

Reducing Sistan River Sedimentation by Managing the Operation of Zahak Dam Using the HEC-RAS Model

Afsaneh Shahreki Deh-Sookhteh¹, Farzad Hassan Pour^{2*}

¹MSc Graduated, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

²Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: Hassanpourir@UOZ.ac.ir

Received: 16 May 2026

Accepted: 03 July 2026

Revised: 29 June 2026

Published: 21 Dec. 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Sedimentation in rivers increases bed levels and reduces flow capacity. The Sistan River with a low slope, is prone to sediment deposition. The Zahak diversion dam, as the first control structure on the Sistan River, is located downstream of the Hirmand River fork. In the present study, the HEC-RAS model was used to reduce sedimentation in the Sistan River. In this study, flow simulation was performed using data from the 2018-2019 water year in a quasi-unsteady manner. In this study, in order to reduce sedimentation in the Sistan River, modeling was performed with two scenarios of existing operation and gate opening with the operation instructions. Based on the research results, in the existing scenario, at the end of the water year, bed levels increased by an average of 0.58 meters and 889,456 cubic meters were added to the bed sediments in the upstream section of the Zahak Dam, while in the scenario of opening the gates, bed levels decreased by an average of 0.25 meters and 586,003 cubic meters of bed sediments were reduced. Therefore, operating the Zahak Dam gates according to the instructions can play an effective role in reducing sedimentation in the upstream section of the Zahak Dam.

Keywords River, Sediment, Gate Opening, HEC-RAS, Sistan.

Introduction: There are various factors that influence the sedimentation phenomenon, including the occurrence and recurrence of floods, changes in the hydraulic and sedimentary regime, changes in land use, changes in the characteristics of the watershed, encroachment and occupation around rivers, and the construction of containment structures to exploit river resources (Anonymous, 2007).

The flow and sediment hydraulics after dredging operations were investigated using the HEC-RAS model. The results showed that dredging in the Ahvaz interval had no significant effect on the water surface profile (Azmi et al., 2013). The sedimentation of the Sistan feeder one and feeder two intake canals in the Chahnimeh reservoirs was simulated using the HEC RAS model. The results of this study showed that this channel causes erosion of the Sistan River bed in its upstream section (Kalantari et al., 2024).

Since a significant amount of sediment enters the Sistan River annually, and due to the low slope of the river, the way the Zahak Dam is operated can be effective in increasing sedimentation in its upstream section, this research is necessary to investigate the effect of using the Zahak Dam operation instructions on reducing sedimentation in the Sistan River.

Methodology: The Sistan River enters the Hamun of Hirmand after passing about 70 kilometers from the Sistan region (Fig. 1). The general slope of this river is about 0.0002 to 0.0006. The turbulent flow of the Hirmand River calms down upon entering the Sistan Plain.

The RAS-HEC model is one of the most common river models that can be used to simulate gradually varying flow with any type of cross section in a moving boundary in one-dimensional form. This model was developed by the US Army Corps of Engineers. This model is based on the flow equations, sediment transport, and sediment continuity equation in one-dimensional conditions (Eq. (2)) and the assumption of quasi-unsteady flow.

In this study, modeling was performed in two scenarios: the existing operation scenario and gate opening scenario based on the instructions in [Table 1](#). The existing scenario was introduced based on the exploitation method during the 2018-2019 water year ([Fig. 3](#)). In order to reduce sedimentation in the upstream section of Zahak Dam, the gate opening scenario was carried out during the modeling period of the 2018-2019 water year based on the operational instructions in [Table 1](#).

Results and Discussion: Lowering the gates of the Zahak Dam in the existing scenario and directing a significant portion of the flow through the flood way of the Niatek located upstream of the Zahak Dam towards Lake Hamoon caused water to return upstream of the Zahak Dam as shown in [Fig. 8](#). As a result, as shown in [Fig. 10](#), in the upstream section of the Zahak Dam to the Niatek spillway, which includes 13% of the simulation period, 42% of sedimentation, equivalent to 410,391 cubic meters, occurred. These results are in accordance with the research of Motlabian et al. in 2013. In the water year of 2006, the gates of the Zahak Dam were also kept low, and due to the return of water from the Zahak Dam and the creation of an opportunity for the sedimentation of suspended sediments, the amount of sediment between the Niatek spillway and the Zahak Dam under the condition of full exploitation of the Niatek spillway was twice as high as when the gates were open.

According to [Fig. 12](#), in the scenario of opening the gates, erosion has occurred in the entire upstream section of the Zahak Dam and the total bed level has decreased by 0.25 meters. The water level profile at the maximum flow rate of 853 cubic meters per second, as shown in [Fig. 11](#), shows that due to the operation of the dam gates according to the instructions in [Table 1](#), the water level depth upstream of the Zahak Dam has decreased by one meter compared to the existing scenario and has reached a level of 487 meters. In the scenario of opening the gates, the net erosion volume of the entire interval was 5.7 times the net sedimentation volume, so that at the end of the water year, 586,003 cubic meters of sediments in the upstream interval of the Zahak Dam were reduced. Therefore, the use of the Zahak Dam gate operation instructions not only did not cause sedimentation, but also provided conditions for erosion of the upstream interval.

Conclusion: In the existing scenario, the bed levels at the end of the water year increase by an average of 0.6 meters, while in the scenario of opening the gates, the bed levels of the Sistan River at the end of the water year have decreased by an average of 0.25 meters. In the existing scenario, at the end of the water year, 889,456 cubic meters of sedimentation were added to the sediments of the bed of the interval upstream of the Zahak Dam. while in the scenario of opening the gates, at 586,003 cubic meters of sediments were reduced.

© 2024 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/>)

کاهش رسوب‌گذاری رودخانه سیستان با مدیریت بهره‌برداری سد زهک با استفاده از مدل HEC-RAS

افسانه شهرکی دهسوخته^۱، فرزاد حسن‌پور^{۲*}^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایرانپست الکترونیکی نگارنده مسئول: Hassanpourir@UOZ.ac.irوبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

چکیده: رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها باعث افزایش تراز بستر و کاهش ظرفیت عبور جریان می‌شود. رودخانه سیستان دارای شیب کم و مستعد ته‌نشینی رسوبات است. سد انحرافی زهک به‌عنوان اولین سازه کنترلی در مسیر رودخانه سیستان در پایین‌دست دوشاخه رودخانه هیرمند واقع شده است. در پژوهش حاضر از مدل HEC-RAS به‌منظور کاهش رسوب‌گذاری در رودخانه سیستان استفاده گردید. در این پژوهش شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به‌صورت شبه-غیردائمی انجام شد. در این تحقیق به منظور کاهش رسوب‌گذاری رودخانه سیستان مدل‌سازی با دو سناریوی بهره‌برداری موجود و بازشدگی دریچه‌ها با دستورالعمل بهره‌برداری انجام گردید. براساس نتایج تحقیق در سناریوی موجود در پایان سال آبی ترازهای بستر به میزان متوسط ۰/۵۸ متر افزایش یافته و ۸۸۹۴۵۶ مترمکعب به رسوبات بستر بازه بالادست سد زهک اضافه‌شده است در حالی که در سناریوی بازشدگی دریچه‌ها، ترازهای بستر به میزان متوسط ۰/۲۵ متر کاهش یافته و ۵۸۶۰۰۳ مترمکعب از رسوبات بستر کاهش یافته است. بنابراین بهره‌برداری از دریچه‌های سد زهک براساس دستورالعمل می‌تواند نقش موثری در کاهش رسوب‌گذاری بازه بالادست سد زهک داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: رودخانه، رسوب، بازشدگی دریچه‌ها، HEC-RAS، سیستان.

۱- مقدمه

تحقیقات زیادی در زمینه رسوبات ته‌نشین شده رودخانه و تاثیر آن بر مقدار آبیگری رودخانه با استفاده از HEC-RAC انجام گرفته است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Azm و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی هیدرولیک جریان و رسوب بعد از اجرای عملیات لایروبی با استفاده از مدل HEC-RAS 4.0 پرداختند. با تجزیه و تحلیل نتایج

عوامل تاثیرگذار در پدیده رسوب‌گذاری مختلف می‌باشند که از آن جمله می‌توان رویداد سیلاب‌ها و تکرار آن‌ها، تغییر رژیم هیدرولیکی و رسوبی، تغییر کاربری زمین‌ها، تغییر ویژگی‌های حوضه آبریز، دخل و تصرف در اطراف رودخانه‌ها و ساخت سازه‌های مهار برای بهره‌برداری از منابع رودخانه را نام برد (Anonymous, 2007).

مدل، دیده شد که لایروبی رودخانه کارون در بازه اهواز به شکل کف کنی تاثیر فراوانی بر روی پروفیل سطح آب ندارد و تنها روند رسوب گذاری و فرسایش در این بازه را سرعت می بخشد، علاوه بر این مقاطع لایروبی شده حداکثر بعد از ۶ سال به وضعیت قبل از لایروبی در خواهند آمد.

Motlabian and Hassanpour در سال ۲۰۱۳، به تعیین برخی از مناطق رسوب گذاری رودخانه سیستان با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می دهد از ۸۸ مقطع عرضی ۴۶ عدد فرسایشی و ۴۲ عدد دارای رسوب گذاری بوده که بیشترین رسوب در بازه سرریز نیاتک و سد زهک بوده است.

Jabari و همکاران در سال ۲۰۱۴، در پژوهشی با استفاده از مدل HEC-RAS4.1 جریان رسوبات رودخانه ابهرود را شبیه سازی و ظرفیت انتقال رسوب را برآورد نمودند. بررسی تغییرات ظرفیت انتقال رسوب در طول رودخانه، نشان می دهد در بالادست رودخانه ظرفیت حمل رودخانه بیشتر از پایین دست است. همچنین بررسی وضعیت فرسایش و رسوب گذاری رودخانه نشان می دهد که وضعیت هیدرولیکی جریان در طول رودخانه به گونه ای است که تمامی مقاطع رودخانه در وضعیت فرسایش است.

Beilicci و همکاران در سال ۲۰۱۴، در رودخانه بارائولت^۱ به مدل سازی هیدرولیکی با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. در طول ۴۹ کیلومتری رودخانه، ۳۶ مقطع بر روی رودخانه انتخاب شد. داده های ورودی شامل زبری بستر رودخانه، مقطع عرضی، هیدروگراف دبی سیلاب می باشند. براساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی برحسب نقشه های میزان، می توان پهنه سیلابی، برای حداکثر دبی را مشخص کرد.

Naseri Nia و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی چگونگی تغییرات پروفیل طولی و عرضی بستر رودخانه یالفان ناشی از پدیده رسوب گذاری پرداختند و با استفاده از مدل HEC-RAS میزان ته نشست رسوب ورودی از رودخانه یالفان در

مقطع مجاور بدنه سد اکباتان^۲ را محاسبه نمودند.

Yasi و همکاران در سال ۲۰۱۷، در تحقیقی به عملکرد مدل HEC-RAS در رودخانه دانوب^۳ برای شرایط جریان پایدار و ناپایدار پرداختند. نتایج نشان داد که مدل HEC-RAS در شبیه سازی جریان نسبت به RubarBE از کارایی بهتری برخوردار است.

Sun و همکاران در سال ۲۰۱۷، حوضه رودخانه هونگی^۴ را در قسمت بالای رودخانه تومن^۵ را به عنوان منطقه تحقیق در نظر گرفتند سپس با استفاده از مدل رقومی ارتفاع زمین (DEM) و مدل HEC-RAS، مناطقی که با سیل مواجه می شوند را تعیین کردند. تجزیه و تحلیل شبیه سازی نشان می دهد که HEC-RAS عملکرد خوبی در این زمینه دارد و می تواند از تصمیم گیری برای پیشگیری و کنترل سیل پشتیبانی کند.

Sami Mohammad و همکاران در سال ۲۰۱۸، ظرفیت انتقال رسوب رودخانه فرات واقع در شاخه العباسیه^۶ را با استفاده از رابطه توفالیتی در مدل HEC-RAS برآورد نمودند. مقایسه منحنی های رتبه بندی نشان داد که پتانسیل انتقال رسوب در مقاطع دسترسی در فاصله های ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰، ۲۲۰۰ تا ۳۰۰۰ و ۳۵۸۰ متر کمتر از سایر مقاطع است همچنین برای قسمت های مستقیم، افزایش دبی ظرفیت انتقال رسوب کمتری را ایجاد می کند در حالی که بخش های پیچ خورده رفتار معکوس دارند.

Mohammed Saleh و همکاران در سال ۲۰۲۰، از نرم افزار HEC-RAS برای تجزیه و تحلیل جریان ثابت رودخانه فرات در الهندیه^۷ در کربلا استفاده نمودند. کل شهر الهندیه با انتخاب ۱۲ کیلومتر طول رودخانه و تقسیم آن به ۳۰ بخش شبیه سازی شد. از داده های میدانی سال ۲۰۱۹ برای توسعه سه نیمرخ جریان با سرعت جریان حداکثر (۴۴۵ مترمکعب بر ثانیه)، نرمال (۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه) و حداقل (۹۰ مترمکعب بر ثانیه) استفاده شد. تجزیه و تحلیل رگرسیونی نتایج نشان داد که تلفات نسبی انرژی بین هر دو بخش

⁵ Toman

⁶ Al-Abassiah

⁷ Al-Hindia

¹ Barault

² Akbatan

³ Danube

⁴ Hongqi

هیدرودینامیکی به‌ترتیب در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۴ با داده‌های مشاهده‌شده سطح آب و با استفاده از ۰/۰۲-۰/۰۲ به‌عنوان ضریب زبری مانینگ انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داده است که ۱۵ درصد و ۴۸ درصد از کل منطقه مورد مطالعه در حوادث سیل عمده ۲۰۰۴ و ۱۹۹۸ به‌ترتیب زیر آب قرار گرفته است. مدل توسعه‌یافته می‌تواند در طراحی نقشه خطر مفید باشد که می‌تواند برای تجزیه و تحلیل ریسک و ارزیابی آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌تواند در برنامه‌ریزی، توسعه بهره‌برداری از سازه‌های کنترل سیل در امتداد دشت سیلابی رودخانه کوشیارا کاربرد داشته باشد.

Moradi nejad and Hosseini در سال ۲۰۲۱، با استفاده از مدل HEC-RAS جریان رسوبات رودخانه خنداب^۴ را شبیه‌سازی نمودند. بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه نشان می‌دهد که قسمتی از مقاطع این رودخانه در وضعیت فرسایشی و قسمتی در حال رسوب‌گذاری قرار دارد.

Abd Rahman و همکاران در سال ۲۰۲۲، در این تحقیق به بررسی ویژگی‌های انتقال رسوب رودخانه لنگات^۵ در استان سلانگور مالزی که به‌طور منظم مستعد سیل است با استفاده از مدل HEC-RAS پرداختند. مدل انتقال رسوب توسط HEC-RAS ارائه‌شده در این کار، حرکت انتقال رسوب را از نظر فرسایش و رسوب در حوضه رودخانه لنگات به‌تصویر می‌کشد. ظرفیت انتقال رسوب برآورد شده توسط این مدل برای مدیریت رودخانه در بلندمدت مفید است. نتایج تغییرات بار بستر و بار رسوب در مقاطع عرضی رودخانه می‌تواند به توسعه یک مدل قوی‌تر برای پیش‌بینی سناریوهای رسوب‌گذاری آتی کمک کند.

Kalantari و همکاران در سال ۲۰۲۴، نحوه رسوب‌گذاری کانال‌های آبگیر فیدر یک و فیدر دو سیستم در شرایط رقوم حداقل سطح آب مخازن چاه‌نیمه را با استفاده از مدل HEC-RAS شبیه‌سازی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که دو کانال رفتار رسوبی متفاوتی را در شرایط یکسان

مجاور به‌شدت با تغییر نسبی سطح آب برای پروفیل‌های معمولی و حداقل، با ضرایب تعیین ۰/۹۶ و ۰/۸۸ $R^2=$ برای این نیمرخ‌ها مرتبط است.

Ghimire و Sharma در سال ۲۰۲۰، رودخانه گرند که طی چندین سال گذشته به‌طور مکرر با سیل مواجه شده بود را با استفاده از مدل HEC-RAS شبیه‌سازی نمودند. رودخانه گرند در نزدیکی شهر پینیسواییلی، اوهایو^۱ قرار داشت. تجزیه و تحلیل آسیب سیل در HAZUS-MH با شبکه‌های بعدی عمق مدل HEC-RAS انجام شد. با استفاده از مدل‌های ۱ و ۲ بعدی HEC-RAS و مدل رقومی ارتفاع زمین با وضوح تصاویر شامل ۳۰، ۱۰ و ۳ متر از طریق سایت USGS و برداشت‌های میدانی به همراه سطح مقطع رودخانه‌های مورد بررسی، وقوع سیلاب‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف از جمله ۵، ۲۵، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ سال تجزیه و تحلیل شد و نتایج نشان داد که مدل‌های ۱ بعدی و ۲ بعدی HEC-RAS تاثیر مهمی در ارزیابی آسیب سیل دارند.

Abd EL-Basset و همکاران در سال ۲۰۲۱، توانایی مدل عددی HEC-RAS در پیش‌بینی فرسایش و انتقال رسوب منطقه مورد مطالعه از رود نیل در نزدیکی شهر اسنا^۲ را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از مدل HEC-RAS برای پیش‌بینی تغییرات مورفولوژیکی در طول مطالعه با توجه به تخلیه‌های باربری شهر اسنا در مجاورت رودخانه نیل در سال‌های گذشته استفاده شد. ابتدا با آزمایش و خطا با تنظیم ضریب زبری که سطح تخمینی آب را با اندازه‌گیری شده مطابقت می‌دهد، واسنجی و اصلاح شد و نتایج نشان داد که ضریب زبری ۰/۰۳۵ و ۰/۰۳۲ برای بستر رودخانه‌ها و کانال‌ها به‌ترتیب نشان‌دهنده زبری بستر منطقه مورد مطالعه است. نتایج نشان می‌دهد که مدل HEC-RAS عملکرد رضایت بخشی برای انتقال رسوب ارائه می‌دهد.

Haque و همکاران در سال ۲۰۲۱، طغیان سیلاب رودخانه کوشیارا^۳ با روش اتصال HEC-RAS در ارتباط با HEC-GeoRAS بررسی نمودند. واسنجی و تایید مدل

^۴ Khandab

^۵ Langat

^۱ Ohio

^۲ Esna

^۳ Kushiara

پیوستگی رسوب، تغییرات بستر رودخانه را به میزان مواد رسوبی حمل شده ربط می‌دهد. HEC-RAS جهت محاسبه انتقال رسوب از معادله پیوستگی رسوب Exner استفاده می‌نماید:

$$(1 - \vartheta_p) B \frac{\partial y}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (2)$$

که در این رابطه: B = عرض کانال (متر)، y = ارتفاع از بستر کانال، ϑ_p = تخلخل لایه فعال، t = زمان (ثانیه)، x = فاصله (متر)، Q_s = میزان رسوب انتقالی (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

رابطه انتقال رسوب مورد استفاده در مدل HEC-RAS

روابطی که برای محاسبه میزان انتقال رسوبات در رودخانه استفاده می‌شود، اساساً متغیر بوده و تئوری‌های استفاده‌شده، معمولاً تجربی است البته با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری مناسب و واسنجی دقیق مدل رسوب با شرایط میدانی، می‌توان انتظار پیش‌بینی دقیقی از مدل رسوبی را داشت.

در این تحقیق از تابع انتقال رسوبات توفالتی برای انجام شبیه‌سازی استفاده شد. روش (Toffalti, 1968) کاملاً تجربی بوده و بر مبنای داده‌های زیاد صحرایی استوار است. در این روش میزان بار کل رسوبات در واحد عرض q_t از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_t = q_s + q_b \quad (3)$$

که در این رابطه q_s بار رسوبات معلق در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه در متر) و q_b بار بستر در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه در متر) است و مقدار بار معلق از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Shafaei Bajestan, 2011):

$$q_s = q_{sl} + q_{sm} + q_{su} \quad (4)$$

که در این رابطه: q_{sl} بار معلق تحتانی در واحد عرض، q_{sm}

این مدل به وسیله اداره مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته است. این مدل براساس معادلات جریان، انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در شرایط یک‌بعدی و فرض جریان شبه‌غیرماندگار توسعه یافته است (Anonymous, 2016)

برنامه سیستم تجزیه و تحلیل رودخانه مرکز مهندسی می‌تواند محاسبات مسیریابی رسوب بستر متحرک را با داده‌های سری جریان شبه ماندگار انجام دهد. این مدل ظرفیت انتقال رسوب را با تعدادی از روش‌های موجود محاسبه می‌کند. ابزار ظرفیت انتقال رسوب^۳ به کاربر این امکان را می‌دهد که ظرفیت انتقال کل یک مقطع انتخابی را تخمین بزند. علاوه بر این، HEC-RAS دارای برخی از ویژگی‌های خروجی قدرتمند است که به کاربر این امکان را می‌دهد تا ظرفیت حمل و نقل را براساس اندازه دانه، بخش فرعی، عملکرد حمل و نقل یا نمایه مشاهده کند (Brunner and Gibson, ۲۰۰۵). HEC به افزودن ویژگی‌های یک‌بعدی جدید ادامه می‌دهد که در نسخه‌های پیش‌رو از جمله انتقال با چگالی متغیر، توابع پنهان، الگوریتم‌های رسوب گذاری سیل توزیع شده و قابلیت‌های ترسیم جدید در دسترس خواهند بود (Gibson and Sanchez, ۲۰۱۷).

معادله حاکم بر جریان در مدل HEC-RAS

روش محاسبه پروفیل سطح آب در مقاطع جریان برای جریان دائمی از طریق حل معادله (۱) به روش گام‌به‌گام استاندارد است. شکل نهایی معادله انرژی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

در این رابطه Y = عمق جریان در مقاطع عرضی (متر)، Z = تراز کف کانال اصلی (متر)، V = سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، α = ضریب تصحیح انرژی جنبشی، g = شتاب ثقل، h_e = اتلاف انرژی کل (متر) می‌باشند.

معادله پیوستگی رسوب در مدل HEC-RAS

مدل‌سازی انتقال رسوب بسیار مشکل است. معادله

³ Sediment Transport Capacity

¹ United States Army Corps of Engineers

² USACE

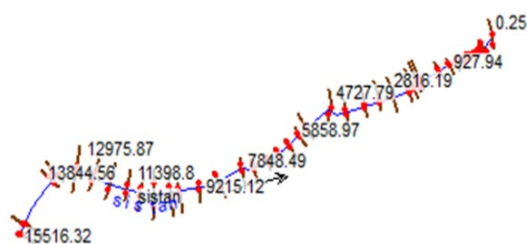


Fig. 2 Plan and cross sections of Sistan River

شکل ۲ پلان و مقاطع عرضی رودخانه سیستان

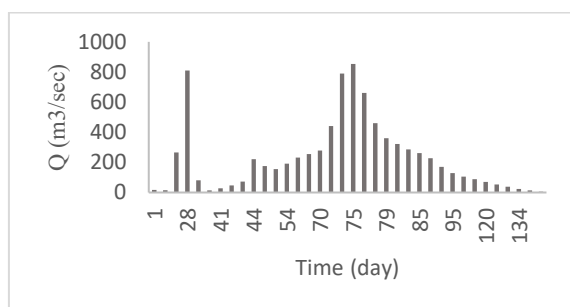


Fig. 3 Flood hydrograph of 2017-2018

شکل ۳ هیدروگراف سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷

معلق به نرم افزار HEC-RAS معرفی می شود. دانه بندی رسوبات مصالح بستر در اولین مقطع بالادست و مقطعاتهای پایین دست برداشت و به مدل معرفی گردید و با توجه به تغییرات کم دانه بندی در مسیر برای مقاطع میانی میان یابی صورت گرفت.

دانه بندی مربوط به رسوبات بستر برای مقطع بالادست و رسوبات معلق معرفی شده به نرم افزار HEC-RAS در شکل ۴ ارائه شده است.

سناریوی های شبیه سازی تحقیق

در این تحقیق به منظور کاهش رسوب گذاری رودخانه سیستان مدل سازی در دو سناریوی بهره برداری موجود و سناریوی بازشدگی دریچه ها با دستورالعمل بهره برداری انجام گردید.

سناریوی موجود براساس نحوه بهره برداری در طول سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ معرفی گردید. در سناریوی موجود نحوه مدیریت سد زهک براساس هدف استفاده حداکثر از پتانسیل سیل بر زهک - نیاتک برای کنترل سیلاب بود

بار معلق میانی در واحد عرض و q_{su} بار معلق فوقانی در واحد عرض می باشند. محاسبه بار بستر q_b در رابطه (۳) به صورت زیر است (Shafaei Bajestan, 2011):

$$q_b = \int_0^{D_s} c v d y \quad (5)$$

که در این رابطه: D_s = اندازه متوسط دانه های رسوب (متر)، c = غلظت رسوبات (مترمکعب بر مترمکعب)، v = سرعت جریان (متر بر ثانیه) و y = ارتفاع از کف (متر) است.

۲-۳- داده های وارد شده به مدل

اطلاعات هندسی

اطلاعات هندسی از مهم ترین اجزای مدل سازی هیدرولیکی رودخانه در برنامه HEC-RAS است. وارد نمودن اطلاعات هندسی مورد نیاز شامل اطلاعات اتصال برای سیستم آبراهه (طرح شماتیک سیستم کانال)، داده های مقاطع عرضی که از داده های میدانی (نقشه برداری) استفاده شده و به صورت فرمت ورودی به مدل HEC-RAS معرفی شده است و اطلاعات سازه های هیدرولیکی (سیل بر و سد و غیره) می باشند. برای این منظور ابتدا پلان رودخانه سیستان برای مدل تعریف گردید. به منظور مدل سازی از دو شاخه تقسیم جریان رودخانه هیرمند در جریکه تا سد زهک که حدود ۱۶ کیلومتر است مورد بررسی قرار گرفته و مطابق شکل ۲، ۴۳ مقطع عرضی برای بازه مورد بررسی به مدل معرفی گردید.

اطلاعات جریان

به منظور شناسایی رفتار هیدرولیکی و محاسبه نیمرخ سطح آزاد رودخانه سیستان از داده های جریان در سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ به حجم جریان یک میلیارد و هفتصد و سی میلیون مترمکعب، مطابق شکل ۳ استفاده شد. در این تحقیق مدل سازی جریان به صورت شبه ماندگار انجام گرفت.

داده های رسوب

در این بخش دانه بندی مربوط به رسوبات بستر و رسوبات

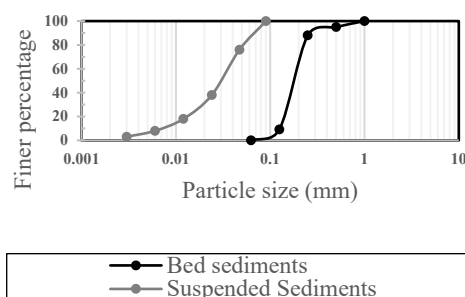


Fig. 4 Bed sediment gradation diagram for upstream section and suspended sediments

شکل ۴ نمودار دانه‌بندی رسوبات بستر برای مقطع بالادست و رسوبات معلق



Fig. 5 View upstream of Zahak Dam during the flood of the 2018-2019 water year

شکل ۵ نمای بالادست سد زهک در زمان سال آبی سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸



Fig. 6 View downstream of Zahak Dam during the flood of the 2018-2019 water year

شکل ۶ نمای پایین‌دست سد زهک در زمان سال آبی سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸

معیار ارزیابی روابط رسوبی

با توجه به اینکه در محدوده مورد مطالعه، ایستگاه آب‌سنجی کهک موجود است برای ارزیابی خطای صحت‌سنجی روابط رسوبی از معیار مجذور میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد:

بنابراین با پایین نگاه‌داشتن دریاچه‌های سد زهک بخش قابل‌توجهی از جریان به سمت سرریز جانبی زهک - نیاتک هدایت گردید و مطابق شکل ۵ رقوم سطح آب در بالای تیغه دریاچه‌های سد زهک مدیریت می‌شد. مطابق شکل ۶ از پایین‌دست سد زهک در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ از ۸ دریاچه کشویی سد زهک تنها یک دریاچه به‌صورت کاملاً باز استفاده گردید.

مطابق شکل ۵ پایین نگاه‌داشتن دریاچه‌های سد انحرافی زهک در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ باعث افزایش عمق جریان در بالادست سد زهک گردیده که این امر باعث رسوب‌گذاری زیاد در بازه ۱۵ کیلومتری بالادست آن و هدایت بخش قابل‌توجهی از جریان به مسیر کانال نیاتک گردید.

انتقال حجم زیاد جریان از طریق سرریز جانبی نیاتک به رود نیاتک، باعث شد در تاریخ یکم اردیبهشت ۱۳۹۸ سیل بند رود نیاتک در محدوده روستای گرگیچ تخریب شود و در مجموع ۹ روستای آبی، لورگ خواری، اسماعیل علی، یوسف زهی، بلوچ خان آبی، علی نمرودی، پل رنده آبی، ارگ میر جمال، عنایت و داشک دچار آب‌گرفتگی شده و تخلیه گردیدند (شکل ۷).

در راستای کاهش رسوب‌گذاری در بازه بالادست سد زهک، سناریوی بازشدگی دریاچه‌ها براساس دستورالعمل جدول ۱ تعریف گردید. به راین اساس در این سناریو در طول مدت مدل‌سازی در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بهره‌برداری از دریاچه‌های سد زهک براساس دستورالعمل بهره‌برداری جدول ۱ انجام گرفت.

شبیه‌سازی سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ براساس دستورالعمل بهره‌برداری جدول ۱ باعث شد که از دبی ماکزیمم ۸۵۳ مترمکعب بر ثانیه رودخانه سیستان، ۲۲۵/۵ آن به سرریز نیاتک و ۶۰/۵ آن به کانال‌های شهر و طاهری و ۵۶۷ مترمکعب بر ثانیه آن نیز از طریق سد زهک به پایین‌دست منتقل می‌شود که از ظرفیت تعریف‌شده ۱۶۰۰ مترمکعب بر ثانیه رودخانه سیستان در پایین‌دست سد زهک براساس طرح جامع کنترل سیل سیستان بسیار کمتر است.

همکاران در سال ۲۰۱۸ تطابق دارد. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و R^2 مربوط به هریک از روابط انتقال رسوب در [جدول ۲](#) آمده است.

۲-۳- نتایج شبیه سازی سناریوی موجود در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸

در [جدول ۳](#) ترازهای بستر و حجم رسوب گذاری در مقاطع در انتهای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ سناریوی موجود ارائه شده است. پروفیل سطح آب در دبی حداکثر جریان برابر ۸۵۳ مترمکعب بر ثانیه مطابق [شکل ۸](#) نشان می دهد که سد زهک باعث افزایش عمق و برگشت آب در بازه بالادست سد زهک شده است.

ترازهای بستر رودخانه سیستان در ابتدا و انتهای سال آبی در [شکل ۹](#) ارائه گردیده است. با توجه به [شکل ۹](#) در سناریوی موجود در اثر رسوب گذاری، ترازهای بستر در پایان سال آبی افزایش یافته است. بیشترین مقدار افزایش تراز بستر در مقاطع مربوط به بازه سد زهک تا سیل بر نیاتک و برابر ۱/۴ متر بوده در حالی که در بازه بالادست سیل بر نیاتک برابر ۰/۲ متر بوده است و میزان متوسط افزایش تراز بستر در کل بازه ۰/۶ متر است.

طرح شماتیک رسوب گذاری و فرسایش در بالادست سد زهک در پایان سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در [شکل ۱۰](#) ارائه شده است. براساس [جدول ۳](#) در سناریوی موجود حجم خالص رسوب گذاری کل بازه ۱۲ برابر حجم خالص فرسایش بوده است به طوری که در پایان سال آبی ۸۸۹۴۵۶ مترمکعب رسوب گذاری به رسوبات بستر بازه بالادست سد زهک اضافه شده است. پایین آوردن دریاچه های سد زهک در

جدول ۲ مقایسه روابط انتقال رسوب

Table 2 Comparison of sediment transfer relations

NO.	Sediment Transport Relationships	RMSE (ton/day)	R ²
1	MPM	107318	0.56
2	Acker-whit	107616	0.58
3	Yang	103481	0.41
4	Wilcok	107644	0.55
5	England-Hansen	54000	0.82
6	Laursen	87379	0.41
7	Toffaleti	*52162	*0.89



Fig. 7 Aerial photo of the extent of the flood affected area

شکل ۷ تصویر هوایی از وسعت منطقه درگیر در سال آبی

جدول ۱ دستورالعمل بهره برداری از دریچه های سد زهک

Table 1 Instructions for operating Zahak dam gates

Flow rates	<30	30-60	60-	100-
Gate opening (m)	0.1	0.2	0.3	0.6
Flow rates (m ³ /sec)	200-300	300-500	500-700	>700
Gate opening (m)	1	2	2.5	2.7

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(Q_s^* - Q_s)^2}{n}} \quad (6)$$

که در [این رابطه](#) Q_s^* = دبی رسوبات اندازه گیری شده (تن در روز)، Q_s = دبی رسوبات محاسبه شده توسط HEC-RAS (تن در روز) و n = تعداد داده ها است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت سنجی رسوبی مدل HEC-RAS

برای صحت سنجی روابط رسوب مدل HEC-RAS و تعیین رابطه مناسب برای شبیه سازی در رودخانه سیستان، نتایج برآورد رسوب هر یک از معادلات انتقال رسوب با داده های اندازه گیری شده رسوب در ایستگاه هیدرومتری جریکه مقایسه شد که برای این کار از داده های دبی-رسوب سال ۱۳۸۵-۱۳۸۶ بهره گرفته شد. در نهایت معادله توفالیتی که دارای کمترین میزان RMSE برابر با ۵۲۱۶۲ تن در روز بود به عنوان بهترین رابطه رسوبی انتخاب گردید که این نتیجه با نتایج تحقیق مرادی نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۴، Sleibi و همکاران در سال ۲۰۱۸ و Sami Mohammad و

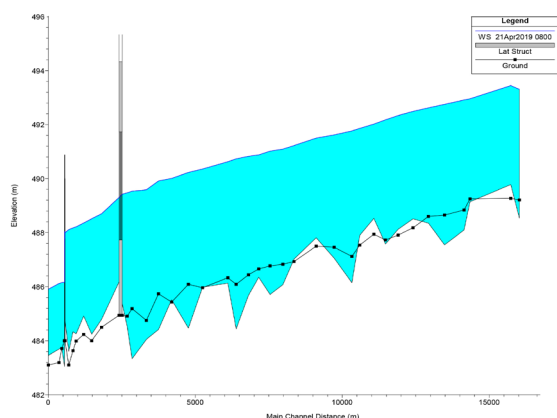


Fig. 8 Water level profile in the existing scenario at the maximum discharge

شکل ۸ پروفیل سطح آب در سناریوی موجود در دبی حداکثر

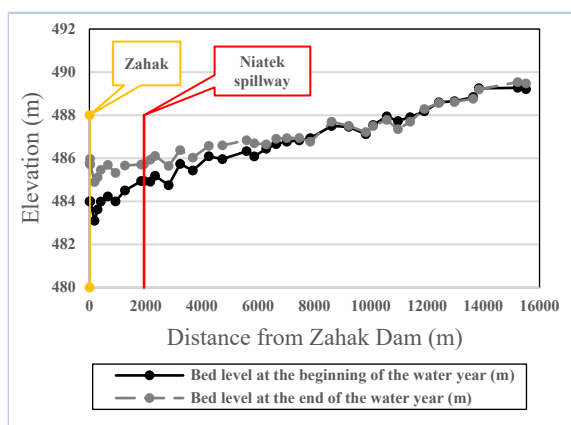


Fig. 9 Bed level diagram at the beginning and end of the water year in the existing scenario

شکل ۹ نمودار تراز بستر در ابتدا و پایان سال آبی در سناریوی موجود

بالادست سد زهک تا سرریز نیاتک که ۱۳ درصد بازه شبیه‌سازی را شامل می‌شود ۴۲ درصد رسوب‌گذاری معادل ۴۱۰۳۹۱ مترمکعب صورت پذیرفت. این نتایج در تطابق با تحقیق مطلبیان و همکاران در سال ۲۰۱۳ است. در سال آبی سال ۱۳۸۵ نیز دریاچه‌های سد زهک پایین نگه‌داشته شد که با توجه به برگشت آب سد زهک و ایجاد فرصت برای ته‌نشین شدن رسوبات معلق، میزان رسوب بین سرریز نیاتک و سد زهک در شرایط بهره‌برداری کامل از سرریز نیاتک دو برابر بیشتر از وضعیت باز بودن دریاچه‌ها گردید.

جدول ۳ ترازهای بستر و حجم رسوب‌گذاری در مقاطع در انتهای سال آبی در سناریوی موجود

Table 3 Bed levels and sedimentation volume in sections at the end of the water year in the existing scenario

No.	DZD ¹ (m)	BLBWY ² (m)	BLEWY ³ (m)	CVS ⁴ in sections at EWY ⁵ (m ³)
1	15516	489.21	489.47	2169
2	15225	489.27	489.54	60192
3	13845	489.25	489.19	8907
4	13640	488.84	488.76	-30498
5	12976	488.65	488.61	-3286
6	12426	488.60	488.57	-14543
7	11903	488.18	488.29	73530
8	11399	487.91	487.70	-4853
9	10967	487.73	487.35	36190
10	10569	487.94	487.78	77902
11	10086	487.54	487.50	27706
12	9822	487.12	487.22	-11963
13	9215	487.46	487.51	17767
14	8609	487.50	487.70	32212
15	7848	486.93	486.77	943
16	7460	486.83	486.94	-15678
17	7022	486.77	486.94	3954
18	6640	486.66	486.90	11801
19	6288	486.44	486.65	2522
20	5859	486.09	486.69	14762
21	5586	486.33	486.84	17789
22	4728	485.96	486.60	49535
23	4244	486.09	486.57	19722
24	3673	485.43	486.03	34901
25	3227	485.74	486.38	22939
26	2816	484.75	485.65	22418
27	2331	485.19	486.11	20342
28	2161	484.91	485.93	1682
29	1941	484.94	485.72	28181
30	1835	484.94	485.71	177015
31	1261	484.50	485.66	65429
32	928	484.00	485.32	30935
33	655	484.23	485.69	45155
34	402	483.99	485.46	20260
35	292	483.63	485.11	19392
36	184	483.10	484.90	16885
37	30	484.00	485.71	6295
38	20	484.00	485.97	553
39	5	484.001	485.768	293

سناریوی موجود و هدایت بخش قابل‌توجهی از جریان از طریق سیل‌بر نیاتک واقع در بالادست سد زهک به سمت دریاچه هامون سبب برگشت آب مطابق شکل ۸ در بالادست سد زهک گردید و در نتیجه مطابق شکل ۱۰ در بازه

⁴ Cumulative volume of sediments

⁵ The end of the water year

¹ Distance from Zahak Dam

² Bed level at the beginning of the water year

³ Bed level at the end of the water year

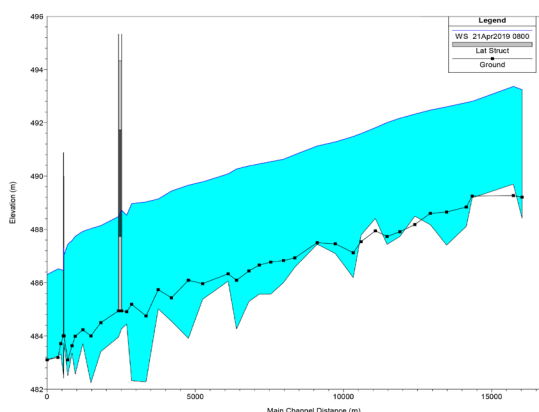


Fig. 11 Water level profile in the gate opening scenario at the maximum discharge

شکل ۱۱ پروفیل سطح آب در سناریوی بازشدگی دریچه‌ها در دبی حداکثر

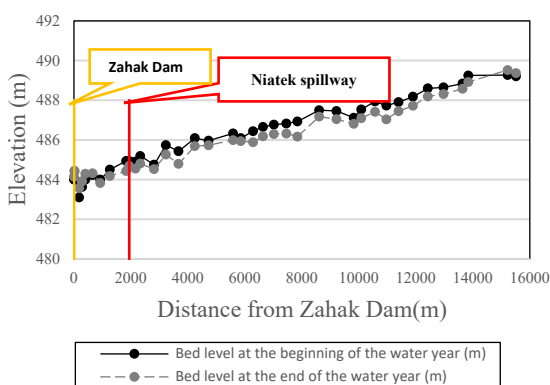


Fig. 12 Bed level diagram at the beginning and end of the water year in the gate opening scenario

شکل ۱۲ نمودار تراز بستر در ابتدا و پایان سال آبی در سناریوی بازشدگی دریچه‌ها

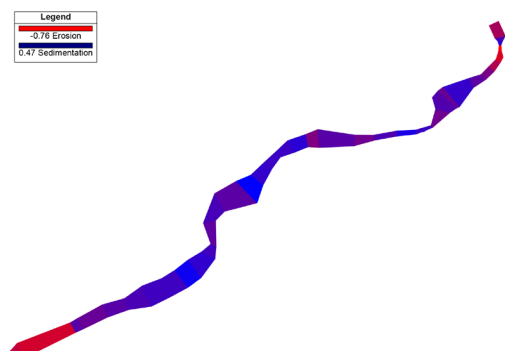


Fig. 13 Schematic diagram of sedimentation and erosion of Zahak Dam at the end of the water year in the gate opening scenario

شکل ۱۳ طرح شماتیک رسوب گذاری و فرسایش در بالادست سد زهک در پایان سال آبی در سناریوی بازشدگی دریچه‌ها

۳-۳- نتایج شبیه‌سازی سناریوی بازشدگی دریچه‌ها براساس دستورالعمل در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸

ترازهای بستر و حجم رسوب گذاری در مقاطع در انتهای سال آبی سناریوی بازشدگی دریچه‌ها در [جدول ۴](#) ارائه شده است. پروفیل سطح آب در دبی حداکثر جریان برابر ۸۵۳ مترمکعب بر ثانیه مطابق [شکل ۱۱](#) نشان می‌دهد که به دلیل بهره‌برداری از دریچه‌های سد مطابق دستورالعمل [جدول ۱](#) عمق سطح آب در بالادست سد زهک در مقایسه با سناریوی موجود، یک متر کاهش یافته و به تراز ۴۸۷ متر رسیده است.

ترازهای بستر رودخانه سیستان در ابتدا و انتهای سال آبی در [شکل ۱۲](#) ارائه گردیده است. مطابق [شکل ۱۲](#) در سناریوی بازشدگی دریچه‌ها در کل بازه بالادست سد زهک فرسایش صورت گرفته و تراز کل بستر به میزان ۰/۲۵ متر کاهش یافته است. طرح شماتیک رسوب گذاری و فرسایش در بالادست سد زهک در پایان سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در [شکل ۱۳](#) ارائه شده است. براساس [جدول ۴](#) در سناریوی بازشدگی دریچه‌ها حجم خالص فرسایش کل بازه ۵/۷ برابر حجم خالص رسوب گذاری بوده است به‌طوری‌که در پایان سال آبی ۵۸۶۰۰۳ مترمکعب رسوبات بستر بازه بالادست سد زهک کاهش یافته است. بنابراین استفاده از دستورالعمل بهره‌برداری دریچه‌های سد زهک نه تنها باعث رسوب گذاری نگردیده بلکه شرایط فرسایش بستر بازه بالادست را نیز فراهم نموده است.

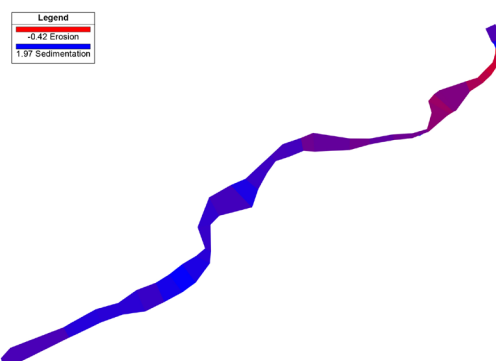


Fig. 10 Schematic diagram of sedimentation and erosion upstream of Zahak Dam at the end of the water year in the existing scenario

شکل ۱۰ طرح شماتیک رسوب گذاری و فرسایش در بالادست سد زهک در پایان سال آبی در سناریوی موجود

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی جریان و رسوب رودخانه سیستان در بالادست سد زهک با استفاده از مدل HEC-RAS نشان داد که، مدل HEC-RAS، یک مدل توانمند برای شبیه‌سازی رسوب است و رابطه توفالتی، بهترین رابطه انتقال رسوب برای رودخانه سیستان می‌باشد.

در سناریوی موجود در دبی حداکثر جریان برابر ۸۵۳ متر مکعب بر ثانیه، سد زهک باعث افزایش زیاد عمق و برگشت آب در بازه بالادست شده است در حالی که در سناریوی بازشدگی دریاچه‌ها عمق سطح آب در بالادست سد زهک در مقایسه با سناریوی موجود، یک متر کاهش یافته و به تراز ۴۸۷ متر رسیده است.

در سناریوی موجود در اثر رسوب‌گذاری ترازهای بستر در پایان سال آبی به میزان متوسط در کل بازه ۰/۶ متر افزایش می‌یابد در حالی که در سناریوی بازشدگی دریاچه‌ها ترازهای بستر رودخانه سیستان در انتهای سال آبی در کل بازه بالادست سد زهک به میزان متوسط ۰/۲۵ متر کاهش یافته است.

سناریوی موجود در بازه بالادست سد زهک تا سرریز نیاتک که ۱۳ درصد بازه شبیه‌سازی را شامل می‌شود ۴۲ درصد رسوب‌گذاری معادل ۴۱۰۳۹۱ متر مکعب صورت پذیرفت.

در سناریوی موجود حجم خالص رسوب‌گذاری کل بازه ۱۲ برابر حجم خالص فرسایش بوده است به‌طوری که در پایان سال آبی ۸۸۹۴۵۶ متر مکعب رسوب‌گذاری به رسوبات بستر بازه بالادست سد زهک اضافه شده است. در سناریوی بازشدگی دریاچه‌ها حجم خالص فرسایش کل بازه ۵/۷ برابر حجم خالص رسوب‌گذاری بوده است به‌طوری که در پایان سال آبی ۵۸۶۰۰۳ متر مکعب رسوبات بستر بازه بالادست سد زهک کاهش یافته است.

استفاده از دستورالعمل بهره‌برداری از دریاچه‌های سد زهک مبتنی بر ظرفیت مطمئن عبور سیلاب در بازه پایین‌دست سد زهک باعث کاهش قابل‌توجه رسوب‌گذاری در بازه بالادست سد خواهد گردید.

جدول ۴ ترازهای بستر و حجم رسوب‌گذاری در مقاطع در انتهای سال آبی در سناریوی بازشدگی دریاچه‌ها

Table 4 Bed levels and sedimentation volume in sections at the end of the water year in the gate opening scenario

No.	DZD (m)	BLBWY (m)	BLEWY (m)	CVS in sections at EWY (m ³)
1	15516	489.21	489.37	1254
2	15225	489.27	489.52	62101
3	13845	489.25	488.92	-15788
4	13640	488.84	488.58	-47563
5	12976	488.65	488.31	-23654
6	12426	488.60	488.19	-41534
7	11903	488.18	487.72	12920
8	11399	487.91	487.45	-21783
9	10967	487.73	487.04	-22310
10	10569	487.94	487.41	6169
11	10086	487.54	487.09	-10740
12	9822	487.12	486.81	-36056
13	9215	487.46	487.04	-23429
14	8609	487.50	487.18	-32428
15	7848	486.93	486.17	-81504
16	7460	486.83	486.32	-49574
17	7022	486.77	486.29	-28652
18	6640	486.66	486.18	-19910
19	6288	486.44	485.89	-31377
20	5859	486.09	485.94	-9228
21	5586	486.33	485.99	-29934
22	4728	485.96	485.73	-22974
23	4244	486.09	485.69	-19094
24	3673	485.43	484.79	-16173
25	3227	485.74	485.26	-17341
26	2816	484.75	484.52	-9173
27	2331	485.19	484.81	-9235
28	2161	484.91	484.55	-20737
29	1941	484.94	484.69	-54357
30	1835	484.94	484.43	32814
31	1261	484.50	484.18	-2331
32	928	484.00	483.82	-4482
33	655	484.23	484.32	-10100
34	402	483.99	484.30	2428
35	292	483.63	483.91	2439
36	184	483.10	483.57	3688
37	30	484.00	484.41	1498
38	20	484.00	484.45	126
39	5	484.00	484.15	25

5- List of Symbols

Y (m)	Flow depth in cross sections
Z (m)	Main channel bed level
V (m/Sec)	Average flow speed
α (%)	Kinetic energy correction factor
g (m/Sec ²)	Gravity acceleration
h_e (m)	Total energy loss
B (m)	Channel width
y (m)	Height from the canal bed
θ_p (%)	Active layer porosity
T (Sec)	Time
x (m)	Distance
Q_s ($\frac{m^3}{Sec}$)	Transfer sediment rate
q_t ($\frac{m^2}{Sec}$)	Total sediment load per unit width
q_s ($\frac{m^2}{Sec}$)	Suspended sediment load per unit width
q_b ($\frac{m^2}{Sec}$)	Bed load per unit width
q_{st} ($\frac{m^2}{Sec}$)	Lower suspended load per unit width
q_{sm} ($\frac{m^2}{Sec}$)	Intermediate suspended load per unit width
q_{su} ($\frac{m^2}{Sec}$)	Upper suspended load per unit width
D_s (m)	Average size of sediment grains
c (%)	Sediment concentration
RMSE (%)	Mean square error criterion
Q_s^* ($\frac{Ton}{day}$)	Measured sediment flow rate
Q_s ($\frac{Ton}{day}$)	Sediment discharge calculated by HEC-RAS
n (-)	Number of data
DZD (m)	Distance from Zahak Dam
BLBWY (m)	Bed level at the beginning of the water year
BLEWY (m)	Bed level at the end of the water year
CVS ($\frac{m^3}{Sec}$)	Cumulative volume of sediments
EWY	The end of the water year

Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation for the cooperation of the Sistan and Balouchestan Regional Water.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, F.H.; methodology, F.H., and A.S.H.; software, F.H., and A.S.H.; data analysis, F.H., and A.S.H.; writing -original draft preparation, A.S.H.; writing—review and editing, F.H.; supervision, F.H.;

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.

Data Availability Statement

The raw data supporting the conclusions of this article could be available by the authors upon the agreement of data providers organization.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abd EL-Basseta, N. Negab, A. M. Alia K. A. and Ghalyc. Sh. (2021). Utilizing The HEC-RAS Sediment Model in Prediction of the Optimal Navigation Path for The Nile River Reach Downstream Esna Barrages; Aswan University Journal of Environmental Studies (AUJES). 2(1):26-41. <https://doi.org/10.21608/aujes.2021.149762>
- Abd Rahman.N, L. Mohammed, M. Mohammad, Kh. Khalid.,V. Cent Tai, Mohamad Shakri M. Sh, S. H.Haron. (2022). Modeling of 1D sediment transport in the langat river using quasi-unsteady HEC-RAS. Journal of Biological Studies. 5 (3): 378-387. <https://doi.org/10.62400/jbs.v5i3.7045>
- Amiri, M. Kikha, M. and Hasanpour, F. (2018). Performance evaluation of Sistan and Zahak diversion dams on Sistan river using HEC-RAS hydraulic model. Environmental Science and Technology, 20(4): 51-67. <https://civilica.com/doc/1288785>
- Anonymous. (1996). Detailed studies of the comprehensive plan for revitalizing the development of agriculture and natural resources in Sistan. Varzboom Consulting Engineers, Ministry of Agriculture of Sistan and Baluchistan, 256.
- Anonymous. (2007). Guidelines for Erosion and Deposition Studies in River Management, Publications of the President's Deputy Planning and Strategic Supervision. Publication No. 383.
- Anonymous. (2016). HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centre - River Analysis System) In an Underground Canal in Southwest Kano Irrigation Scheme – Kenya. International Journal of Engineering Science Invention, 4(9): 15- 31. <https://doi.org/10.1002/ird.1995>
- Anonymous. (1992). Study plan for optimal utilization of Hirmand River water. Tehran Sahab Consulting Engineers, Special Hydrology Report, Ministry of Energy, Sistan and Baluchestan Regional Water Joint Stock

- Company, 357.
- Azam, N. and Qomshi, M. and Fayizizadeh, J. and Mansouri Hefeshjani, M. (2013). Hydraulic simulation of river management plans using Hec Ras 4 mathematical model (case study of Karun River). Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries), 27(4): 802-811. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28201>
- Beilicci, R. Beilicci, E. (2014). Advance Hydraulic Modeling Using HEC-RAS, Baraolt River, Romania. Research Journal of Agricultural Science, 46 (1): 2014. <https://doi.org/10.5593/sgem2014/b31/s12.004>
- Brunner, G. W. Gibson, S. (2005). Sediment Transport Modeling in HEC RAS. Impacts of Global Climate Change. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)442](https://doi.org/10.1061/40792(173)442)
- Ghimire, E. and Sharma, S. (2020). Flood Damage Assessment in HAZUS Using Various Resolution of Data and One Dimensional and Two-Dimensional HEC-RAS Depth Grids; Article in Natural Hazards Review November 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.15276996.0000430](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.15276996.0000430)
- Gibson, S. Sanchez, A. (2017). New One-Dimensional Sediment Features in HEC-RAS 5.0 and 5.1. Conference Paper. <https://doi.org/10.1061/9780784480625.018>
- Haque, M. H. Shaun, S. Kibria, K. M. Mohib, K. M. Sultana, A. Mamoon, W. B. (2021). Sediment Modeling of Kobadak River by HEC RAS. International Journal of Science and Research (IJSR). ISSN: 2319-7064. <https://doi.org/10.21275/sr21408124950>
- Jabari, A. Hosseini, S. A. Haqi Abhi, A. H. Imamgholizadeh, p. and Bahnia, A. (2014). Estimation of river sediment transport flow using HEC-RAS mathematical model. Irrigation and Water Engineering Research Quarterly, 4(16): 12-23.
- Kalantari, M. Hassanpour, F. and Nakhaei Moghadam, R. (2024). Comparison of the Amount of Sedimentation in the Intake Canals of Feeder One and Feeder Two. Journal of Water and Soil Conservation. 3(31): 59-84. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.21026.3615>
- Mohammed Saleh, A., Al-Din Majeed, S. A. and Algretawee, H. (2021). Analysis of the Euphrates River's movement within Al-Hindiya Karbala, relative to steady flow conditions using the HEC-RAS model; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1067 012081 <https://doi.org/10.1088/1757899x/1067/1/012081>
- Moradinejad, A. and Haqi Abhi, A. H. and Tarabi, H. (2014). Selection of the most suitable sediment transfer equations with HEC-RAS numerical model (Case study: Qara Chai River of Central Province). Watershed Research, 104: 131-123. <https://doi.org/10.22092/wmej.2014.106899>
- Moradi nejad, A. and Hosseini, A. (2021). Estimating the accuracy of sediment flow transfer relations using HEC-RAS model, case study: (Khandab River, Joshirvan Station). Journal of environment and water engineering. 8(1): 176-161. <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.292016.1587>
- Motlabian M. Hassan Pour F. (2013). Studying the location of erosion and sedimentation in the Sistan River using the HEC RAS model. International Journal of Scientific and Engineering Research. 4(10): 1377-1386.
- Mustafa, A. S., Sulaiman, S. O., Al-Alwani, K. M. (2017). Application of HEC-RAS Model to Predict Sediment Transport for Euphrates River from Haditha to Heet. Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences. 20(1): 570-577.
- Naserinia, M., Alvankar S. and H. Rebifer (2015). Modeling of the input sediment from Yalfan branch to the adjacent part of Ekbatan dam by hec-ras department. in the process of. International Conference on Environmental Science Engineering and Technologies (CESET), Faculty of Environment, University of Tehran, 5-6 pp., Tehran, Iran, 4268-4279.
- Sami mohammad, H. A. M. Alturfi, U. Abdullah Shlash, M. (2018). Sediment Transport Capacity in Euphrates River AT AL-Abbasia Reach Using HEC RAS Model. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 9(5). <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-03>
- Shafaei Bajestan, M. (2011). Theoretical and Scientific Fundamentals of Sediment Transport Hydraulics. Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Slebi, A. M. Sulaiman, S. O. Al-Alwani, K. M. (2017). Application of HEC-RAS Model to Predict Sediment Transport for Euphrates River from Haditha to Heet. Academic Scientific Journals. 20(3): Pages 570-577.
- Sun, M., Quan, H. and Lin, Zh. (2021). Research on Flood Disaster Simulation of Hongqi River Basin Based on HEC-RAS; Mengmeng Sun et al 2021 IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci. 781 022017. <https://doi.org/10.1088/17551315/781/2/022017>
- Yasi, M., Nasiri, L. and Ahmadi, S. (2017). Simulation and evaluation of the flow of rivers with permanent flow with two models HEC-RAS and RubarBE, Danesh Water and Soil Science, 27(2): 225-23.