

Estimation of Useful Life of Dam Reservoir Using Sedimentation Model (Case Study: Zirdan Dam Sistan and Baluchestan)

Gholamhossein Akbari^{1*}  | Iman Lotfi²  | Kolsom JahanTigh³ 

¹Associate Professor, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Bojnourd University, Bojnourd, Iran.

²Master's student, Department of Water and Hydraulic structures, Faculty of Civil Engineering, Bojnourd University, Bojnourd, Iran.

³Master's, Department of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Sisan and Baluchistan University, Zahedan, Iran.

Corresponding Author's E-mail: akbari@ub.ac.ir

Received: 22 May 2024 Accepted: 16 Nov. 2024
Revised: 10 Aug. 2024 Published: 21 Apr. 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Dams are among the best human-made structures to fulfill one or more main goals, energy production, supply of agricultural water, drinking water and also to achieve secondary goals such as flood control, fish breeding, creating recreational space, injecting water into underground aquifers. shipping, etc. are considered. The purpose of this research is to estimate the useful life of the dam reservoir using sedimentation models, therefore, in this research, GSTARS and HEC-RAS models were used for the reservoir of Zirdan dam to estimate the sediments in Zirdan dam reservoir. Based on the calculations made by the numerical model, the volume of 50-year sediments is estimated to be 21million cubic meters. According to the results of the numerical model, the useful life of the dam, i.e. the period when 80 percent of the initial volume of the dam is replaced by sediments, is estimated to be 123 years.

Keywords: Sedimentation, Kajo River, Level reduction method, Zirdan Dam, GSTARS model, HEC-RAS model.

Introduction: The process of flow changes and the movement of water and sediment together and simultaneously in open erosion channels is a very complex phenomenon. Among other things, the channel bed may be eroded in place or along the route, and its grain size may be decomposed and changed. The entry of non-uniform and non-permanent flow of water and sediment into a system such as the area of the river path to the reservoir causes changes in the cross section and instability of the flow regime, especially during floods. Also, hydraulic constructions and implementation of techniques and methods of river organization, such as stabilizing the shore, direct routing of floods and adjusting the longitudinal profile of the channel, construction of walls, aqueducts, leveling and leveling and adjusting the slope of the floor are among the protective works necessary for the continuation of peace. The movement of water and sediment and regime stability in natural rivers. that the sedimentary materials that move along with the water flow may be suspended in the stream or that the sedimentary materials may slide or roll on the riverbed.

Methodology: In this research, first, using HEC-RAS software, the condition and mode of sedimentation of the longitudinal and transverse sections of the Kajo River located in Sistan and Baluchistan province were calculated and the results obtained with the data of GSTARS software to estimate the volume of sediment input to Zirdan dam reservoir. In a period of 50 years, it was estimated with the help of the relationship between sediment discharge and water flow rate and combining it with the continuous flow curve. The appearance of the Kajo river from the Zirdan dam to the connection to the Bahuklat river, according to the field survey, the river course can be divided into the following three areas based on its physical characteristics and flow: the arterial area upstream of the Kajo river and the meandering area in the middle area of the Kajo river and the delta area (plain) is in the downstream of the Kajo river. Kajo watershed is located in the geographic coordinates of 60°19' to 61°20' east longitude and 25°30' to 26°48' north latitude. Zirdan Reservoir Dam is also located 140 km north of Chabahar city on the Kajo

River in Sistan and Baluchistan province.

Results and Discussion: After calibrating the GSTARS model and HEC-RAS, determining some important parameters that the model is sensitive to, the model was used to predict the amount and distribution of Zirdan dam sediment in the long term. Most of the sediments, which are mostly coarse-grained, are deposited at the beginning of the reservoir, and the delta resulting from this sedimentation is clearly identifiable, and this is because the water level in the reservoir is fixed and equal to the normal level, i.e. 265, in the plan.. that in case of having the amount of water during the operation of the dam and predicting this amount according to the flows entering the reservoir and the water demand downstream of the dam, the program can obtain accurate information about the location of the resulting delta. Downstream, the accumulation of fine-grained sediments carried by thick currents can be observed. The results of the model calibration showed that by choosing Young's 1984 function as the relation of sediment transport, the number of three flow pipes and the roughness coefficient of 0.03, the model results have a better match with the results of experimental methods. Most of the sediments are deposited at a distance of 5 kilometers from the dam by forming a delta. Also, the result of calculations shows the volume of sediments in the tank after 50 years, 17 million cubic meters.


Conclusion: Based on the calculations made by the numerical model, the volume of 50-year sediments is estimated to be 21 million cubic meters. According to the results of the numerical model, the useful life of the dam, i.e. the period when 80% of the initial volume of the dam is replaced by sediments, is estimated to be 123 years. Also, the annual drop in the reservoir volume Zirdan dam is about 23 percent. As a result, considering the above conditions, the best function of sediment transfer according to the hydraulic conditions of the area is considered to be the Yang-Ruby function.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

برآورد عمر مفید مخزن سد با استفاده از مدل رسوب‌گذاری (مطالعه موردی سد زيردان سيستان و بلوچستان)

غلامحسین اکبری^{۱*}، ایمان لطفی^۲، کلثوم جهانتيغ^۳ 

^۱دانشیار گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.
^۳کارشناس ارشد، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: akbari@ub.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

چکیده: سدها از جمله بهترین سازه‌های ساخت بشر جهت برآورده نمودن یک یا چند هدف اصلی، تولید انرژی، تامین آب کشاورزی، آب شرب و نیز تحقق اهداف فرعی نظیر کنترل سیل، پرورش ماهی، ایجاد فضای تفریحی، تزریق آب به سفره‌های زیرزمینی، کشتیرانی و ... محسوب می‌شوند. هدف از این تحقیق برآورد عمر مفید مخزن سد با استفاده از مدل‌های رسوب‌گذاری بوده، لذا در این پژوهش جهت برآورد رسوبات در مخزن سد زيردان، از مدل‌های HEC-RAS و GSTARS برای مخزن سد زيردان استفاده گردید. مقدار و نحوه رسوب‌گذاری در مقطع طولی و مقاطع عرضی مخزن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل نشان داد، با انتخاب تابع پانگ ۱۹۸۴ به عنوان رابطه حمل رسوب، تعداد سه لوله جریان و ضریب زبری ۰/۰۳، نتایج مدل تطابق بهتری با نتایج حاصل از روش‌های تجربی دارد. قسمت اعظم رسوبات در فاصله ۵ کیلومتری از سد با تشکیل دلتای نهشته می‌شوند. همچنین نتیجه محاسبات، حجم رسوبات مخزن را پس از طی ۵۰ سال، ۲۱ میلیون مترمکعب، نشان می‌دهد. بدین معنی که پس از طی ۵۰ سال از زمان بهره‌برداری این مخزن حدود ۲۳ درصد از حجم مفید آن کاسته می‌شود. همچنین افت سالیانه حجم مخزن سد زيردان حدود ۲۳ درصد می‌باشد. در نهایت عمر مفید مخزن سد زيردان برآورد گردید. بر اساس محاسبات انجام‌شده توسط مدل عددی، حجم رسوبات ۵۰ ساله برابر ۲۱ میلیون مترمکعب برآورد شده است. و با توجه به نتایج حاصل از مدل عددی، عمر مفید سد یعنی مدت زمانی که ۸۰ درصد حجم اولیه سد توسط رسوبات جایگزین می‌شود ۱۲۳ سال برآورد می‌گردد.

کلیدواژگان: رسوب‌گذاری، رودخانه کاجو، روش کاهش سطح، سد زيردان، مدل GSTARS، مدل HEC-RAS.

به این امر اختصاص دهند (Niazkar and Zakwan 2023).
 رسوبات رودخانه‌ای در مخازن آبی نظیر سدها و بندها
 ترسیب می‌شوند و به تدریج از حجم آب ذخیره‌شده
 می‌کاهند و لذا عمر اقتصادی این سازه‌های آبی کاهش
 می‌یابد و سرمایه‌های ملی کشورها از بین می‌رود (Piraei

۱- مقدمه

استفاده از آب‌های سطحی با ایجاد بندها و سدهای
 ذخیره‌ای، دولت‌ها را واداشته است که هزینه‌های زیادی را

اساس حل ریاضی تمام پدیده‌های موثر در انتقال، توزیع، ته‌نشینی و آب‌شستگی رسوب بنا نهاده شده‌اند (Noor and Talib 2022). در سال‌های اخیر بر مبنای نتایج حاصل از مطالعات و تحقیقات صورت گرفته، مدل‌های ریاضی و کامپیوتری متعددی برای بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه و سدهای مخزنی از قبیل HEC-2 و HEC-6 و HEC-RAS تدوین شده‌اند (Chaudhry et al. 2018).

از میان ۴۵ بلای طبیعی شناخته‌شده، سیل از جمله ویرانگرترین آن‌هاست که نمی‌توان نقش رسوبات را در ایجاد خسارات و تلفات جانی و مالی فراوانی به بار آورده نادیده گرفت (Ashayeri et al. 2018). علت اصلی افزایش خسارات ناشی از رسوبات، تجاوز به حریم رودخانه‌ها و تاثیر فعالیت‌های بشری در افزایش آن با ساخت سدها می‌باشد (Kondolf et al. 2014). بسیاری از شهرها در مجاورت رودخانه‌های سرکش با حوزه‌های آبریز وسیع قرار دارند و هر از چند گاهی مورد تهاجم سیل قرار می‌گیرند و خسارات و ضایعات سنگین و چشم‌گیری را متحمل می‌شوند (Lu and Chiang 2019). در زمان وقوع سیل، افزایش آبدی رودخانه به طور ناگهانی از یک طرف و کاهش حجم مخزن سد به سبب رسوبات از طرف دیگر منجر به غرقاب شدن منطقه وسیعی از اراضی مجاور می‌گردد و تخریب پل‌ها، راه‌ها، خطوط ارتباطی، ویرانی تاسیسات شهری و روستایی را به دنبال دارد (Mohammed et al. 2018).

همواره با ایجاد یک سد در مسیر رودخانه، وضعیت هیدرولیکی بالادست و پایین‌دست این سازه تغییر محسوسی می‌نماید، به طوری که جریان آب در پشت سیستم هیدرولیکی کند می‌گردد و سرعت آبی که توسط رودخانه به مخزن سد می‌رسد به علت افزایش سطح مقطع جریان، کاهش یافته و یا به صفر می‌رسد (Sedlacek et al. 2022). با کاهش سرعت جریان آب، ذرات درشت شروع به رسوب می‌نمایند، ولی ذرات ریزتر وقت کافی برای ته‌نشین شدن ندارند (Mohammad et al. 2016). در نتیجه منتهی‌الیه آب ذرات درشت به تدریج ذرات ریزتر دیده می‌شوند و مقداری از مواد ریز نیز از سرریزها و دریچه‌ها عبور می‌کنند (Ali Omran et al. 2017). موارد رسوبی

(et al. 2023). مشکلاتی که پر شدن یک سد از رسوبات ایجاد می‌کند، بسته به وضع منطقه، اهمیت آب و نوع هدف از ایجاد سد متفاوت است و کمترین خطر آن از بین بردن سرمایه‌های ملی کشورها می‌باشد (Wang et al. 2017). با احداث سد در روی رودخانه، دریاچه‌ای در بالاست به وجود می‌آید (Sathya et al. 2023). به دلیل پس‌زدگی آب در محل ورود رودخانه به مخزن از سرعت جریان آب کاسته می‌شود (Samantaray and Sahoo 2019). ظرفیت حمل رودخانه کم می‌شود و پدیده رسوب‌گذاری در مخزن آغاز می‌شود (Joshi et al. 2019). معمولاً مواد درشت‌دانه در فاصله‌ای دورتر از سد ته‌نشین می‌شوند و مواد ریزدانه در محلی نزدیک‌تر به سد ته‌نشین می‌گردند (Raji et al. 2024). اثر اساسی رسوب‌گذاری در مخزن یک سد به کاهش ظرفیت ذخیره‌ای مخزن ظاهر می‌شود (Meraj et al. 2018). سدهای زیادی در اسپانیا، الجزایر و ترکیه به علت رسوب‌گذاری از بهره‌برداری خارج شده‌اند.

اگر در طراحی یک سد، مسئله رسوب مورد توجه قرار نگیرد، پس از مدتی سازه‌های آبرگیری و تاسیسات نیروگاه‌های برق‌آبی با مشکل جدی مواجه می‌گردند (Al-Mamari et al. 2023). لذا به نظر می‌رسد که وضعیت توزیع رسوب در مخزن قبل از طراحی و ساخت سد، تخمین زده شود (Ali et al. 2018) و بعد از طراحی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد (Foteh et al. 2018). که اگر لازم بود، مسائل مدیریتی مورد توجه قرار گیرد (Das et al. 2022). امروزه برای پیش‌بینی مقدار و نحوه رسوب‌گذاری در مخازن، یکی از ابزارهای معمول استفاده از مدل‌های ریاضی است (Mustafa et al. 2017). مدل‌های ریاضی نیز برای بررسی رسوب‌گذاری در مخازن سد به دو دسته مدل‌های تجربی و مدل‌های ریاضی مبتنی بر معادلات حاکم بر جریان و رسوب تقسیم می‌شود (Swarnkar et al. 2018).

مدل‌های تجربی بر اساس مشاهدات و اندازه‌گیری‌های محلی از مخازن موجود پایه‌گذاری شده‌اند و اطلاعات به‌دست‌آمده روابط بین پارامترهای موثر بر پدیده، به دست می‌آید (Yao et al. 2022). از جمله این روابط، روش کاهش سطح را می‌توان نام برد (Schleiss et al. 2016). مدل‌های ریاضی، مبتنی بر معادلات حاکم بر جریان و رسوب و بر

(Gholami et al. 2017). این روش خود به دسته‌بندی‌های مختلفی تقسیم می‌شود که از آن میان روش‌های ریاضی مبتنی بر معادلات حاکم بر تئوری انتقال و تهنشینی رسوب مورد توجه قرار می‌گیرد (Piraei et al. 2023).

در مطالعه (Aghakhani et al. 2013) مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و بررسی وضعیت فرسایش، رسوب‌گذاری و تغییر فرم بستر رودخانه میانجی با مدل HEC-RAS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که معادله ایکرزوایت برآورد قابل قبولی برای شناخت پتانسیل انتقال رسوب در رودخانه میانجی دارد. در مطالعه (Asadi et al. 2017) تغییرات بستر رودخانه تالار با استفاده از مدل HEC-RAS بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان رسوب خارج‌شده از بازه مورد مطالعه به میزان ۳۴۸۵۳۴ تن پیش‌بینی می‌شود. در مطالعه (Jahangir et al. 2017) پروفیل رسوب در پشت مخزن سد زولاچای سلماس با استفاده از مدل HEC-RAS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که میزان متوسط رسوب معلق رودخانه در حدود ۳۸۰ تن در روز محاسبه شد. در مطالعه (Moradi et al. 2018) مکان‌یابی برداشت مصالح رودخانه‌ای با استفاده از مدل HEC-RAS در رودخانه قورچای استان گلستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش‌گران نشان داد که میزان رسوب قابل برداشت در این رودخانه تقریباً ۴ میلیون تن در سال است. در مطالعه (EmamGHoliZadeh et al. 2020) پیش‌بینی میزان رسوب ورودی به مخزن سد شیرین دره به کمک مدل HEC-RAS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که متوسط سالانه حدود ۸ درصد از حجم مخزن در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود. در مطالعه (Asadi et al. 2021) کارایی توابع انتقال رسوب در مدل عددی GSTARS در رودخانه تالار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان رسوب خارج‌شده با استفاده از رابطه یانگ، معادل ۸۵۹۰ تن در سال برآورد شد. در مطالعه (MoradiNejad et al. 2022) برآورد دقت روابط انتقال دبی رسوب رودخانه خنداب، ایستگاه جوشیران با استفاده از مدل HEC-RAS مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قسمتی از مقاطع این رودخانه در وضعیت فرسایشی و

معلق عمدتاً از رس، کلئوئیدهای آلی و سیلت تشکیل می‌شوند (Chuenchum et al. 2019). مواد رسوبی کفی از ذرات درشت‌تری در حد ماسه و یا از مواد درشت‌دانه تشکیل شده است (Rangsiwanichpong et al. 2018). دسته دیگر از مواد، به صورت محلول در آب در می‌آیند و معمولاً اثر این مواد به صورت تغییر در کیفیت آب ظاهر می‌شود. بار رسوبی به مقدار کل مواد حاصل از فرسایش، اعم از معلق یا کفی یا مواد حاصل از فرسایش ورقه‌ای یا دره‌ای، که از جای خود حرکت کرده و در مسیر رودخانه به حوزه یا محل کنترل‌شده‌ای مانند مخزن سد می‌رسد، می‌باشد. داشتن وزن واحد حجم رسوبات به مخازن سدها بخصوص برای تعیین حجم آن بخشی از مخزن که توسط رسوبات پر می‌شود حائز اهمیت است. وزن واحد حجم این رسوبات به دلیل فشردگی و کاهش حجم خلل و فرج بیشتر از وزن واحد حجم خاک‌های طبیعی می‌باشد (Samantaray et al. 2020).

انباشت رسوبات در مخازن سدها نه تنها باعث ایجاد اختلال در عملکرد تأسیسات خروجی می‌گردد، بلکه تقلیل عمر مفید این گونه تأسیسات نیز از عواقب آن به شمار می‌آید. با در نظر گرفتن سرمایه‌گذاری که در احداث این گونه تأسیسات به عمل آمده و اثراتی که در آینده، کاهش حجم مخزن بر روی بهره‌برداری تأسیسات پایین دست خواهد داشت، مسلماً بررسی مسائل مربوط به رسوبات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و عدم توجه لازم به این مسئله در آینده مسائل و مشکلاتی را به وجود خواهد آورد (Norozzi et al. 2020). برآورد حجم و چگونگی توزیع رسوب در مخازن سدها از طریق مطالعات میدانی حوضه آبریز و یا از طریق مطالعه بر روی این مخازن صورت می‌گیرد (Preetha and Al-Hamdan 2022). در انجام عملیات میدانی طولانی مدت، نیاز به صرف هزینه و وقت بسیار و به کارگیری پارامترهای مختلف است. برآورد این عوامل، مشکل و گاهی هم غیرممکن بوده و بعلاوه سبب ایجاد خطای بسیار در نتایج محاسبات می‌گردد. از این رو استفاده از این روش نسبتاً محدود می‌باشد (Chalov et al. 2022). محاسبات رسوب در مرحله طراحی سد، جهت تعیین حجم مرده مخزن و در مرحله بهره‌برداری جهت پیش‌بینی الگوی توزیع رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد

قسمتی در حال رسوب‌گذاری قرار دارد.

ناحیه دلتایی (دشت) در پایین دست رودخانه کاجو می‌باشد. حوزه آبخیز کاجو نیز در محدوده مختصات جغرافیایی ۶۰ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۲۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۲۶ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. سد مخزنی زبردان نیز در ۱۴۰ کیلومتری شمال شهر چابهار بر روی رودخانه کاجو در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. این سد سومین سد بتن غلتکی ایران که با ۶۴/۵ متر ارتفاع و ۳۵۰ متر طول تاج می‌باشد. شکل ۱ محدوده منطقه مورد مطالعه، استان سیستان و بلوچستان، را نشان می‌دهد.

۳- روش‌شناسی

در این پژوهش ابتدا با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS وضعیت و نحوه رسوب‌گذاری مقاطع طولی و عرضی رودخانه کاجو واقع در استان سیستان و بلوچستان محاسبه و نتایج حاصل از آن با داده‌های نرم‌افزار GSTARS جهت برآورد حجم رسوب ورودی به مخزن سد زبردان در یک دوره ۵۰ ساله به کمک رابطه بین دبی رسوب و دبی جریان آب و تلفیق آن با منحنی تداوم جریان برآورد گردید و بر اساس میزان رسوبات ورودی برآورد شده، عمر مفید سد زبردان پیش‌بینی گردید.

جهت معرفی هندسه مخزن به طور تقریبی ۸۶۰۰۰ متر به مدل، از نقشه‌های توپوگرافی رودخانه کاجو با مقیاس ۱:۵۰۰۰ که از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه گردیده، تا به وسیله آن مدل‌سازی رودخانه صورت گیرد. لذا با توجه به فاصله زیاد مقاطع عرضی موجود، برای جلوگیری از بروز خطاهای مربوط به فواصل زیاد مقاطع، از گزینه درون‌یابی نرم‌افزار HEC-RAS استفاده گردیده، ۳۲ مقطع عرضی در مخزن سد و به فواصل مختلف از محل سد، مشخص شد.

رسوبات مخزن می‌توان شامل ذرات رس^۱ با قطری کمتر از ۰/۰۰۴ میلی‌متر، سیلت^۲ با قطری بین ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۶۲ میلی‌متر و ماسه^۳ با قطری بین ۰/۰۶۲ تا ۲ میلی‌متر باشد. پس از مشخص کردن نحوه عملکرد مخزن با استفاده از رابطه زیر می‌توان وزن حجمی اولیه رسوبات را تعیین نمود.

در این راستا، می‌توان از رودخانه کاجو در استان سیستان و بلوچستان نام برد. این رودخانه در سالیان اخیر، سیلاب‌های بسیار شدیدی را با دبی بیش از ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه تجربه کرده است. به خصوص در سیل اخیر استان سیستان و بلوچستان، جریان رودخانه کاجو در بالادست به ۲ میلیون و ۲۰۰ هزار لیتر در ثانیه رسید. این حجم از سیلاب، در مسیر حرکت خود باعث ایجاد فرسایش شدیدی گشته و علاوه بر تغییر رژیم جریان، باعث حمل رسوبات زیادی در مسیر خود می‌گردد. که با توجه به این موضوع، تعیین حریم بستر و تعیین حجم رسوبات حمل شده توسط رودخانه کاجو، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد.

لذا در این پژوهش با بررسی موردی بر روی مخزن سد زبردان و روش‌های ریاضی مبتنی بر معادلات انتقال و پخش، از مدل‌های ریاضی کامپیوتری GSTARS و HEC-RAS جهت معادله مربوط و برآورد سایر پارامترهای لازم استفاده خواهد شد. پس از به دست آوردن مقادیر محاسباتی، علاوه بر اینکه عمر مفید مخزن به دست می‌آید، نتایج حاصل از مدل کامپیوتری نیز با روش‌های تجربی و مقادیر مشاهداتی مقایسه و میزان دقت و خطای مدل کامپیوتری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه کاجو در محدوده مورد مطالعه، در طی مسیر خود از مناطق مختلفی عبور می‌کند. که در هر کدام از این مناطق، با توجه به شرایط مرفولوژی حاکم، دانه‌بندی خاصی از مواد رسوبی، وجود دارد. سیمای رودخانه کاجو از محل سد زبردان تا محل اتصال به رودخانه باهوکلالت بر طبق بررسی میدانی، مسیر رودخانه را می‌توان بر اساس مشخصات فیزیکی و نحوه جریان در آن به سه ناحیه زیر تقسیم کرد: الف) ناحیه شریانی در بالادست مسیر رودخانه کاجو (ب) ناحیه مئاندردی در منطقه میانی رودخانه کاجو (ج)

³ Sand

¹ Clay

² Silt

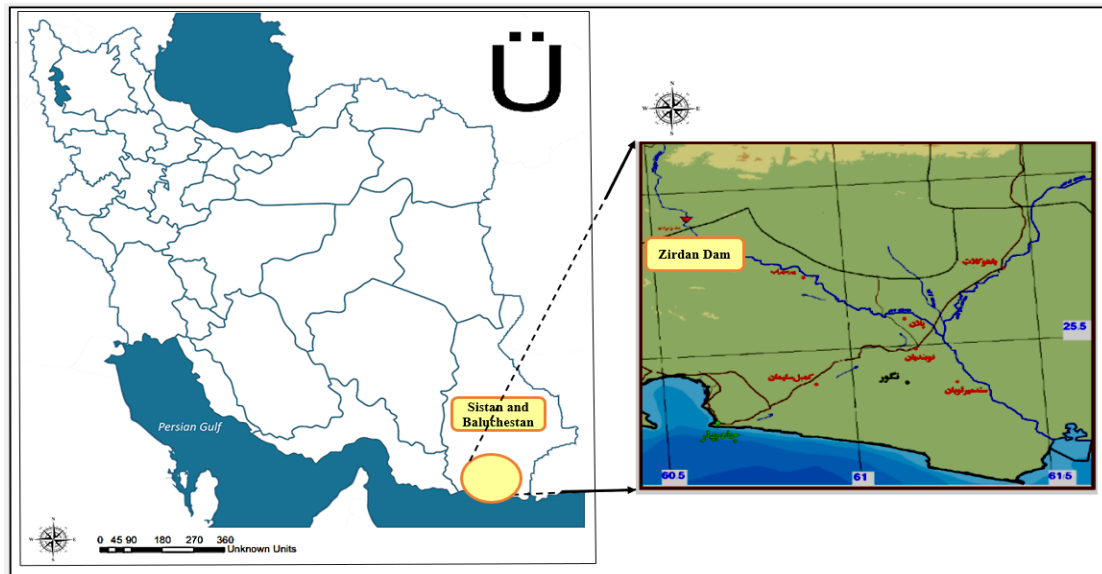


Fig. 1 Location of the studied area

شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه

گردد، مدل یک‌بعدی می‌شود. اگر چندین لوله جریان انتخاب شود، هم تغییرات جانبی وهم تغییرات عمودی تراز بستر را می‌توان شبیه‌سازی نمود.

۲-۳- مدل HEC_RAS

برنامه کامپیوتری HEC-RAS نسل جدیدی از برنامه HEC2 بوده که قریب به ۲۵ سال است در تحلیل جریان‌های ماندگار در رودخانه‌ها و مجاری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این برنامه، روابط هیدرولیکی یک‌بعدی استفاده شده که در مقایسه با مدل‌های چندبعدی از دقت قابل قبولی برخوردار است. در این نرم‌افزار، معادله مومنوم در حالت جریان‌های متغیر سریع (جریان‌های مختلط شامل جریان‌های فوق بحرانی و زیربحرانی، پرش هیدرولیکی، هیدرولیک جریان پل‌ها و نقاط تلاقی رودخانه‌ها) مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۳- روش کاهش سطح در برآورد رسوب

می‌توان برای محاسبه عمق رسوب و برآورد نحوه توزیع رسوب در مخزن به کاربرد. این روش مشخص می‌کند که توزیع رسوب در مخزن وابسته به نحوه بهره‌برداری از مخزن، بافت و اندازه ذرات رسوب ته‌نشین‌شده، شکل مخزن، حجم رسوب ته‌نشین شده در مخزن است. معادله اصلی در این

$$W = W_C P_C + W_m P_m + W_s P_s \quad (1)$$

در رابطه فوق پارامترهای به‌کاربرده شده عبارتند از: W = دانسیته خشک و P_C, P_m, P_s درصد رس و سیلت و ماسه در رسوبات مخزن و همچنین W_C, W_m, W_s چگالی رس، سیلت و ماسه می‌باشد.

۱-۳- مدل GSTAR

مجموعه برنامه‌های GSTARS به علت احساس نیاز برای یک مدل کامپیوتری تعمیم‌یافته روندیابی آب و رسوب که بتواند برای حل مسائل پیچیده مهندسی رودخانه که برای آن‌ها داده‌ها و منابع محدودی در دسترس بودند، استفاده شود، نوشته شده‌اند.

برخی از قابلیت‌ها و خصوصیات GSTARS به شرح زیر می‌باشند: GSTARS می‌تواند برای محاسبات نیمرخ سطح آب، با انتقال رسوب یا بدون انتقال رسوب استفاده شود. GSTARS3 می‌تواند نیمرخ‌های سطح آب را از طریق شرایط جریان زیربحرانی و بحرانی بدون انقطاع که شامل پرش‌های هیدرولیکی هم می‌شود، محاسبه نماید. GSTARS3 می‌تواند تغییرات شرایط جریان و رسوب را در جهات عرضی و طولی به روش نیمه دویبعدی بر اساس مفهوم لوله جریان محاسبه نماید. اگر فقط یک لوله جریان انتخاب

روش به صورت زیر ارائه شده است.

بار معلق در نظر گرفته می‌شود.

$$S = \int_0^{h_0} A dy + \int_{y_0}^H K a dy \quad (2)$$

در این رابطه، S = کل رسوبات ورودی به مخزن در طول دوره طراحی، Y_0 = تراز بستر رودخانه در محل احداث سد بعد از انباشت رسوبات، A = سطح مخزن در ارتفاعات مختلف، a = سطح جنس رسوب، H = ارتفاع مخزن در تراز نرمال سد، K = ضریب تناسب به منظور تبدیل سطح نسبی رسوب به سطح واقعی می‌باشد. سپس پس از انتگرال گیری و ساده کردن رابطه (۲)، به رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S = \frac{S - V_0(1 - v_0)}{H A_0 a_0} \quad (3)$$

که در رابطه فوق، V_0 و v_0 به ترتیب حجم نسبی و واقعی مخزن در تراز y_0 و همچنین a و A سطح نسبی و واقعی مخزن در تراز y_0 می‌باشد.

۳-۴- روش فلمینگ و محاسبه رسوبات مخزن سد

در این روش، با داشتن دبی جریان و ضرایب a, b می‌توان دبی بار معلق رسوب را تعیین کرد. بنابراین بر اساس داده‌های موجود از اندازه‌گیری‌های مربوط به دبی متوسط سالانه و دبی ذرات معلق رسوب مربوط به سال‌های آماری موجود در ایستگاه پیرسهراب، با استفاده از ترسیم نمودار دبی-رسوب و تعیین مناسب‌ترین معادله رگرسیون، ضرایب a و b تعیین می‌گردند.

$$a = 428/09$$

$$b = 1/7574$$

$$Q_s = 428.09 Q^{1.7574} \quad (4)$$

جهت اندازه‌گیری بار بستر رودخانه، روش مشخصی وجود ندارد. تنها بر اساس توصیه دفتر عمران ایالات متحده و کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ، تخمین بار بستر به میزان درصدی از بار معلق رودخانه توصیه شده است. بدین منظور بر اساس توصیه‌های مذکور و شرایط پروژه، مقدار بار بستر در ایستگاه هیدرومتری پیرسهراب به میزان ۱۵ درصد

۳-۵- سرعت سقوط ذرات رسوب

یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در رابطه انتقال رسوب، سرعت سقوط ذرات رسوب می‌باشد. با توجه به وجود تئوری‌های مختلف در ارتباط با سرعت سقوط و فرضیات به کاررفته در هر تئوری، لازم است میزان حساسیت رابطه با هر کدام از این تئوری‌ها سنجیده شده و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گیرد. نرم‌افزار HEC-RAS از طریق محاسبه ضریب انتقال رسوب C_d ، تعیین می‌کند که چه میزان از ذرات معلق، می‌تواند در گام زمانی مشخص رسوب کند. این ضریب به طور مستقیم وابسته به سرعت سقوط ذره می‌باشد.

$$C_d = \frac{\Delta t \cdot V_s}{D_e} \quad (5)$$

در نرم‌افزار HEC-RAS سه روش مختلف برای تعیین سرعت سقوط ذرات وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از:

- ◆ Toffaleti: بر اساس ضریب شکلی برابر با ۰/۹ و ضریب وزن مخصوصی برابر با ۲/۶۵، برای دانه‌های شن، ماسه و لای با اندازه‌های مختلف در دماهای متفاوت، سرعت سقوط ذرات را برحسب فوت بر ثانیه ارائه داده است.
- ◆ Van Rijn: در این روش، سرعت سقوط ذرات غیرکروی با ضریب شکلی برابر ۰/۷ در آبی با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود.
- ◆ Rubey: محدوده کاربرد این روش، برای دانه‌های شن، ماسه و لای می‌باشد. تمام این آزمایش‌ها، در آبی با دمای ۱۶ درجه سلسیوس صورت پذیرفت.

۴- نتایج و بحث

با مشخص شدن مقادیر ظرفیت و مساحت اصلاح‌شده در ارتفاعات مختلف، منحنی‌های اصلاح‌شده - سطح - حجم و ارتفاع به راحتی قابل ترسیم است. [جدول ۱](#)، محاسبات توزیع رسوبات در مخزن سد زیردان به کمک روش کاهش سطح را نشان می‌دهد.

در [جدول ۲](#)، بر اساس متوسط دبی سالانه، حجم رسوب

بیشترین مقدار و در سال سوم کمترین مقدار به دست آمد.

۴-۱- بررسی تغییر فرم بستر رودخانه کاجو توسط نرم‌افزار HEC-RAS

نمودارهای دانه‌بندی در مناطق سه‌گانه با توجه به محدودیت شریانی و مئاندري و دلتایی (دشت) در شکل ۲

معلق، حجم بار بستر و کل حجم رسوب سالانه بر اساس رابطه فلمینگ، تعیین شده است. با توجه به اینکه رابطه فلمینگ متوسط دبی سالانه در سال چهارم بیشترین مقدار و در سال سوم کمترین مقدار می‌باشد لذا حجم کل رسوب در سال چهارم بیشترین مقدار و در سال سوم کمترین مقدار به دست آمد و همچنین حجم بار بستر رسوب در سال چهارم بیشترین مقدار و در سال سوم کمترین مقدار به دست آمد و همچنین حجم بار معلق رسوب در سال چهارم

جدول ۱ محاسبه توزیع رسوبات در مخزن سد زبردان به کمک روش کاهش سطح

Table 1 Calculation of sediment distribution in Zirdan dam reservoir using the level reduction method

Height (parallel to sea level)	Initial area (million square meters)	Cubic meters of initial capacity (million)	Relative depth (m)	Relative area A _p	Sediment surface (million square meters)	Sediment volume (million square meters)	Cumulative volume of sediment (million square meters)
1580	8.92	221.60	1.00	0.01	0.01	2.56	146.26
1587	8.48	205.28	0.97	1.30	2.56	5.69	143.70
1576	8.04	190.01	0.95	1.59	3.13	6.56	138.01
1574	7.60	174.17	0.92	1.74	3.43	7.03	131.45
1572	7.14	185.33	0.89	1.83	3.60	7.31	124.42
1570	6.70	142.22	0.87	1.88	3.69	7.42	117.12
1568	6.31	131.11	0.84	1.89	3.72	7.44	109.71
1566	5.91	120.01	0.81	1.88	3.71	7.36	102.28
1564	5.51	108.89	0.79	1.86	3.66	7.23	94.92
1562	5.11	98.61	0.76	1.82	3.58	7.06	87.69
1560	4.71	88.89	0.73	1.77	3.48	6.48	80.63
1558	4.36	80.01	0.71	1.71	3.36	6.59	73.79
1556	4.01	71.11	0.68	1.64	3.23	6.32	67.20
1554	3.62	63.61	0.65	1.57	3.09	6.02	60.88
1552	3.26	56.67	0.63	1.49	2.94	5.71	54.85
1550	2.91	50.01	0.61	1.41	2.78	5.39	49.14
1548	2.69	43.48	0.57	1.33	2.61	5.06	43.75
1546	2.49	38.61	0.55	1.24	2.45	4.72	38.65
1544	2.28	33.89	0.52	1.16	2.28	4.38	33.96
1542	2.08	29.44	0.49	1.07	2.11	4.04	29.59
1540	1.89	25.56	0.47	0.98	1.93	3.70	25.55
1538	1.69	21.94	0.44	0.90	1.77	3.37	21.85
1536	1.51	18.61	0.41	0.82	1.60	3.04	18.48
1534	1.34	15.67	0.39	0.73	1.44	2.72	15.45
1532	1.18	13.06	0.36	0.65	1.28	2.40	12.73
1530	1.03	10.83	0.33	0.57	1.13	2.10	10.33
1528	0.90	8.89	0.31	0.50	0.98	1.82	8.22
1526	0.78	7.22	0.28	0.43	0.84	1.54	6.11
1524	0.66	5.83	0.26	0.36	0.71	1.29	4.87
1522	0.56	4.44	0.25	0.30	0.58	1.05	3.58
1520	0.47	2.70	0.23	0.24	0.47	0.83	2.53
1518	0.38	2.50	0.17	0.18	0.36	0.63	1.70
1516	0.30	1.78	0.15	0.14	0.27	0.46	1.06
1514	0.22	1.11	0.12	0.10	0.19	0.31	0.61
1512	0.16	0.67	0.09	0.06	0.12	0.18	0.30
1510	0.10	0.28	0.07	0.03	0.06	0.09	0.16
1508	0.06	0.14	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03
1506	0.02	0.07	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02
1504	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

در حجم رسوبات ته‌نشین شده دارد و تعیین دقیق سرعت بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

دانه‌بندی ذرات رسوب

یکی دیگر از فاکتورهای تاثیرگذار در رابطه انتقال رسوب، دانه‌بندی ذرات رسوب می‌باشد. با توجه به اینکه جریان آب رودخانه کاجو در طی مسیر حرکت از موقعیت‌های متفاوت با شیب‌های مختلف عبور می‌کند، لذا در نقاط مختلف از مسیر رودخانه، ذرات با ابعاد و اندازه‌های متنوع وجود دارد. از آنجا که فاکتور اندازه ذات در معادلات انتقال رسوب نقش بسزایی دارند، مهم است که حساسیت رابطه به تغییرات این فاکتور سنجیده شود. جهت این کار به روش زیر عمل می‌شود و از محل سد زبردان تا اتصال به رودخانه باهوکلالت سه تپ دانه‌بندی وجود دارد. اکنون طی هر مرحله تمام مسیر را با یک نوع دانه‌بندی ذرات در نظر گرفته می‌شود. در **شکل‌های زیر**، نمودار خروجی نرم‌افزار تغییر فرم بستر رودخانه توسط سه تپ دانه‌بندی بیان شده، تعیین گردیده است.

است. در نمودار a، محدوده شریانی (۴-۲۵) میلی‌متر بوده و نمودار b، محدوده ماندیری (۰/۱۵-۴) میلی‌متر و نمودار c، محدوده دلتایی (۰-۰/۱۵) میلی‌متر می‌باشد.

۲-۴- آنالیز حساسیت تابع انتقال نرم‌افزار HEC-RAS

در این بخش، حساسیت رابطه انتقال رسوب، خروجی نرم‌افزار HEC-RAS که بیش‌ترین تطابق با نتایج حاصل از روش‌های تجربی فلمینگ و روش کاهش سطح را دارد؛ نسبت به فاکتورهای اساسی حاکم در پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این فاکتورها عبارتند از:

سرعت سقوط ذرات رسوب

در **شکل‌های ۳، ۴ و ۵** سرعت سقوط ذرات رسوب با استفاده از سه روش Van Rijn و Toffaletti و Rubey به دست آمده است. با بررسی **شکل‌های ۳، ۴ و ۵**، ملاحظه می‌گردد که تغییر فرم بستر تحت تاثیر سرعت‌های سقوط مختلف، متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه فاکتور سرعت سقوط، مربوط به ته‌نشینی ذرات رسوب می‌باشد. لذا تاثیر بسزایی

جدول ۲ حجم رسوبات محاسبه‌شده برای کل رودخانه توسط رابطه فلمینگ

Table 2 The volume of sediments calculated for the whole river by Fleming's relation

Year	Total volume of sediment per year (million tons)	Volume of sediment bed load per year (million tons)	Volume of suspended sediment load per year (million tons)	Average annual discharge $\frac{m^3}{s}$
First	31.4	4.35	29.05	19.56
Second	17.8	2.31	15.44	13.65
Third	4.6	0.59	3.97	6.3
Fourth	130.7	16.8	112	42.15
Five	6.8	0.89	5.9	7.9
Total	191.3	24.94	166.36	89.56

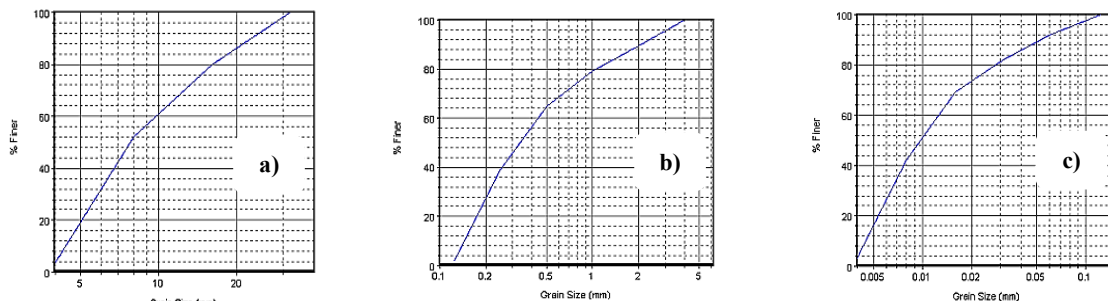


Fig. 2 Sediment grading curve in the three regions of Kajo River

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی رسوب در مناطق سه‌گانه رودخانه کاجو

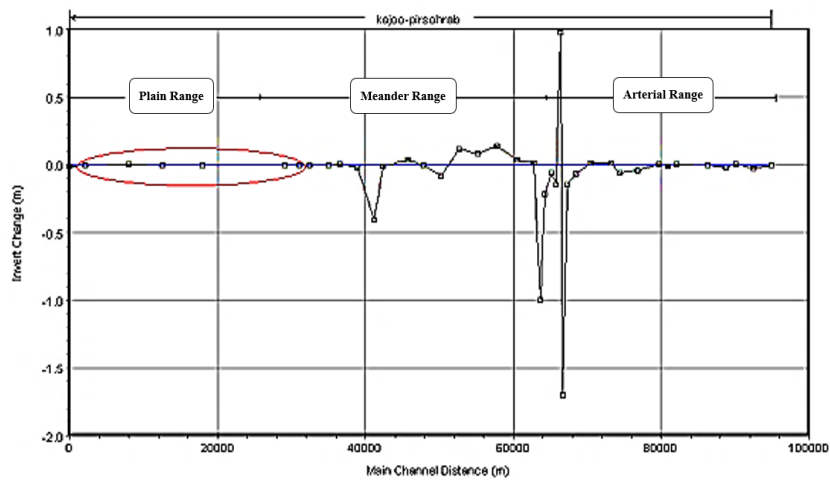


Fig. 3 Bed form change diagram using Toffaleti fall speed

شکل ۳ نمودار تغییر فرم بستر با استفاده از سرعت سقوط Toffaleti

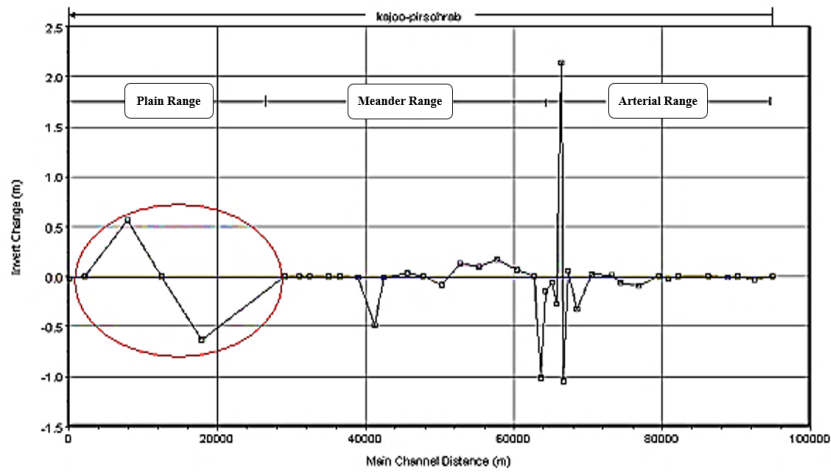


Fig. 4 Bed form change diagram using Van-Rijn fall rate

شکل ۴ نمودار تغییر فرم بستر با استفاده از سرعت سقوط Van-Rijn

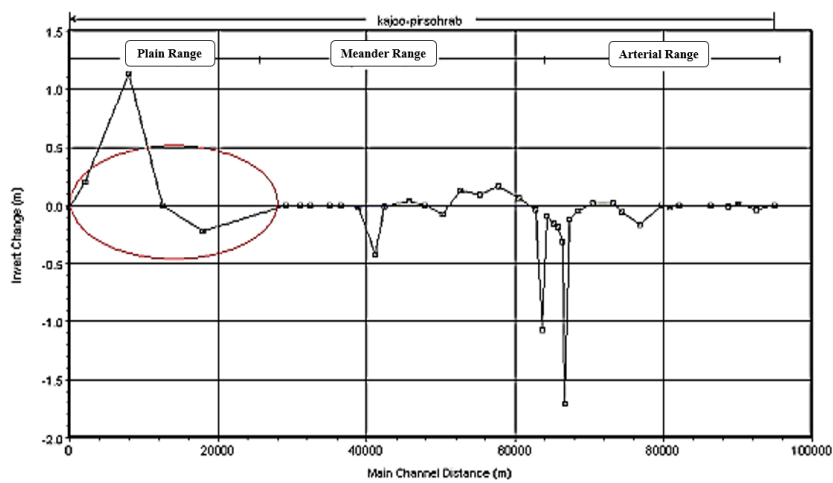


Fig. 5 The diagram of bed form change using Rubey fall speed

شکل ۵ نمودار تغییر فرم بستر با استفاده از سرعت سقوط Rubey

مختلف انتقال رسوب می‌باشد، به گونه‌ای که تغییر در اندازه ذرات، سبب ایجاد تغییرات زیادی در فرم بستر رودخانه می‌شود. همچنین باعث تغییرات زیادی در حجم رسوبات در نقاط مختلف مسیر به‌ویژه در محدوده دشت می‌شود.

در نرم‌افزار GSTARS، نوع معادله حمل رسوب، تعداد لوله‌های جریان، تعداد محاسبات رسوب در هر گام زمانی، وضعیت حمل نامتعادل رسوب و پارامترهای آن، پارامترهای حمل رسوب چسبنده برای رسوب‌گذاری قابل تغییر بوده و می‌توان حساسیت فرآیند را نسبت به تغییر این پارامترها بررسی نمود.

با بررسی شکل‌های ۶، ۷، و ۸ ملاحظه می‌گردد که تغییر فرم بستر تحت تاثیر دانه‌بندی‌های مختلف، بسیار متفاوت می‌باشد. در شکل ۷، عمده تغییرات بستر در محدوده شریانی صورت گرفته است. دلیل این امر این است که، در محدوده شریانی به خاطر وجود شیب زیاد بستر رودخانه، سرعت جریان زیاد بوده، لذا این عامل سبب گردیده تا قدرت جریان در حمل رسوبات در این محدوده بیشتر از نقاط دیگر مسیر باشد. از طرفی، با توجه به وجود ذرات درشت‌دانه در تمام نقاط مسیر، این تغییرات بیشتر در این محدوده رخ داده و در بقیه نقاط مسیر تغییر محسوسی قابل مشاهده نمی‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که فاکتور دانه‌بندی ذرات رسوب، تاثیرگذارترین فاکتور در روابط

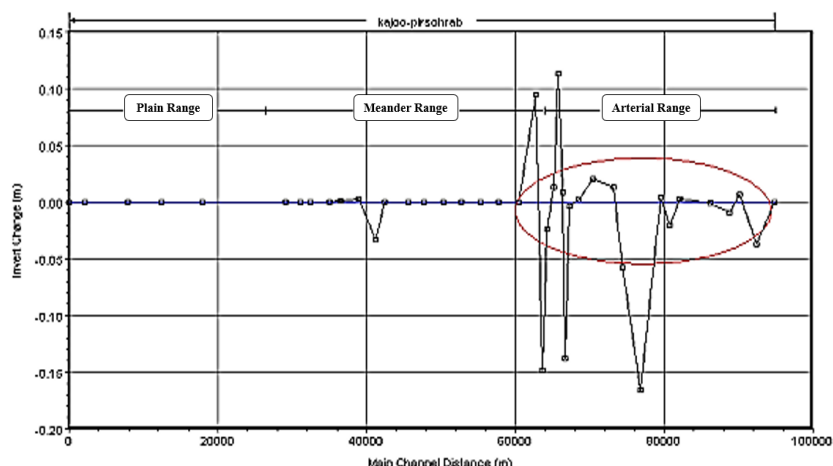


Fig. 6 The diagram of the change of bed form using granulation (range of granulation 4-25 mm)

شکل ۶ نمودار تغییر فرم بستر با استفاده دانه‌بندی (محدوده دانه‌بندی ۲۵-۴ میلی‌متر)

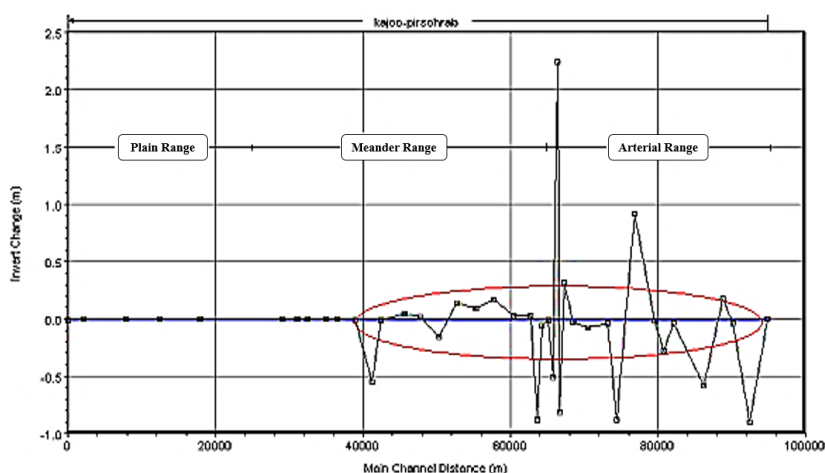


Fig. 7 The diagram of the change of bed form using granulation (range of granulation 4 - 0.15 mm)

شکل ۷ نمودار تغییر فرم بستر با استفاده دانه‌بندی (محدوده دانه‌بندی ۴-۰/۱۵ میلی‌متر)

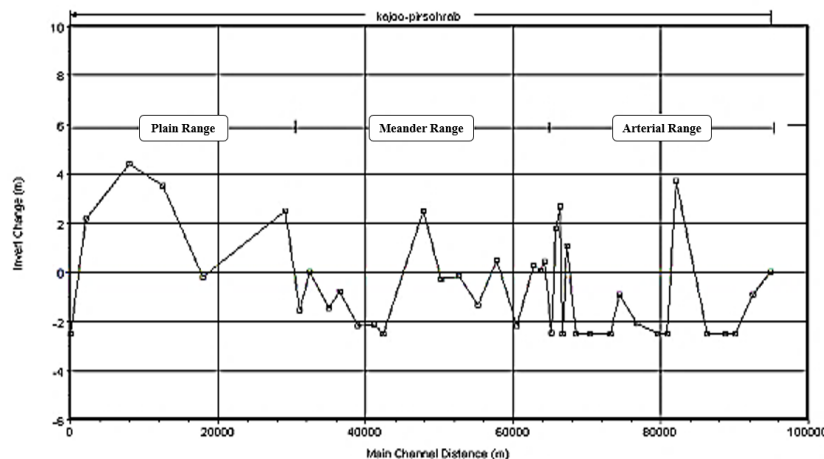


Fig. 8 The diagram of the shape of the bed using granulation (granulation range 0-0.15 mm)

شکل ۸ نمودار تغییر فرم بستر با استفاده دانه‌بندی (محدوده دانه‌بندی ۰-۰/۱۵ میلی‌متر) آنالیز حساسیت تابع انتقال نرم‌افزار GSTARS

در درازمدت به کار گرفته شد. قسمت اعظم رسوبات که اغلب درشت‌دانه می‌باشند در ابتدای مخزن ته‌نشین می‌شوند که دلتای حاصل از این رسوب‌گذاری به‌وضوح قابل تشخیص است و این بدان علت است که در برنامه تراز آب در مخزن ثابت و برابر تراز نرمال یعنی ۲۶۵ در نظر گرفته شده است. که در صورت داشتن رقوم آب در طی دوران بهره‌برداری از سد و پیش‌بینی این رقوم با توجه به جریان‌های ورودی به مخزن و نیاز آبی پائین‌دست سد، می‌توان اطلاع دقیقی از محل دلتای حاصل، توسط برنامه به دست آورد. در پائین‌دست تجمع رسوبات ریزدانه که توسط جریان‌های غلیظ حمل می‌شوند را می‌توان مشاهده کرد.

نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل نشان داد، با انتخاب تابع یانگ ۱۹۸۴ به عنوان رابطه حمل رسوب، تعداد سه لوله جریان و ضریب زبری ۰/۰۳، نتایج مدل تطابق بهتری با نتایج حاصل از روش‌های تجربی دارد. نتایج حاصل از اجرای برنامه با یک لوله و دو لوله جریان، صحت‌سنجی بیشتری دارند چون در این حالت تغییرات عرضی سرعت جریان نیز در نظر گرفته می‌شود. برای پیش‌بینی رسوب‌گذاری در مخزن سد در درازمدت تعداد ۳ لوله جریان انتخاب شد که دقت بهتری را در پیش‌بینی پروفیل رسوب‌گذاری به دست می‌دهد. قسمت اعظم رسوبات در فاصله ۵ کیلومتری از سد با تشکیل دلتای نهشته می‌شوند. همچنین نتیجه

۳-۴- مقادیر مختلف تعداد روندیابی رسوب در هر گام زمانی

در مدل GSTARS می‌توان تعداد محاسبات روندیابی رسوب را در طول یک گام زمانی (Δt) مربوط به محاسبات هیدرولیکی جریان، مشخص نمود. بر اساس اجرای مکرر برنامه مشخص شد که افزایش تعداد روندیابی رسوب بر نحوه توزیع رسوب موثر بوده ولی بر مقدار کل حجم رسوب تاثیر ندارد. در شکل ۹، هر چه تعداد روندیابی رسوب بیشتر باشد رسوب‌گذاری در مقاطع اولیه بیشتر و در مقاطع انتهایی کمتر است. برای سد زبردان این تعداد روندیابی رسوب برابر یک در نظر گرفته شده است.

سرعت جریان برای رسوب‌گذاری رس و سیلت

با ورود جریان به داخل مخزن و با بزرگ شدن مقاطع عرضی، سرعت جریان کاهش می‌یابد و به همین دلیل در داخل مخزن رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. در نتیجه تنش برشی ایجادشده در بستر بسیار کم بوده و از مقادیر انتخاب‌شده در فایل ورودی همواره کوچک‌تر است. بیانگر این واقعیت است که تغییر در مقدار سرعت جریان تاثیر چندانی بر نتایج برنامه نخواهد داشت.

پس از کالیبراسیون مدل GSTARS و HEC-RAS تعیین برخی پارامترهای مهم که مدل به آن‌ها حساس می‌باشد، مدل برای پیش‌بینی مقدار و نحوه توزیع رسوب سد زبردان

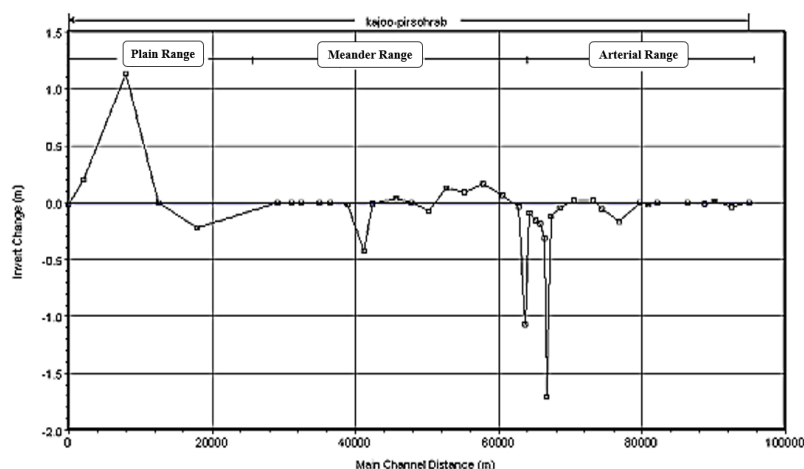


Fig. 9 The diagram of the change of bed form for the number of sediment trends

شکل ۹ نمودار تغییر فرم بستر برای تعداد روندیابی رسوب

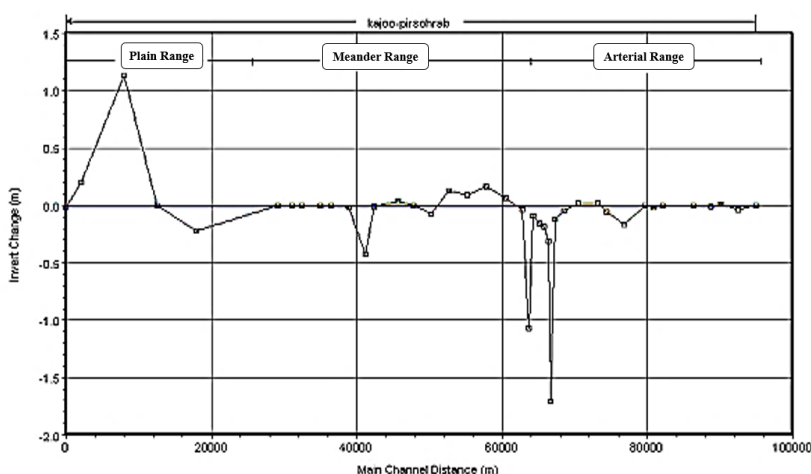


Fig. 10 Flow speed bed shape change diagram for clay and silt deposition

شکل ۱۰ نمودار تغییر فرم بستر سرعت جریان برای رسوب گذاری رس و سیلت

مفید یک سد اولین اطلاعات مورد نیاز، رسوب تشکیل شده در مخزن سد است، که این مقدار اعم از بار بستر یا بار معلق به روش‌ها و فرمول‌های مختلف قابل محاسبه است

همچنین میزان رواناب سالانه که به مخزن وارد می‌شود و نیز حجم اولیه مخزن باید مشخص باشد. معمولاً طول عمر مفید یک سد معادل مدت زمانی است که حدود ۸۰ درصد حجم اولیه مخزن پر از رسوب می‌شود. این مدت زمان تابعی از رسوب داده‌شده، وزن واحد حجم مواد ته‌نشین‌شده و همچنین راندمان تله‌گذاری مخزن یعنی درصدی از مواد وارده به مخزن که ته‌نشین می‌شود، می‌باشد، بنابراین

محاسبات، حجم رسوبات مخزن را پس از طی ۵۰ سال، ۲۱ میلیون مترمکعب، نشان می‌دهد. بدین معنی که پس از طی ۵۰ سال از زمان بهره‌برداری این مخزن حدود ۲۳ درصد از حجم مفید آن کاسته می‌شود. عمر مفید یک سد کاملاً به مقدار رسوباتی که به مخزن سد وارد می‌گردد و بزرگی حجم مخزن بستگی دارد. چنانچه ظرفیت مخزن در مقایسه با رسوبات واردشده کم باشد، عمر مفید سد خیلی کوتاه خواهد بود. بررسی میزان رسوب وارد به مخزن سد بر اساس مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده روی مخازنی است که سال‌هاست وجود دارند. این بررسی‌ها وزن واحد حجم مواد ته‌نشین شده را مشخص می‌نماید. بنابراین در تعیین عمر

گرفتن منحنی دانه‌بندی ذرات صورت پذیرد. در نتیجه با در نظر گرفتن شرایط فوق، بهترین تابع انتقال رسوب با توجه به شرایط هیدرولیکی منطقه، تابع Yang-Ruby در نظر گرفته می‌شود. در بررسی فرآیند رسوب و فرسایش در هر رودخانه، انتخاب صحیح منحنی دانه‌بندی ذرات رسوب، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. چرا که داده‌های نادرست در این زمینه، سبب بروز اختلاف در نتایج مسئله می‌گردد.

۶- فهرست نشانه‌ها

A	سطح مخزن در ارتفاعات مختلف
a	سطح جنس رسوب
C _d	ضریب انتقال رسوب
H	ارتفاع مخزن در تراز نرمال سد
K	ضریب تناسب
S	کل رسوبات ورودی به مخزن در طول دوره طراحی
Y ₀ V ₀	حجم نسبی مخزن در تراز
Y ₀ v ₀	حجم واقعی مخزن در تراز
V _s	سرعت سقوط ذره
w	دانسیته خشک
Y ₀	تراز بستر رودخانه بعد از انباشت رسوبات
Δt	مدت زمان سرعت سقوط ذره

Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation for the cooperation of the Sistan and Baluchestan Regional Water Organization in providing the information required for this research.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, G.A.; methodology, I.L., and K.J.; software, K.J.; data analysis, K.J.; writing—original draft preparation, I.L.; writing—review and editing, G.A. and I.L.; supervision, G.A.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No financial support was received from any organization for this research.

پیش‌بینی دقیق عمر مفید سد پس از جمع‌آوری داده‌های صحرایی مورد نیاز امکان‌پذیر است. اما پیش‌بینی بر اساس مدل رسوب‌گذاری عمر مفید مخزن سد را، عمر مفید آن را ۱۲۳ سال برآورد نموده است

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس محاسبات انجام‌شده توسط مدل عددی، حجم رسوبات ۵۰ ساله برابر ۲۱ میلیون مترمکعب برآورد شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل عددی، عمر مفید سد یعنی مدت زمانی که ۸۰ درصد حجم اولیه سد توسط رسوبات جایگزین می‌گردد ۱۲۳ سال برآورد می‌گردد. همچنین افت سالیانه حجم مخزن سد زبردان حدود ۲۳ در صد می‌باشد. در حالی که این مقدار طبق نظریه کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ متوسط افت ذخیره مخازن سدها به میزان یک درصد در سال است. استفاده از تابع حمل یانگ برای محاسبه روندیابی رسوب، نسبت به سایر توابع حمل رسوب، نتیجه بهتری داده است.

در بررسی فرآیند رسوب در هر رودخانه، دقت در انتخاب سرعت سقوط ذرات نیز دارای اهمیت می‌باشد. با توجه به این که فاکتور سرعت سقوط، ارتباط مستقیم با اندازه ذرات دارد، لذا انتخاب این گزینه می‌بایست با در نظر

Data Availability Statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon request.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest

References

- Aghakhani A. H., HasanZadeh Y., Alami M. T., and Esmaili K. 2013. Numerical modeling of sediment transport and investigation of erosion, sedimentation and bedform change (case study of Mianji river) HEC-RAS river using mathematical model, *12th Iran Hydraulic Conference*, University of Tehran. <https://doi.org/paper-abstract-1044695> (In Persian).
- Ali A. E., Strezov V., Davies P. J., and Wright I.

2018. River sediment quality assessment using sediment quality indices for the Sydney basin, Australia affected by coal and coal seam gas mining. *Science of the total environment*, 616, 695-702.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.259>
- Ali Omran Z., and Shamkhi Jaber W. 2017. Simulation of sediment transport in Al-Hilla River in Iraq using the HEC-RAS Software. *Kerbala university*, 13(4), 8-18.
<https://doi.org/iasj/download/7d6c014826e4460e>
- Al-Mamari M. M., Kantoush S. A., Al-Harrasi T. M., Al-Maktoumi A., Abdrabo K. I., Saber M., and Sumi T. 2023. Assessment of sediment yield and deposition in a dry reservoir using field observations, RUSLE and remote sensing: Wadi Assarin, Oman. *Journal of Hydrology*, 617, 128982.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128982>
- Asadi F. Z., Fazl Avali R., and Emadi A. R., 2017. Investigating river bed changes using HEC-RAS4.0 model (case study: Talar River), *Journal Watershed Management Research*, Volume 8, Number 15, pp. 25-35.
<https://doi.org/10.29252/jwmr.8.15.25> (In Persian).
- Asadi F. Z., Fazl Avali R., and Emadi A. R., 2021. Investigating the efficiency of sediment transfer functions in GSTARS numerical model, *Journal of Water and Soil Sciences*, Volume 25, Number 3, pp. 261-273.
<https://doi.org/10.47176/jwss.25.3.42781> (In Persian).
- Ashayeri N. Y., Keshavarzi B., Moore F., Kersten M., Yazdi M., and Lahijanzadeh A. R. 2018. Presence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and surface water from Shadegan wetland-Iran: a focus on source apportionment, human and ecological risk assessment and sediment-water exchange. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 1054-1066.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.055>
- Chalov S., Moreido V., Ivanov V., and Chalova A. 2022. Assessing suspended sediment fluxes with acoustic Doppler current profilers: Case study from large rivers in Russia. *Big Earth Data*, 6(4), 504-526.
<https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2116834>
- Chaudhry M. A., Naeem U. A., and Hashmi H. N. 2018. Performance evaluation of 1-D numerical model HEC-RAS towards modeling sediment depositions and sediment flushing operations for the reservoirs. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-18.
<https://doi.org/article/10.1007/s10661-018-6755-7>
- Chuenchum P., Xu M., and Tang W. 2019. Estimation of soil erosion and sediment yield in the Lancang-Mekong river using the modified revised universal soil loss equation and GIS techniques. *Water*, 12(1), 135-146.
<https://doi.org/10.3390/w12010135>
- Das B., and Senthil Vadivel T. 2022. Sediment Transport Modelling in Stream Flow by HEC-RAS Model-A State-of-the-Art. In *Recent Advances in Civil Engineering: Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Technologies and Advancements in Civil Engineering (ScTACE 2021)* (pp. 481-491). Singapore: *Springer Nature Singapore*.
https://doi.org/chapter/10.1007/978-981-19-0189-8_39
- Emam GholiZadeh S., Khademi N., and Hosseini S. H., 2020. Forecasting the amount of sediment input to the Shirin Dareh dam reservoir using the HEC-RAS model, *Watershed Management Research Journal*, Volume 11, Number 21, pp. 208-222. <https://doi.org/10.52547/jwmr.11.21.208> (In Persian).
- Foteh R., Garg V., Nikam B. R., Khadatare M. Y., Aggarwal S. P., and Kumar A. S. 2018. Reservoir sedimentation assessment through remote sensing and hydrological modelling. *Journal of the Indian Society of Remote sensing*, 46(11), 1893-1905.
<https://doi.org/article/10.1007/s12524-018-0843-6>
- Gholami L., HadiGhoraghi J., Abdolahi Z., and Khaled Darvishan A., 2017. Comparison and evaluation of suspended sediment estimation methods using data classification (case study: Doab Merk, Shirgah and Karikla stations), *Iranian Water Resources Research Journal*, Volume 13, Number 3, pp. 187-193.
https://doi.org/iwrr.ir/article_42246 (In Persian).
- Jahangir N., DaneshFaraz R., MonaZadeh M., and MajediAsl M., 2017. Numerical investigation of sediment profile behind Zolachai Selmas dam reservoir, using HEC-RAS model, *International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, University of Tehran. (In Persian).
- Joshi N., Lamichhane G. R., Rahaman M. M., Kalra A., and Ahmad S. 2019. Application of HEC-RAS to study the sediment transport characteristics of Maumee River in Ohio. In *World Environmental and Water Resources Congress* (pp. 257-267). Reston, VA: *American Society of Civil Engineers*.
<https://doi/abs/10.1061/9780784482353.024>
- Kondolf G. M., Rubin Z. K., and Minear J.T. 2014. Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*, 50(6), 5158-5169.
<https://doi.org/10.1002/2013WR014651>
- Lu C. M., and Chiang L.C. 2019. Assessment of sediment transport functions with the modified SWAT-Twn model for a Taiwanese small

- mountainous watershed. *Water*, 11(9), 1749. <https://doi.org/10.3390/w11091749>
- Meraj G., Romshoo S. A., Ayoub S., and Altaf S. 2018. Geoinformatics based approach for estimating the sediment yield of the mountainous watersheds in Kashmir Himalaya, India. *Geocarto International*, 33(10), 1114-1138. <https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1333536>
- Mohammed H. S., Alturfi U. A., and Shlash M. A. 2018. Sediment transport capacity in Euphrates river at Al-Abbasia reach using Hec-Ras model. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(5), 919-929. <https://doi.org/0976-6316>
- Mohammad M. E., Al-Ansari N., Issa I. E., and Knutsson S. 2016. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 21(3), 235-244. <https://doi.org/10.1111/lre.12142>
- Moradi A., Seyedian S. M., Kaheh M., and Heshmat P. A., 2018. Locating the harvesting of river materials using HEC-RAS model (Case study: Qorchai River of Golestan province), *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, Volume 9, Number 33, pp. 76-88. <https://doi.org/sid.ir/paper/247233/fa> (In Persian).
- MoradiNejad A., and Hosseini S. A., 2022. Estimating the accuracy of sediment transfer relations of Khandab River, Joshiran Station using HEC-RAS model, *Journal of Environment and Water Engineering*, Volume 8, Number 1, pp. 161-176. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.292016.1587> (In Persian).
- Mustafa A. S., Sulaiman S. O., and Al_Alwani K. M. 2017. Application of HEC-RAS model to predict sediment transport for Euphrates River from Haditha to Heet 2016. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 20(3), 570-577. <https://doi.org/iasj/download/807faa126fc0070a>
- Niazkar M., and Zakwan M. 2023. Developing ensemble models for estimating sediment loads for different times scales. *Environment, Development and Sustainability*, 1-19. <https://doi.org/article/10.1007/s10668-023-03263-4>
- Noor D. M., and Talib S. H. A. 2022. Application of HEC-RAS to Estimate the Sediment Transport in Cameron Highlands, Pahang, *Malaysia. Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, 3(1), 872-883. <https://doi.org/2773-5184>
- Norozi A., Pajohesh M., Abdolahi Kh., and Oori A. E., 2020. Estimation of suspended sediment load and evaluation of homogeneity and heterogeneity of discharge and sediment (case study: Kesilian watershed, Mazandaran), *Ecohydrology*, Volume 7, Number 4, pp. 1112-1099. <https://doi.org/10.22059/IJE.2020.304694.1345> (In Persian).
- Piraei R., Afzali S. H., and Niazkar M. 2023. Assessment of XGBoost to estimate total sediment loads in rivers. *Water Resources Management*, 37(13), 5289-5306. <https://doi.org/article/10.1007/s11269-023-03606-w>
- Piraei R., Niazkar M., and Afzali S. H. 2023. Assessment of data-driven models for estimating total sediment discharge. *Earth Science Informatics*, 16(3), 2795-2812. <https://doi.org/article/10.1007/s12145-023-01069-6>
- Preetha P., and Al-Hamdan A. 2022. A union of dynamic hydrological modeling and satellite remotely-sensed data for spatiotemporal assessment of sediment yields. *Remote Sensing*, 14(2), 400. <https://doi.org/10.3390/rs14020400>
- Raji B. M., Turabi H., and Nasimi M. N. 2024. Sedimentation Analysis of Kabul River by Using HEC-RAS. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 105(1), 229-238. <https://doi.org/article/10.1007/s40030-023-00774-1>
- Rangsiwanichpong P., Kazama S., and Gunawardhana L. 2018. Assessment of sediment yield in Thailand using revised universal soil loss equation and geographic information system techniques. *River research and applications*, 34(9), 1113-1122. <https://doi.org/10.1002/rra.3351>
- Samantaray S., Sahoo A., and Ghose D. K. 2020. Assessment of sediment load concentration using SVM, SVM-FFA and PSR-SVM-FFA in arid watershed, India: a case study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(6), 1944-1957. <https://doi.org/article/10.1007/s12205-020-1889-x>
- Samantaray S., and Sahoo A. 2019. Assessment of sediment concentration through RBNN and SVM-FFA in Arid Watershed, India. In *Smart Intelligent Computing and Applications: Proceedings of the Third International Conference on Smart Computing and Informatics*, 16(1). 701-709. https://doi.org/chapter/10.1007/978-981-13-9282-5_67
- Sathya A., Thampi S. G., and Chithra N. R. 2023. Development of a framework for sand auditing of the Chaliyar River basin, Kerala, India using HEC-HMS and HEC-RAS model coupling. *International Journal of River Basin Management*, 21(1), 67-80. <https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1909604>
- Schleiss A. J., Franca M. J., Juez C., and De Cesare G. 2016. Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614.

- <https://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>
Sedlacek J., Babek O., Grygar T. M., Lendakova Z., Pacina J., Stojdl J. and Elznicova J. 2022. A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs. *Journal of Hydrology*, 605, 127397. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127397>
- Swarnkar S., Malini A., Tripathi S., and Sinha R. 2018. Assessment of uncertainties in soil erosion and sediment yield estimates at ungauged basins: an application to the Garra River basin, India. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2471-2485.
- <https://doi.org/10.5194/hess-22-2471-2018>
Wang H., Wu X., Bi N., Li S., Yuan P., Wang A., and Nittrouer J. 2017. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review. *Global and Planetary Change*, 157, 93-113. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.08.005>
- Yao Y., Song J., and Wei X. 2022. The fate of carbon in check dam sediments. *Earth-Science Reviews*, 224, 103889. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103889>