینکه منحنی سنجۀ دوخطی دارای دو معادله است، در مرحله برآورد رسوب با استفاده از این دو معادله، مقادیر رسوب در قالب روش دوخطی محاسبه شد. برای انتخاب مناسب‌ترین منحنی سنجۀ و ضرایب اصلاحی، مقادیر برآوردی روش‌های مذکور با مقادیر مشاهده‌ای با استفاده از معیارهای کارایی R.M.S.E و M.A.E مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. درنهایت، روشی که در مجموع کمترین خطاهای آماری را در مقایسه با سایر روش‌ها داشته باشد، به‌عنوان روش مناسب برای برآورد دبی رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه معرفی شد. نتایج برآورد روش‌های منحنی سنجۀ و ضرایب اصلاحی برای هریک از ایستگاه‌های هیدرومتری با ۲۰ درصد آمار بار معلق باقی‌مانده (به‌عنوان آمار مشاهده‌ای)

مقایسه گردید و سپس با نرم افزار R مناسب ترین روش منحنی سنج و ضرایب اصلاحی برای ایستگاه های هیدرومتری مشخص شد (جدول ۴).

جدول ۴. نتایج مناسب ترین منحنی سنج و روش های ضریب اصلاحی برای برآورد بار معلق در محل ایستگاه های هیدرومتری

ردیف	ایستگاه	منحنی سنج	نوع ضریب اصلاحی	مقادیر
۱	چلگرد	حد واسط	MVUE	۱/۰۲۲
۲	دره نمکی	حد واسط	Smearing	۱/۰۳۶
۳	وحدت آباد	حد واسط	MVUE	۱/۰۲۵
۴	دیمه	حد واسط	Smearing	۱/۰۳۵
۵	خراسانک	دوخطی	QMLE	۱/۰۲۸
۶	اسکندری	دوخطی	MVUE	۱/۰۲۱
۷	قلعه شاهرخ	دوخطی	MVUE	۱/۰۳۱
۸	حیدری	یک خطی	MVUE	۱/۰۲۸
۹	مندرجان	دوخطی	Smearing	۱/۰۳۹

نتایج نشان داد که روش های منحنی سنج رسوب بدون ضرایب اصلاحی، مقادیر کمتر از میزان واقعی دبی رسوب را برآورد می کنند و در بین این روش ها به ترتیب روش منحنی یک خطی، دوخطی و حد وسط کمترین مقدار رسوب را برآورد نموده اند. از طرفی، نتایج مربوط به روش های منحنی سنج با ضرایب اصلاحی نشان داد که ضریب اصلاحی FAO در همه روش های منحنی سنج نسبت به سایر روش ها دارای بیش تخمینی است.

برآورد تغییرات مقادیر بار معلق انتقالی در محل ایستگاه های هیدرومتری

در این بخش براساس مناسب ترین منحنی سنج و روش های ضریب اصلاحی و همچنین آمار روزانه دبی، تغییرات مقادیر بار معلق انتقالی در محل ایستگاه های هیدرومتری در طول دوره آمار محاسبه گردید. حجم آب سالیانه انتقالی و میزان رسوب معلق انتقال به صورت نمونه برای ایستگاه هیدرومتری اسکندری نمایش داده شده است. بر این اساس در جدول ۵، برآورد حداکثر انتقال رسوب (تن در سال) و سال وقوع آن در محل ایستگاه های هیدرومتری و همچنین برآورد متوسط حداکثر و حداقل انتقال رسوب (تن در سال) و دوره وقوع آن در محل ایستگاه های هیدرومتری ارائه شده است.

جدول ۵. بررسی میزان انتقال رسوب معلق در ایستگاه های مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	حداکثر انتقال رسوب (تن در سال)	سال وقوع	متوسط حداکثر انتقال رسوب (تن در سال)	دوره زمانی	متوسط حداقل انتقال رسوب (تن در سال)	دوره زمانی
۱	چلگرد	۱۰۸۰۰	۱۳۶۰	۹۸۰۰	۱۳۶۵-۱۳۶۱	۱۸۰۰	۱۳۹۶-۱۴۰۰
۲	دره نمکی	۴۲۰۰	۱۳۹۲	۲۸۸۰۰	۱۳۹۵-۱۳۹۱	۱۲۰۰۰	۱۳۹۶-۱۴۰۰
۳	وحدت آباد	۲۶۴۰۰	۱۳۹۷	۱۵۰۰۰	۱۳۹۵-۱۳۹۱	۹۶۰۰	۱۳۸۶-۱۳۹۰
۴	دیمه	۲۸۸۰	۱۳۹۷	۱۲۴۰۰	۱۳۹۰-۱۳۸۶	۱۹۰۰	۱۳۸۶-۱۳۹۰
۵	خراسانک	۵۷۶۰۰	۱۳۸۴	۳۰۰۰۰	۱۳۸۵-۱۳۸۱	۹۶۰۰	۱۳۹۶-۱۴۰۰
۶	اسکندری	۲۶۵۰۰۰	۱۳۵۸	۹۵۰۰۰	۱۳۶۰-۱۳۵۶	۱۰۰۰۰	۱۳۷۶-۱۳۸۰
۷	قلعه شاهرخ	۱۲۰۰۰۰	۱۳۷۷	۵۰۰۰۰	۱۳۸۰-۱۳۷۶	۱۰۰۰۰۰	۱۳۷۶-۱۳۸۰
۸	حیدری	۱۴۴۰۰	۱۳۸۱	۴۵۰۰	۱۳۸۵-۱۳۸۱	۶۰	۱۳۹۶-۱۴۰۰
۹	مندرجان	۲۴۰۰۰	۱۳۵۹	۲۴۰۰۰	۱۳۶۰-۱۳۵۶	۴۸	۱۳۹۶-۱۴۰۰

مقادیر بار بستر و رسوب کل

همان‌طور که تشریح گردید، تنها روش ممکن برای برآورد بار بستر در حوضه مورد مطالعه استفاده از پارامترهای فیزیوگرافی و آمار بار معلق (بهادری، اصفهانی، و توکلی، ۱۳۷۸) است که با توجه موقعیت جغرافیایی و اینکه تنها ایستگاه هیدرومتری قلعه شاهرخ و اسکندری دارای آمار بلندمدت بار معلق می‌باشد، نتایج آن‌ها را می‌توان در برآورد بار رسوب کف در نظر گرفت و برای سایر ایستگاه‌ها هم تعمیم داد.

به این ترتیب نتایج برآورد بار کل رسوب (بار معلق و بار کف) نشان می‌دهد که متوسط انتقال کل رسوب به مخزن سد زاینده‌رود (تن در سال) برحسب مجموع مقادیر در ایستگاه‌های قلعه شاهرخ، اسکندری، حیدری و مندرجان (کل رسوبات انتقالی به مخزن سد) برای دهه‌های مختلف محاسبه شد.

نتایج به تفکیک و برای دهه‌های مختلف محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. یافته‌ها در جدول نشان می‌دهد که متوسط انتقال کل رسوب به مخزن سد زاینده‌رود برای دهه ۱۳۵۰، معادل ۳۸۵۰۰۰ تن در سال، برای دهه ۱۳۶۰ معادل ۵۱۰۰۰۰ تن در سال، برای دهه ۱۳۷۰ معادل ۵۸۰۰۰۰ تن در سال، برای دهه ۱۳۸۰ معادل ۳۶۰۰۰۰ تن در سال، برای دهه ۱۳۹۰ معادل ۲۴۰۰۰۰ تن در سال است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، بیشترین انتقال رسوب مربوط به ایستگاه اسکندری و قلعه شاهرخ به ترتیب با مقدار ۷۵۰۰۰ و ۲۴۰۰۰۰ تن برای دهه ۵۰ شمسی می‌باشد.

جدول ۶. متوسط انتقال رسوب (تن در سال) برای دهه‌های مختلف در محل ایستگاه‌های هیدرومتری

ایستگاه	متوسط انتقال رسوب (تن در سال)				
	دهه ۵۰	دهه ۶۰	دهه ۷۰	دهه ۸۰	دهه ۹۰
چلگرد	۸۸۰۰	۸۵۰۰	۶۸۰۰	۳۴۰۰	۳۰۰۰
دره‌نمکی	فاقد آمار	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۹۵۰۰	۲۰۴۰۰
وحدت‌آباد	فاقد آمار	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۰۰۰۰	۱۴۷۰۰
دیمه	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۸۰۰	۲۲۰۰	۲۱۶۰
خراسانک	فاقد آمار	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۸۰۰۰	۸۴۰۰
اسکندری	۷۵۰۰۰	۴۳۰۰۰	۴۰۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۰۰۰۰
قلعه شاهرخ	۲۴۰۰۰۰	۴۲۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۲۶۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
حیدری	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۳۶۰
مندرجان	۲۴۰۰۰	۱۲۰۰۰	۶۰۰۰	۳۶۰۰	۶۰۰

ارزیابی اثرات اقدامات اجرایی آبخیزداری در وضعیت انتقال و ذخیره رسوب در حوزه و بر کاهش حجم رسوبات مخزن سد زاینده‌رود

در این بخش و برای محاسبه حجم رسوبات پشت چک‌دم‌ها و سازه‌های آبخیزداری، براساس نتایج بازدید و اندازه‌گیری میدانی، موقعیت و مشخصات بندهای آبخیزداری در هر زیرحوزه و بالادست ایستگاه‌های رسوبی سنجی محاسبه و اثرات اقدامات آبخیزداری بر تله‌اندازی رسوب و کاهش حجم رسوبات مخزن سد زاینده‌رود بررسی شد. به این ترتیب که ابعاد تک‌تک سازه‌ها دوباره اندازه‌گیری مستقیم گردید و حجم پشت آن محاسبه شد. به دو دلیل، نخست اینکه بعضی سازه‌ها در سال‌های بسیار دور ساخته شده بودند و دوم اینکه در زمان اجرا و با توجه به شرایط محیطی تغییراتی در ابعاد سازه‌ها ایجاد شده بود، در برخی موارد اطلاعات دقیقی در بانک اطلاعات آبخیزداری برای آن‌ها وجود نداشت و اندازه‌گیری تمام ابعاد سازه‌ها در دو استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری بایستی به صورت میدانی انجام می‌گردید. نتایج نشان می‌دهد که به تفکیک نوع سازه به ترتیب بندهای سنگ ملاتی حدود ۷۵۳۶۰۰، بندهای خاکی حدود ۵۰۹۷۰۰، بندهای گابیونی حدود ۳۹۵۰۰، بندهای خشک‌چین حدود ۲۲۹۰۰، بندهای بتنی حدود ۲۵۵۰ و خاکریز و آب‌بندهای احداث شده در آبراهه‌ها توسط جوامع محلی حدود ۱۳۶۰۰ متر مکعب رسوب در پشت سازه ذخیره کرده‌اند. با

توجه به نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که با احداث بندهای آبخیزداری، در مجموع رسوبات ذخیره‌شده در پشت‌بندهای آبخیزداری حدود ۱۰۲۳۰۰۰ متر مکعب است؛ لذا این سازه‌ها منجر به کاهش انتقال این میزان رسوب به مخزن سد زاینده‌رود شده است. اما با توجه به اینکه حدود ۴۵ درصد از بندهای آبخیزداری بین ۵ تا ۱۰۰ آسیب دیده و تخریب شده‌اند، در صورت عدم مرمت و سامان‌دهی آن‌ها، خطر انتقال ۵۰ درصد از رسوبات ذخیره‌شده به پایین‌دست و مخزن سد زاینده‌رود وجود دارد.

جدول ۷، حجم رسوب ذخیره‌شده، پتانسیل حجم آب قابل ذخیره در شرایط موجود و ظرفیت خالی مخزن برای ذخیره آب و رسوب (m3) بندهای آبخیزداری اجراشده در حوضه سد زاینده‌رود و جدول ۸، نتایج برآورد انتقال رسوب در محل ایستگاه‌های هیدرومتری (تن در سال) و حجم رسوبات ذخیره‌شده توسط بندهای آبخیزداری بالادست حوضه ایستگاه‌های هیدرومتری (متر مکعب) ارائه شده‌اند.

جدول ۷. حجم رسوب ذخیره‌شده، پتانسیل حجم آب قابل ذخیره در شرایط موجود و ظرفیت خالی مخزن برای ذخیره آب و رسوب (m3)

بندهای آبخیزداری اجراشده در حوضه سد زاینده‌رود

ردیف	نوع عملیات مکانیکی	تعداد	ظرفیت خالی مخزن برای ذخیره آب (m3)	پتانسیل حجم آب و رسوب قابل ذخیره در شرایط موجود (m3)	حجم رسوب ذخیره‌شده (m3)
۱	بند سنگ ملات	۱۶۸۱	۱۰۹۱۴۱۰	۳۳۷۷۳۹	۵۶۰۸۲۱
۲	بند خاکی	۴۱	۳۸۲۳۸۱۴	۳۳۱۴۰۸۶۷	۴۰۵۰۸۷
۳	بند گابیونی	۶۲۹	۰	۰	۳۹۵۳۲
۴	خشکه‌چین	۶۰۳	۰	۰	۱۷۴۳۲
۵	بند بتنی	۳	۲۵۴۷	۰	۲۵۴۷
۶	خاکریز و آب‌بندهای احداث‌شده در آبراهه‌ها توسط جوامع محلی	۳۱۲	۱۲۶۰۰۰	۱۱۲۵۴۵	۱۳۵۸۸

جدول ۸. خلاصه مقایسه بین نتایج برآورد انتقال رسوب در محل ایستگاه‌های هیدرومتری (تن در سال) و حجم رسوبات ذخیره‌شده توسط

بندهای آبخیزداری بالادست حوضه ایستگاه‌های هیدرومتری (متر مکعب)

ردیف	ایستگاه	کد ایستگاه	رودخانه	متوسط انتقال رسوب بین حوضه‌ای (تن در سال)					حجم رسوبات ذخیره‌شده توسط بندهای آبخیزداری بالادست حوضه ایستگاه‌های هیدرومتری (متر مکعب)				
				دهه ۵۰	دهه ۶۰	دهه ۷۰	دهه ۸۰	دهه ۹۰	سنگ ملات	بند خاکی	گابیون	خشکه‌چین	مجموع سازه‌ها
۱	چلگرد	۴۲۰۰۱	تونل اول کوهرنگ	۸۸۰۰	۸۵۰۰	۶۸۰۰	۳۴۰۰	۳۰۰۰	-	-	-	-	-
۲	دره‌نمکی	۴۲۵۱۴	جمع تونل اول و دوم کوهرنگ	فاقد آمار	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۹۵۰۰	۲۰۴۰۰	۸۴۳۰	-	-	۰.۱۰۳	۸۵۳۲.۹
۳	وحدت‌آباد	۴۲۰۰۶	تونل چشمه لنگان	فاقد آمار	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۰۰۰۰	۱۴۷۰۰	۳۴۴۸	۳۵۶۱۶	۸۴۰	۲۱	۳۹۹۲۵
۴	دیمه	۴۲۷۱۱	چشمه دیمه	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۸۰۰	۲۲۰۰	۲۱۶۰	۵۹۴۸۸	۲۸۸۷.۵	-	۹.۰۶	۶۳۲۸۱.۵
۵	خراسانک	۴۲۰۰۲	دره گاو	فاقد آمار	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۸۰۰۰	۸۴۰۰	۱۲۵۹۹۲.۲	-	۲۹۴۷۶	۴۸۶۲	۱۶۰۳۳۷
۶	اسکندری	۴۲۰۰۵	پلاسجان	۷۵۰۰۰	۴۳۰۰۰	۴۰۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۰۰۰۰	۱۷۲۰۵۳	۱۲۸۸۰.۸	۲۰۰۱	۱۱۲۲۶	۳۱۴۰۸۸
۷	قلعه شاهرخ	۴۲۰۰۳	زاینده‌رود	۲۴۰۰۰۰	۴۲۰۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۲۶۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۳۷۴۰۰۰	۲۷۱۴۹۸	۳۷۳۷۵	۵۸۱۴	۶۸۸۶۸۶
۸	حیدری	۴۲۶۷۲	دراز دره	فاقد آمار	فاقد آمار	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۳۶۰	۸۷۱۷۹	۸۴۸۸۲	-	-	۱۷۲۰۶۱
۹	مندرجان	۴۲۰۴۷	سمندگان	۲۴۰۰۰	۱۲۰۰۰	۶۰۰۰	۳۶۰۰	۶۰۰	۱۴۷۶۸	۴۷۸۲.۴	۵۶	۳۹۲	۱۹۹۹۸
۱۰	حوضه سد زاینده‌رود			۳۸۵۰۰۰	۵۱۰۰۰۰	۵۸۰۰۰۰	۳۶۰۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۵۶۰۸۲۱	۴۰۵۰۸۷	۳۹۴۳۲	۱۷۴۳۲	۱۰۲۲۷۲۲

بحث و نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش‌های منحنی سنجه رسوب بدون اعمال ضرایب اصلاحی، به برآورد مقادیر کمتری از میزان واقعی دبی رسوب منجر می‌شود. در این میان، منحنی یک‌خطی کمترین میزان رسوب را برآورد کرده و پس از آن منحنی‌های دوخطی و حد واسط قرار دارند. این یافته تأکید بر اهمیت استفاده از ضرایب اصلاحی به منظور افزایش دقت در برآورد دبی رسوب دارد. با بررسی نتایج مقادیر خطای RMSE و MAE مشخص می‌گردد در ایستگاه‌های خراسانک، اسکندری، قلعه شاهرخ و مندرجان منحنی سنجه رسوب دوخطی مناسب‌ترین روش آماری برآورد رسوب معلق است، و در ایستگاه‌های چلگرد، دره‌نمکی، وحدت‌آباد و دیمه منحنی سنجه حد واسط مناسب‌ترین روش آماری برآورد بوده، اما در ایستگاه حیدری مناسب‌ترین روش برآورد سنجه رسوب یک‌خطی است. نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه حیدری جریان پایدار حاکم است و پراکندگی میزان داده‌ها کمتر از سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه است (کریمی و همکاران، ۱۴۰۲؛ علوی و همکاران، ۱۴۰۳). در این ایستگاه‌ها منحنی سنجه رسوب دوخطی نتایج بهتری را نسبت به سایر روش‌ها به دست آورد (مولر^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). در ایستگاه‌های چلگرد، دره‌نمکی، وحدت‌آباد و دیمه حد واسط بهترین نتایج را به ما نشان داد که در این مورد می‌توان به پراکندگی بالای داده‌ها و وجود یک رابطه غیرخطی پیچیده بین دبی و رسوب اشاره کرد (شهیری طبرستانی و افضلیمهر، ۱۳۹۹). در این تحقیق نتایج نشان داد ضریب اصلاحی فائو نسبت به سایر ضرایب اصلاحی بیش تخمینی دارد و به این معناست که روش FAO غالباً مقدار رسوب را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند (بیات، بندر، و لطفی، ۱۳۹۲). درمقابل، بررسی روش‌های منحنی سنجه با ضرایب اصلاحی نشان داد که ضریب اصلاحی FAO در تمامی روش‌های منحنی سنجه، نسبت به سایر روش‌ها دارای بیش تخمینی است. این نتیجه با یافته‌های سایر مطالعات همخوانی دارد و بیانگر این است که ضریب FAO ممکن است در برخی شرایط، مقادیر رسوب را بیشتر از میزان واقعی تخمین بزند. این امر می‌تواند ناشی از ویژگی‌های خاص حوضه آبریز مورد مطالعه یا محدودیت‌های موجود در روش FAO باشد. تحلیل تغییرات مقادیر بار معلق انتقالی در ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد که ایستگاه‌های اسکندری و قلعه شاهرخ به ترتیب بیشترین مقادیر انتقال رسوب را در دهه‌های ۵۰ و ۷۰ شمسی داشته‌اند. این امر می‌تواند تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی در حوضه آبخیز زاینده‌رود باشد. همچنین، کاهش متوسط انتقال رسوب در دهه‌های اخیر می‌تواند ناشی از اجرای پروژه‌های کنترل رسوب و تغییرات در الگوهای بارش باشد. نبود آمار مربوط به بار بستر و پارامترهای هیدرولیکی و قطر رسوبات در ایستگاه‌های مورد مطالعه، امکان استفاده از معادلات کاربردی برای برآورد بار بستر را محدود کرد. با این حال، با استفاده از پارامترهای فیزیوگرافی و آمار بار معلق، امکان برآورد بار بستر در حوضه مورد مطالعه فراهم شد. در این پژوهش، کارایی روش‌های مختلف منحنی سنجه رسوب و ضرایب اصلاحی در برآورد بار معلق در حوزه سد زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از ضرایب اصلاحی مناسب می‌تواند به طور قابل توجهی دقت برآورد دبی رسوب را افزایش دهد. با این حال، ضریب اصلاحی FAO در این مطالعه دارای بیش تخمینی بود و استفاده از آن توصیه نمی‌شود. به طور کلی، منحنی‌های سنجه حد واسط با ضرایب اصلاحی MVUE و Smearing و منحنی‌های سنجه دوخطی با ضرایب اصلاحی QMLE و MVUE بهترین عملکرد را در برآورد بار معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری مختلف داشتند. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان راهنمایی برای انتخاب روش مناسب برآورد رسوب در مطالعات آبی مورد استفاده قرار گیرند.

سپس سهم اثر تجمعی رسوبات ذخیره‌شده توسط بندهای آبخیزداری که مانع از انتقال این رسوبات به پایین دست شده، بررسی شده است. شایان ذکر است مقادیر ذخیره رسوب توسط بندهای آبخیزداری مربوط به اندازه‌گیری میدانی در اوایل بهار ۱۴۰۲ است و لذا امکان ارتباط ذخیره رسوب پشت سازه‌های آبخیزداری با مقادیر انتقال رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری در طی دوره آماری بلندمدت وجود ندارد؛ اما می‌توان بیان نمود به طور کلی حجم ذخیره رسوب توسط مجموع بندهای آبخیزداری در دو استان اصفهان و چهارمحال و بختیاری (۱۰۲۳۰۰۰ متر مکعب) با چگالی متوسط ۱/۴ تن بر متر مکعب، تقریباً حدود ۴ سال انتقال رسوب در دهه ۱۳۸۰ (۳۸۵ هزار تن در سال رسوب کل) و یا ۵ سال انتقال رسوب در دهه ۱۳۹۰ (۲۴۰ هزار تن در سال رسوب کل) در مجموع همه

ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه برای ورود به مخزن سد زاینده‌رود بوده که حجم قابل توجهی است؛ به این مفهوم که اگر این بندها نبودند، این رسوبات وارد مخزن سد می‌شدند.

اما با توجه به اینکه حدود ۴۵ درصد از بندهای آبخیزداری بین ۵ تا ۱۰۰ درصد آسیب دیده و تخریب شده‌اند، در صورت عدم مرمت و سامان‌دهی آن‌ها، خطر تقریبی انتقال ۵۰ درصد از رسوبات ذخیره‌شده به پایین‌دست و مخزن سد زاینده‌رود و همچنین تشدید خطر افزایش رسوب در سال‌های آینده وجود دارد. تحلیل حاضر بخشی از فرایندهای مؤثر بر روابط اکوهیدرولوژی مؤثر بر تغییرات رسوبات مخزن سد است و تحلیل فرسایش در حوزه آبخیز مورد مطالعه و روابط آن با تغییرات پوشش گیاهی و کاربری اراضی در شرایط تغییر اقلیم می‌تواند به درک درست روابط حاکم بر فرایند مدیریت انتقال رسوب از بالادست تا پایین‌دست حوزه آبخیز سد زاینده‌رود کمک بیشتری نماید.

تقدیر و تشکر

به‌طور ویژه از مدیرعامل، اعضای هیئت‌مدیره و کارشناسان شرکت دانش‌بنیان نوآوران علوم مکانی که نقش اصلی را در اجرای میدانی این پروژه داشته‌اند و کارشناسان معاونت آبخیزداری، امور مراتع و بیابان سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور به خاطر همکاری‌ها و تلاش‌هایشان در این پروژه سپاسگزاری می‌گردد.

References

- Ajao, A. (2024). *Recent Advancements in Sediment Transport Modelling in Reservoirs*.
- Allawi, M. F., Sulaiman, S. O., Sayl, K. N., Sherif, M., & El-Shafie, A. (2023). Suspended sediment load prediction modelling based on artificial intelligence methods: The tropical region as a case study. *Heliyon Journal*, 9(8), e18506.
- Anari, R. (2022). *Economic and Hydraulic Simulation Models for Evaluation of Sediment Management in a Reservoir* (Doctoral dissertation, Brigham Young University).
- Atalo, N., Nazarnejad, H., & Miriaghoubzadeh, M.H. (2015). The First National Conference on Tourism, Ecotourism and Sustainable Development, 15 pp.
- Azadi, G., Naderi, M., & Afzali Mehr, H. (2021). Prediction of bed sediment transport rate in sandy rivers using Gaussian process regression. *20th Iranian Hydraulics Conference*.
- Azizi, Sh., ildoromi, A., & Nouri, H. (2019). The impact of cross-sectional changes on flooding and sediment transport capacity of the Abshineh River in Hamedan. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(2), 189-209.
- Azizian, A. H., Haghiabi, A. H., Torabi, H., & Maleki, A. (2019). Modeling of erosion and sediment transport in rivers using the Gstars3 model. *Iranian Water Researches Journal*, 13(2), 51-60.
- Bayat, I., Bandar, D., & Lotfi, S. (2013). Technical note: Calibration of the sediment rating curve method in estimating sediment yield of the Qezel Ozan basin based on Sefidrood dam data. *Iranian Journal of Soil and Water Research (Agricultural Sciences)*, 44(3), 321-327. Retrieved from <https://sid.ir/paper/498476/fa>
- Bahadori, M., Esfahani, M.R., & Tavakoli, M.R. (2007). Estimation of Sediment Transport Coefficient in Rivers. *Journal of Applied Sciences*, 7(24), 3907-3912.
- Basumatary, M. M., Wary, P., Maji, S., & Kumar, B. (2024). Advanced intelligence model for prediction of sediment transport rate and friction factor in alluvial channel. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 7(6), 5915-5931.
- Donyadideh, M., & Rostami Ravari, A. (2016). *Evaluation of sediment equations in estimating the suspended load of the Dalaki River*. Iranian Hydraulics Conference.
- Endreny, Th., & Hassett, J. (2005). Robustness of pollutant loading estimators for sample size reduction in a suburban watershed. *Intl. J. River Basin Management (IAHR & INBO)*, 3, 53-66
- Fardi, S. (2022). Investigation of suspended load concentration using direct measurement in sandy rivers (Case study: Babol Rood River). *National Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering, and Environment*.
- Golmaee, S. H., Zia Tabar Ahmadi, M., & Batny, A. (2015). The study of sediment transport and the changes of river bed using Gstars3 Mathematical model (Case study: GavehRoud River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(1), 191-210.
- Guide to calculating suspended sediment load and river bed, publication*. (2012). Presidential Vice President for Strategic Planning and Supervision, Technical System Affairs, 590.
- Heng, S., & Suetsugi, T. (2014). Development of a regional model for catchment-scale suspended sediment yield estimation in ungauged rivers of the Lower Mekong Basin. *Geoderma*, 235-236, 334-346. In support of Chapter 3.
- Jones, K.R., Berney, Q., Carr, D.P., & Barret, E.C. (1981). Arid zone hydrology for agricultural development. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 37, 271 p.
- Karami, H., DadrasAjirlou, Y., Jun, C., Bateni, S. M., Band, S. S., Mosavi, A., & Chau, K. W. (2022). A novel approach for estimation of sediment load in Dam reservoir with hybrid intelligent algorithms. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 821079.
- Kheirfam, H., Kheirfam, B., Azhdan, Y., & Hoseini, S. (2018). Variability of bed load, suspended load, and bed-to-suspended load ratio in the Ghatourchai River. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 410-420.
- Khodashenas, S. R., & Yarahmadi, N. (2009). Comparison of suspended sediment measurement methods in rivers. 8th International River Engineering Seminar, Ahvaz, Iran.
- Mohammadi, S., Hassanpour, F., Sharif Azari, S., & Foroughi, F. (2021). Evaluation of modern regression methods for estimating suspended sediment load in the Sistan River. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 12(46), Winter.

- Moradinejad, A. (2024). Suspended load modeling of river using soft computing techniques. *Water Resources Management*, 38(6), 1965-1986.
- Müller, O. V., McGuire, P. C., Vidale, P. L., & Hawkins, E. (2024). River flow in the near future: a global perspective in the context of a high-emission climate change scenario. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(10), 2179-2201.
- Najafi, S., Dragovich, D., Heckmann, T., & Sadeghi, S. H. (2021). Sediment connectivity concepts and approaches. *Catena*, 196, 104880.
- National Technical and Executive System. (2007). Guidelines for erosion and sediment studies in river management (Publication No. 383).
- Pavanelli, D., & Pagliarani, A. (2002). Monitoring water flow, turbidity and suspended sediment load, from an Apennine catchment basin, Italy. *Biosystems Engineering*, 83(4), 463-468.
- Ratton, P., Bleninger, T. B., Pereira, R. B., & Gonçalves, F. V. (2022). Bedload sediment transport estimation in sand-bed rivers comparing traditional methods and surrogate technologies. *Applied Sciences*, 13(1), 5.
- Sadeghi, S. H., Moatamednia, M., & Behzadfar, M. (2011). Spatial and temporal variations in the rainfall erosivity factor in Iran. *Journal of agricultural science and technology (JAST)*, 13(3), 451-464.
- Sadeghi, S.H., Moosavi, V., Karami, A., & Behnia, N. (2012). Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method. *Journal of Hydrology*, 448, 174-180.
- Sadeghi, S. H., Kheirfam, H., & Darki, B.Z. (2020). Controlling runoff generation and soil loss from field experimental plots through inoculating cyanobacteria. *Journal of Hydrology*, 585, 124814.
- Samadian Fard, S., Ghorbani, M. A., Hoseini Lor, R., Hosseinzadeh Dalir, A., & Farsadizadeh, D. (2007). Selection of the most suitable methods for estimating suspended and bed load in the Ahar Chai River (upstream of Sattarkhan Dam). *Agricultural Research*, 7(3), 91-101.
- Saghbian, S. M. (2021). Estimating suspended sediment load using intelligent hybrid methods considering model uncertainty. *Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 35(4), 475-488.
- Schmidt, S., Alewell, C., & Meusburger, K. (2018) Mapping spatio-temporal dynamics of the cover and management factor (C-factor) for grasslands in Switzerland. *Remote Sens Environ*, 211, 89-104.
- Shahiri Tabarestani, E., & Afzalimehr, H. (2020). Estimation of annual erosion and sediment yield in Babolrood watershed using MPSIAC model. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 6(3), 192-205.
- Shojaeian, Z., & KHodabakhshi, H. (2017). Calculation of Sediment Entering a Karoon River Using GSTARS 3. *Water Engineering*, 5(2), 122-130.
- Shmakova, M. (2022). Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In *Modeling of Sediment Transport*. IntechOpen.
- Tajmehr, R., Hasounizadeh, H., & Abdeveis, S. (2014). Assessment of reservoir sedimentation by mathematical model GSTARS3 on Masjed Soleyman dam in Khuzestan Province-Iran. *Journal of Water Science & Engineering*, 4(10), 7-18.
- Yang, C.T., & Simoes, F.J.M. (1998). Application of Gstars to River Sedimentation Studies. *9th ISAS, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort. Collins*, 8 pp.
- Yang, C.T., & Simoes, F.J.M. (2002). Numerical model for reservoirs sedimentation. *Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort. Collins*, 139, 018-032.