Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Comparison of the Amount of Sedimentation in the Intake Canals of Feeder One and Feeder Two

Mohammad Kalantari[1], Farzad Hassanpour[*2], Ramin Nakhaei Moghadam[3]

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. E-mail: m.kalantari92@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. E-mail: hassanpourir@uoz.ac.ir
3. M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, Zabol University, Zabol, Iran. E-mail: rmnakhaei@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 01.30.2023
Revised: 07.16.2024
Accepted: 09.16.2024

Keywords:
HEC RAS,
Mathematical model,
Sedimentation,
Sistan River

ABSTRACT

Background and Objectives: Rivers are one of the cheapest and most accessible water resources. The construction of lateral intakes is one of the oldest methods of using river water. The Sistan plain in the southeast of the country is highly dependent on surface water resources. Currently, due to the years of drought, the only water source in the Sistan region is Chah-Nime Reservoirs. The Feeder one intake canal is the first way for directing water from the Sistan River to the reservoirs of Chah-Nime. In recent years, the Feeder two intake canal was built due to the need to increase the water intake of Chah-Nime reservoirs from the Sistan River. The low slope of the Sistan plain has made its channels prone to sedimentation and because of this, a lot of money is spent on dredging the Sistan River and the network of related canals

Materials and Methods: River studies, sediment transport and waterway changes are carried out through physical or mathematical models. The HEC RAS mathematical model is one of the models for solving steady and unsteady flow equations in order to determine the water level and hydraulic characteristics of the flow and it can perform calculations of moving bed sediment with quasi-unsteady flow data. In the current study, HEC RAS 6 was used to simulate the sediment deposition in the intake canals of feeder one and feeder two in the conditions of the minimum water level of Chah-Nime reservoirs. The simulation of the flow in the model was carried out in the quasi-unsteady method, using the standard step-by-step method and based on the annual flood hydrograph with a volume of one billion cubic meters. In this research, the Toffalti sediment transport equation was considered to determine the sediment capacity of sections.

Results: Based on the results of this research, the Toffalti sediment transport equation with Root Mean Square Error (RMSE) index equal to 52162 tons and determination coefficient (R^2) index equal to 0.89 was chosen as the best sediment relationship in HEC RAS model in the Sistan river. Based on the modeling results, in both scenarios of water intake of Feeder one and Feeder two intake canals, in the condition of the minimum water level of Chah-Nime reservoirs, the cross sections of the Sistan River will be eroded also, an erosion volume equal to 13100 cubic meters occurs in the intake canal of feeder one, which causes the level of the bed of feeder one canal to decrease by 2 meters, while under the same conditions in Feeder two canal, the volume of sedimentation is equal to 62150 cubic meters, which increases its bed level by 5.2 meters.

Conclusion: In the conditions of the minimum water level of the Chah-Nime reservoirs, the intake canal of Feeder One is erodible and the intake canal of Feeder Two is Sedimentary. Therefore, Feeder One canal is superior to Feeder Two canal due to lower dredging costs.

Cite this article: Kalantari, Mohammad, Hassanpour, Farzad, Nakhaei Moghadam, Ramin. 2024. Comparison of the Amount of Sedimentation in the Intake Canals of Feeder One and Feeder Two. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (3), 59-84.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21026.3615
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹۴

مقایسه میزان رسوب‌گذاری در کانال‌های آبگیر فیدر یک و فیدر دو

محمد کلانتری[۱]، فرزاد حسن‌پور*[۲]، رامین نخعی‌مقدم[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: m.kalantari92@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: hassanpourir@uoz.ac.ir
۳. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: rmnakhaei@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۱/۱۱/۱۰
تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۴/۲۶
تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۶/۲۶

واژه‌های کلیدی:
رسوب‌گذاری،
رودخانه سیستان،
مدل ریاضی،
HEC RAS

چکیده

سابقه و هدف: رودخانه‌ها یکی از ارزان‌ترین و در دسترسی‌ترین منابع آب می‌باشند. ساخت آبگیرهای جانبی از قدیمی‌ترین روش‌های استفاده از آب رودخانه‌ها است. دشت سیستان در جنوب شرقی کشور وابستگی شدیدی به منابع آب‌های سطحی دارد. در شرایط کنونی با توجه به سال‌ها خشک‌سالی در این دشت، تنها منبع آبی دشت سیستان، مخازن چاه‌نیمه می‌باشند. کانال آبگیر فیدر یک نخستین مسیر هدایت جریان آب از رودخانه سیستان به سمت مخازن چاه‌نیمه‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر کانال فیدر دو، با توجه به‌ضرورت افزایش آبگیری مخازن چاه‌نیمه از رودخانه سیستان احداث گردید. شیب کم دشت سیستان، کانال‌های آن را مستعد رسوب‌گذاری نموده است و سالانه هزینه‌های زیادی صرف لایروبی رودخانه سیستان و کانال‌های وابسته می‌شود.

مواد و روش‌ها: مطالعات هیدرولیک رودخانه، انتقال رسوب و تغییرات آبراهه از طریق مدل فیزیکی و یا مدل ریاضی انجام می‌گیرد. مدل ریاضی HEC RAS، یکی از مدل‌های رایج حل معادلات جریان ماندگار و غیرماندگار به‌منظور تعیین تراز سطح آب و مشخصات هیدرولیکی جریان می‌باشد و می‌تواند محاسبات مربوط به رسوبات را با داده‌های جریان شبه غیرماندگار انجام دهد. در پژوهش حاضر از HEC RAS 6 به‌منظور انجام شبیه‌سازی نحوه رسوب‌گذاری در کانال‌های آبگیر فیدر یک و فیدر دو در شرایط رقوم حداقل سطح آب مخازن چاه‌نیمه استفاده گردید. شبیه‌سازی جریان در مدل به‌صورت شبه غیردائمی، با استفاده از روش گام‌به‌گام استاندارد و براساس هیدروگراف سالانه به حجم یک میلیارد مترمکعب انجام گردید. در این پژوهش تابع انتقال رسوب توفالتی برای تعیین ظرفیت رسوب مقاطع در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: براساس نتایج این پژوهش، معادله انتقال رسوب توفالتی با شاخص جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۵۲۱۶۲ تن و شاخص ضریب تبیین برابر ۰/۸۹ به‌عنوان بهترین رابطه

رسوبی در مدل HEC RAS برای رودخانه سیستان انتخاب گردید. براساس نتایج مدل‌سازی، در هر دو سناریوی آبگیری کانال آبگیر فیدر یک و کانال آبگیر فیدر دو در شرایط رقوم حداقل سطح آب مخازن چاه‌نیمه، مقاطع عرضی رودخانه سیستان مورد فرسایش قرار می‌گیرند. در کانال آبگیر فیدر یک حجم فرسایش برابر با ۱۳۱۰۰ مترمکعب رخ می‌دهد که باعث کاهش تراز بستر کانال فیدر یک به مقدار ۲ متر می‌گردد؛ درحالی‌که در شرایط یکسان در کانال آبگیر فیدر دو، حجم رسوب‌گذاری برابر با ۶۲۱۵۰ مترمکعب ایجاد می‌گردد که باعث افزایش تراز بستر آن به مقدار ۵/۲ متر می‌شود.

نتیجه‌گیری: در شرایط رقوم حداقل سطح آب مخازن چاه‌نیمه، کانال آبگیر فیدر یک فرسایش‌پذیر و کانال آبگیر فیدر دو رسوب‌گذار است بنابراین کانال فیدر یک نسبت به کانال فیدر دو به دلیل هزینه‌های لایروبی کم‌تر، برتری دارد.

استناد: کلانتری، محمد، حسن‌پور، فرزاد، نخعی‌مقدم، رامین (۱۴۰۳). مقایسه میزان رسوب‌گذاری در کانال‌های آبگیر فیدر یک و فیدر دو. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۳)، ۸۴-۵۹.
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21026.3615

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

رودخانه‌ها یکی از ارزان‌ترین و در دسترسی‌ترین منابع آب برای انسان می‌باشند که آبگیری از آن‌ها دارای اهمیت است. با توجه به اهمیت رودخانه‌ها، آبگیری از رودخانه و انشعاب جریان از آن‌یکی از مباحث مهم در مهندسی هیدرولیک و رودخانه است (۱). شناخت رفتار رودخانه و انجام فعالیت‌های سازگار با طبیعت رودخانه و اقدامات مهندسی به‌جا، همواره دغدغه مهندسین درگیر با این رشته بوده است و در این راستا از نرم‌افزارهای مرسوم در مهندسی رودخانه در راستای شبیه‌سازی پدیده‌های موردنظر و ساماندهی رودخانه استفاده می‌شوند (۲). از قدیمی‌ترین روش‌های استفاده از آب رودخانه‌ها، ساخت آبگیرهای جانبی می‌باشد. یکی از نکات مهم در طراحی آبگیرهای جانبی، انحراف جریان آب توسط آبگیر با حداکثر دبی جریان و حداقل دبی رسوب می‌باشد. پس‌ازآن‌که رسوبات مجاور کف به داخل آبگیر منتقل شدند، در ناحیه جدایی جریان به تله می‌افتند. رسوبات با توجه به سرعت‌های کم نمی‌توانند از منطقه جداشدگی منتقل شوند، درنتیجه امکان ته‌نشینی رسوبات و انسداد مسیر جریان به وجود می‌آید (۳). رسوبات ورودی به کانال آبگیر به‌دلیل کاهش سرعت جریان در این کانال‌ها به‌سرعت در ابتدای کانال ترسیب و مشکلاتی ازجمله انسداد کانال، کاهش ظرفیت انتقال آن و نیز افزایش زبری به‌دلیل تشکیل فرم بستر را به وجود می‌آورد (۴).

مطالعات زیادی در زمینه شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و کانال‌ها با استفاده از مدل HEC RAC[1] انجام شده است که در ادامه تعدادی از آن‌ها بیان می‌گردد. گیبسون و همکاران (۲۰۰۶)، قابلیت مدل HEC RAS را برای محاسبات انتقال رسوب رودخانه موردبررسی قرار دادند و نتایج را با مدل HEC-6 مقایسه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند مدل HEC RAS در شبیه‌سازی‌ها به‌خوبی عمل نموده اما نتایج این مدل در مقایسه با HEC-6 در شرایط خاص، کمی متفاوت بوده که به دلیل تفاوت در روابط هیدرولیکی مدل است (۵). بهرنگی و همکاران (۲۰۰۶)، به بررسی روند رسوب‌گذاری در مخزن سد لتیان به‌وسیله نرم‌افزار HEC RAS با نگاه به توابع انتقال رسوب و روش‌های سرعت سقوط به کار گرفته‌شده در آن پرداختند. نتایج نشان داد توابع انتقال رسوب یانگ و توفالتی بهترین دقت را نشان دادند (۶). اکبری و همکاران (۲۰۱۱)، ترکیب‌های مختلف معادلات انتقال رسوب و روش‌های مختلف محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل HEC RAS را در پیش‌بینی تغییر فرم بستر رودخانه به‌کار گرفتند و نتایج نشان داد که معادلات انتقال رسوب حساسیت چندانی به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل‌سازی تغییر فرم بستر رودخانه ندارند و تفاوت عمده نتایج بستگی به نوع معادله انتقال رسوب دارد (۷). پیرو و همکاران (۲۰۱۲)، در پژوهشی نشان دادند که حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه با استفاده از مدل HEC RAS به‌خوبی قابل‌محاسبه است (۸). مطلبیان و حسن‌پور (۲۰۱۳)، به تعیین برخی از مناطق رسوب‌گذاری رودخانه سیستان با استفاده از مدل HEC RAS پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد از ۸۸ مقطع عرضی ۴۶ عدد فرسایشی و ۴۲ عدد دارای رسوب‌گذاری بوده که بیش‌ترین رسوب در بازه سرریز نیاتک و سد زهک بوده است (۹).

جباری و همکاران (۲۰۱۴)، آورد رسوبی رودخانه ابهررود و نحوه توزیع آن در طول مسیر رودخانه را با استفاده از مدل HEC RAS 4.1 موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وضعیت هیدرولیکی جریان در طول رودخانه به‌گونه‌ای است که تمامی مقاطع

1- Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

رودخانه در وضعیت فرسایش است (۱۰). مرادی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴)، به بررسی رسوبات رودخانه قره‌چای استان مرکزی با استفاده از مدل رایانه‌ای HEC RAS پرداختند. با توجه به نتایج، معادلات انگلوند-هانسن، پیتر-میر و مولر و توفالتی بهتر از سایر روابط می‌باشند (۱۱). نوروزی و همکاران (۲۰۱۴)، برای بررسی ابعاد مختلف انتقال رسوب از ایستگاه هیدرومتری کشکان- پل‌دختر لرستان از نرم‌افزار HEC RAS 4.1 استفاده نمودند. نتایج، کارایی مناسب مدل برای شبیه‌سازی رسوب و نیز تطابق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده را نشان داد (۱۲). برگوت و همکاران (۲۰۱۶)، انتقال رسوب در وادی کمورا[1] را با استفاده از مدل HEC RAS و در طول رویدادهای جریان سیل بررسی نمودند. در تجزیه‌وتحلیل نتایج از پارامترهای دو سیل مختلف در امتداد سیستم وادی کمورا استفاده شد و با استفاده از مدل ظرفیت انتقال رسوب، حجم رسوبات تحویلی و خروجی از سیستم و مناطق حساس به فرسایش و رسوب حاصل گردید (۱۳).

حامد (۲۰۱۶)، به بررسی نرخ انتقال رسوبات رودخانه فرات[2] در شهر الهندیه[3] با استفاده از مدل HEC RAS 4.1 پرداخت. نتایج حاصل نشان‌دهنده کاربرد موفقیت‌آمیز مدل ریاضی HEC RAS برای شبیه‌سازی جریان کانال رودخانه در مقیاس بزرگ می‌باشد، هم‌چنین این مدل دارای ابزاری قدرتمند برای محاسبات انتقال رسوب است که تطابق کیفیت مدل‌سازی با شرایط واقعی را ارائه می‌دهد (۱۴). اوچیره (۲۰۱۶)، شبیه‌سازی انتقال رسوب را در کانال طرح آبیاری جنوب‌غربی کانو[4] - کنیا[5] با استفاده از HEC RAS انجام داد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل HEC RAS کالیبره شده می‌تواند اندازه‌های رسوبی را که در بخش‌های خاصی از کانال در دبی‌های مختلف رسوب نموده، پیش‌بینی نماید و ازآن‌جایی‌که دبی غالب کم‌تر از سرعت بحرانی بود، رسوب‌گذاری رخ داد. دانه‌های کلاس ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ باید از ورود به کانال غربالگری شوند تا اطمینان حاصل شود که رسوبات واردشده به کانال بدون رسوب به خروجی کانال منتقل می‌شوند (۱۵). قیمیره و همکاران (۲۰۱۶)، در مطالعه‌ای با استفاده از قابلیت مدل‌سازی شبه غیرماندگار یک‌بعدی نرم‌افزار HEC RAS به پیش‌بینی تجمع رسوب در منطقه ساخت سد در رودخانه اوهایو[6] پرداختند و برنامه لایروبی را تعیین نمودند. نتایج این پژوهش مدلی را ایجاد می‌کند که می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی رویداد لایروبی باشد (۱۶). داس و سیل (۲۰۱۷)، میزان رسوب‌دهی به رودخانه برک[7] را با استفاده از HEC RAS برآورد نمودند. نتایج نشان می‌دهد که مدل به‌خوبی عمل می‌کند و می‌تواند حرکت تخلیه رسوب را توصیف کند و هم‌چنین می‌تواند میزان رسوب و فرسایش رسوب را در بخش‌های مختلف در محدوده مطالعه تخمین بزند (۱۷).

هاک و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از مدل HEC RAS انتقال رسوب رودخانه کوبادک[8] را شبیه‌سازی نمودند. این پژوهش در راستای شناسایی فرسایش-رسوب سطح مقاطع مختلف برای سال ۲۰۱۶ در امتداد رودخانه کوبادک متمرکز شد. طبق نتایج، رسوب-فرسایش از ۰/۰۱۵ متر تا ۲ متر برای مقاطع مختلف متغیر است (۱۸). مرادی‌نژاد و حسینی (۲۰۲۱)، در پژوهش خود با استفاده از مدل HEC RAS جریان رسوبات رودخانه خنداب را شبیه‌سازی نمودند. بررسی وضعیت فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه نشان می‌دهد که قسمتی از

1- Wadi chemora
2- Euphrates
3- Al- Hindiya
4- Kano
5- Kenya
6- Ohio river
7- Barak River
8- Kobadak

مقاطع این رودخانه در وضعیت فرسایشی و قسمتی در حال رسوب‌گذاری قرار دارد (۱۹). تیاگاراجان (۲۰۲۲) با استفاده از Hec-Ras 5.0 مدل‌سازی انتقال رسوب در جریان برای رودخانه الهله[1] را انجام داد. نتایج نشان داد که تغییرات بستر رودخانه با توجه به مقاطع رودخانه و نوع مواد رسوبی متفاوت بوده و با عبور از مرکز شهر حله[2]، غلظت رسوب در قسمت رودخانه افزایش یافته و این غلظت به ۱۲۵ میلی‌گرم در لیتر رسید (۲۰).

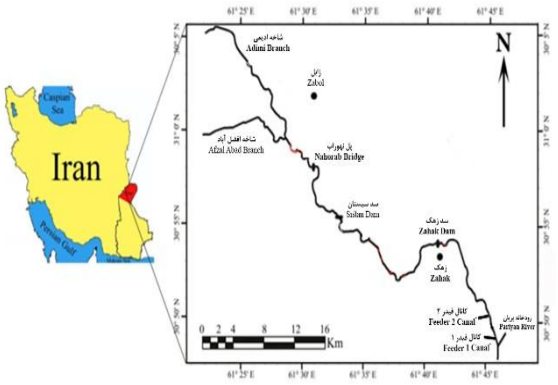
مخازن چاه‌نیمه در حال حاضر تنها منبع و ذخیره‌گاه آبی مطمئن در دشت سیستان با توجه به خشک شدن دریاچه هامون به دلیل عدم ورود آب قابل‌ملاحظه به آن می‌باشند. مخازن چاه‌نیمه صرفاً در زمان طغیان‌های رودخانه هیرمند و فصول پرآبی (زمستان و بهار) از آب رودخانه سیستان بهره‌مند می‌گردند. رسوبات ورودی به مخازن چاه‌نیمه معمولاً از طریق سیلاب‌های رودخانه وارد مخازن می‌گردند (۲۱). زمانی که رودخانه هیرمند، سیلابی می‌شود، طبق برنامه، مقادیری از سیلاب از طریق یک کانال که به کانال آبگیر فیدر یک چاه‌نیمه‌ها معروف است، از طریق دهانه آبگیر جریکه، به داخل چاه‌نیمه شماره یک، هدایت می‌شود که در صورت تداوم جریان سیلاب، با آب‌گیری چاه‌نیمه یک، سپس چاه‌نیمه شماره دو و سه و نهایتاً چاه‌نیمه چهارم، آبگیری می‌گردد. ازآن‌جایی‌که مدت‌زمان جریان سیلاب‌ها، محدود است و تنها یک کانال، وظیفه آب‌گیری را عهده‌دار است، قاعدتاً حجم آبی که ذخیره‌سازی می‌شود، کم خواهد بود (۲۲). در سال‌های اخیر کانال آبگیر فیدر دو به‌منظور افزایش آبگیری مخازن چاه‌نیمه احداث گردید.

شیب کم رودخانه سیستان، آن را مستعد رسوبگذاری نموده است و ازاین‌رو سالانه هزینه زیادی صرف لایروبی رودخانه سیستان و شبکه نهرهای وابسته می‌شود. مدل HEC RAS با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده دارای عملکرد خوبی در شبیه‌سازی جریان و رسوب در مجاری روباز است. دو کانال آبگیر فیدر یک و فیدر دو نقش حیاتی در هدایت جریان رودخانه سیستان برای ذخیره‌سازی آب در مخازن چاه‌نیمه دارند. ازآن‌جایی‌که این دو کانال ازنظر موقعیت قرارگیری و نحوه طراحی تفاوت‌های اساسی با یکدیگر دارند، در این پژوهش با استفاده از مدل HEC RAS عملکرد هیدرولیکی و رسوبی آن‌ها مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد و برای اولین بار از طریق مدل‌سازی رسوبی مشکلات دو کانال آبگیر فیدر یک و فیدر دو بررسی‌شده و کانال آبگیری که مشکلات رسوب‌گذاری کم‌تری دارد، معرفی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه: رودخانه سیستان با آبدهی سالانه ۲/۶ میلیارد مترمکعب و نوسانات بسیار زیاد از هیرمند منشعب شده و بعد از آبیاری دشت سیستان به هامون هیرمند تخلیه می‌شود. در طول مسیر این رودخانه سازه‌های مهمی مانند کانال‌های آبگیر فیدر یک و دو، سد کهک، سیل بر زهک-نیاتک، سد زهک، کانال هدریس، سد سیستان، پل نهورآب و کانال‌های متعدد آبیاری، قرار دارد که هر یک تأثیر قابل‌توجهی در روند هیدرولیکی رودخانه دارند (۲۳). طول رودخانه سیستان به حدود ۷۰ کیلومتر می‌رسد که ارتفاع ابتدای آن ۴۹۲ متر و ارتفاع انتهای آن در پایین‌ترین نقطه ۴۷۳ متر از سطح دریا می‌باشد. پلان رودخانه سیستان در شکل ۱ ارائه شده است (۲۴). شیب کم رودخانه سیستان، آن را مستعد رسوب‌گذاری نموده است به‌طوری‌که طبق قرارداد ۵ ساله شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان در سال ۱۳۹۶، حجم لایروبی موردنیاز برای ۱۲۸۰۰ متر طول رودخانه برابر ۱،۸۰۰،۰۰۰مترمکعب است.

1- Al-Hala River
2- Hillah



شکل ۱- موقعیت رودخانه سیستان.

Figure 1. Location of Sistan River.

کانال آبگیر فیدر یک: کانال آبگیر فیدر یک نخستین مسیر ورودی آب از رودخانه سیستان به سمت چاه‌نیمه‌ها می‌باشد. دهانه آبگیر کانال چاه‌نیمه در قسمت قوس خارجی رودخانه هیرمند و در محل انشعاب رودخانه سیستان احداث گردیده است. آب دریافت شده توسط این سازه مطابق شکل ۲ از طریق کانال دوزنقه‌ای به مخزن شماره یک چاه‌نیمه منتقل می‌شود. عرض کل دهانه ۳۰ متر است که دارای ۵ دریچه به ابعاد ۵×۴/۵ و طول ۴ کیلومتر از نقطه ۴۸۹ متر بر روی رودخانه سیستان شروع و در ارتفاع ۴۸۷ متر به چاه‌نیمه شماره یک می‌رسد (۲۵).

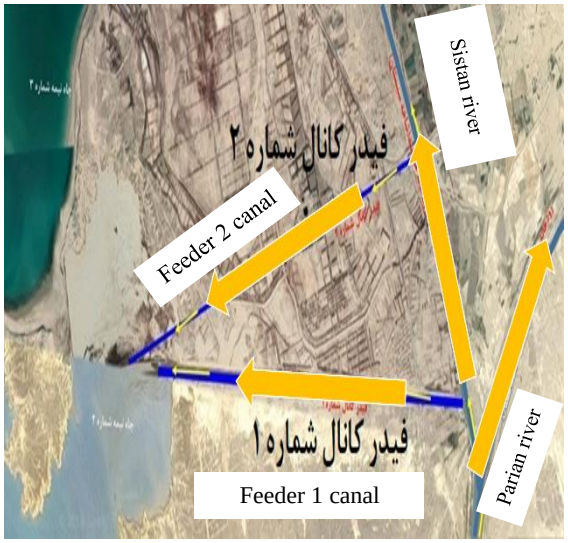


شکل ۲- کانال آبگیر فیدر یک.

Figure 2. Feeder one intake canal.

کانال آبگیر فیدر دو: سازه کانال فیدر دو، با توجه به مطالعات انجام‌شده و مشخص شدن ضرورت افزایش آبگیری مخازن چاه‌نیمه از رودخانه سیستان مطابق شکل ۳ احداث گردید. این کانال خاکی به‌صورت ذوزنقه‌ای با شیب طولی معادل ۰/۰۰۲ درصد، عرض کف کانال ۶۰ متر شیب ۱/۵ افقی به ۱ قائم دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. ارتفاع کانال برابر ۱۲ متر و تراز ورودی کانال معادل ۴۸۵ متر است. در طراحی

صورت گرفته برای کانال فیدر ۲ طبق قرارداد پ/۱۳۹۶/۱۶۲ مورخ ۱۳۹۶/۷/۱۵ آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، مشاور طرح، کانالی خاکی با عمق زیاد در پایین‌دست دهانه آبگیر کانال فیدر ۱ در رودخانه سیستان طراحی نمود که حجم خاک‌برداری آن برای طول ۴ کیلومتری کانال بالغبر ۵ میلیون مترمکعب می‌گردد و هزینه ساخت آن بالغبر ۵۵ میلیارد تومان در سال ۱۳۹۶ گردید. ازجمله اهداف ساخت کانال فیدر دو انتقال حداکثری آب به داخل چاه‌نیمه‌ها، کنترل سیلاب ورودی به سیستان و تأمین ایمنی مردم و تأسیسات منطقه و افزایش سهم آبگیری سیستان از رودخانه هیرمند برای چاه‌نیمه‌ها به‌خصوص در دبی‌های کم است. (۲۵).



شکل ۳- پلان کانال‌های فیدر یک و فیدر دو.

Figure 3. Plan of feeder one and feeder two canals.

معرفی مدل HEC RAS: این مدل از رایج‌ترین مدل‌های رودخانه‌ای است که با استفاده از آن می‌توان جریان متغیر تدریجی را با هر نوع مقطع عرضی در حالات دائمی، غیردائمی و انتقال رسوب را در مرز متحرک به‌صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی نمود. این مدل به‌وسیله اداره مهندسی ارتش آمریکا توسعه‌یافته و در آخرین نگارش خود علاوه بر قابلیت‌های قبلی توانایی تحلیل فرآیند رسوب و فرسایش، کیفیت را نیز دارا است. این مدل براساس معادلات جریان، انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در شرایط یک‌بعدی و فرض جریان شبه‌غیرماندگار توسعه یافته است (۲۶).

مدل ریاضی HEC RAS، یکی از مدل‌های حل معادلات جریان ماندگار و غیرماندگار به‌منظور تعیین تراز سطح آب و مشخصات هیدرولیکی جریان، می‌باشد. این مدل قادر به محاسبه پروفیل‌های سطح آب در شرایط جریان یک‌بعدی و متغیر تدریجی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار در آبراهه‌های طبیعی و یا مصنوعی با هر مقطعی و در وضعیت‌های جریان زیربحرانی، فوق‌بحرانی و یا ترکیبی است. هم‌چنین این سیستم قادر به در نظر گرفتن یک شبکه کامل از کانال‌ها، یک سیستم شاخه‌ای یا یک بازه واحد از رودخانه می‌باشد (۲۷).

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. معادله نهایی انرژی برای دو مقطع عرضی ۱ و ۲ در طول کانال به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e \quad (۱)$$

در این رابطه، Y عمق متوسط جریان در مقطع عرضی برحسب (m)، Z تراز کف کانال اصلی در مقطع عرضی برحسب (m)، V سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی برحسب (m/s)، α ضریب تصحیح انرژی جنبشی مقطع عرضی (Dimensionless Quantity)، g شتاب ثقل برحسب (m/s^2)، h_e اتلاف انرژی کل (m) می‌باشند.

معادله پیوستگی رسوب در مدل HEC RAS: مدل‌سازی انتقال رسوب بسیار مشکل می‌باشد. داده‌هایی که برای پیش‌بینی تغییرات بستر رودخانه استفاده می‌شود، اساساً متغیر بوده و تئوری استفاده شده، تجربی است و نسبت به تغییرات فیزیکی بسیار حساس می‌باشد. گرچه با استفاده از داده‌های مناسب و واسنجی دقیق مدل رسوب با شرایط میدانی، می‌توان انتظار بیش‌بینی دقیقی از مدل داشت. HEC RAS جهت محاسبه انتقال رسوب از معادله پیوستگی رسوب Exner استفاده می‌نماید (۲۷):

$$(1 - \vartheta_p) B \frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (۲)$$

که در آن، B عرض کانال، α ارتفاع بستر کانال، ϑ_p تخلخل لایه فعال، t زمان، x فاصله، Q_s میزان رسوب انتقالی می‌باشد. این معادله به راحتی وضعیت حجم رسوب (به عنوان مثال فرسایش یا رسوب‌گذاری) را در حجم کنترل مشخص می‌نماید، که این مقدار معادل تفاوت بین حجم رسوب ورودی و خروجی می‌باشد.

توفالتی (۱۹۶۸) معادله انتقال رسوبی برای دانه‌بندی ماسه ارائه داد (۲۸). توفالتی آزمایش‌های خود را پیرامون رودخانه‌های بزرگ انجام داد بنابراین معادله او چندان وابسته به‌سرعت برشی نبود. درواقع وی با رگرسیون‌گیری از دما و یک پارامتر تجربی که رابطه بین رسوب و مؤلفه‌های هیدرولیکی را نشان می‌داد، به معادله خود رسید. اگرچه روابط تجربی انتقال رسوب فراوانی توسط پژوهش‌گران برای شرایط مختلف رودخانه‌ها ارائه شده است، اما با توجه به پیچیدگی‌های فرآیندهای هیدرولیک جریان و انتقال رسوب در رودخانه‌ها، هیچ‌کدام از این معادلات تجربی قادر به محاسبه دقیق ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه‌های مختلف و یا حتی بازه‌های مختلف یک رودخانه نیستند. با توجه به یک‌بعدی بودن معادلات تجربی انتقال رسوب، پارامترهای هیدرولیکی مثل عمق و سرعت جریان باید به‌صورت متوسط محاسبه شده و در روابط به کار روند. این در حالی است که در عرض رودخانه‌ها و به‌ویژه در شرایط سیلاب، مقادیر عمق و سرعت در عرض رودخانه ممکن است بسیار متفاوت باشند. به همین دلیل استفاده از مقادیر متوسط آن‌ها با خطا همراه خواهد بود.

در حقیقت در مقطع عرضی از رودخانه، هر ذره آب با سرعت خاص خود حرکت نموده و ظرفیت انتقال رسوب خاصی خواهد داشت. هم‌چنین بسیاری از پژوهش‌گران، ارتباط شدید بین سرعت جریان و انتقال رسوب معلق را اثبات نموده‌اند.

در این پژوهش از معادله انتقال رسوبات توفالتی برای تعیین ظرفیت انتقال رسوب مقاطع استفاده شد. معادله توفالتی کاملاً تجربی بوده و بر مبنای داده‌های زیاد صحرایی استوار است و براساس پروفیل توزیع غلظت در عمق می‌باشد. در این روش پروفیل عمقی جریان به چهار ناحیه، منطقه بالایی بار معلق، منطقه میانی بار معلق، منطقه پایینی بار معلق و منطقه بار بستر تقسیم می شود و مقدار بار کل رسوب به صورت رابطه‌های ۳ تا ۵ می‌باشد (۲۹):

$$q_T = \frac{nP_i q_{Ti}}{100} \quad (۳)$$

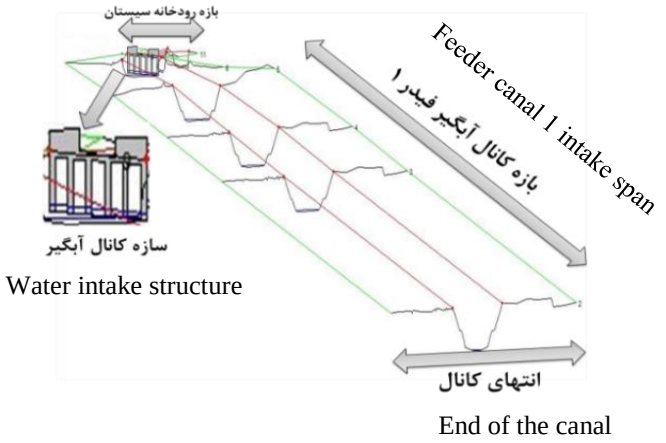
$$q_{Ti} = q_{si} + q_{bi} \quad (۴)$$

$$q_{si} = q_{SLi} + q_{SMi} + q_{SUi} \quad (۵)$$

که در این روابط، q_T مقدار بار کل رسوب برحسب (ton/day)، n تعداد تقسیمات منحنی دانه‌بندی برحسب (Dimensionless Quantity)، P_i درصد وزنی مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (Dimensionless Quantity)، q_{Ti} مقدار بار کل رسوب مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (ton/day)، q_{si} مقدار بار کل معلق مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (ton/day)، q_{bi} مقدار بار بستر مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (ton/day)، q_{SLi} مقدار بار معلق در منطقه پایینی مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (ton/day)، q_{SMi} مقدار بار معلق در منطقه میانی مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (ton/day)، q_{SUi} مقدار بار معلق در منطقه بالایی مربوط به قطر رسوبات D_{si} برحسب (ton/day) می‌باشد.

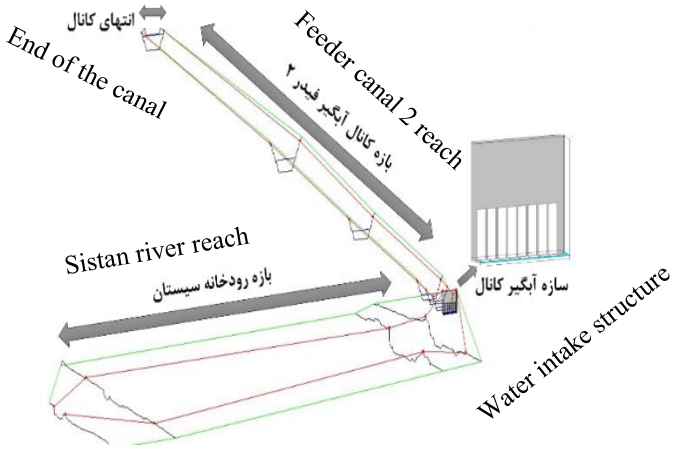
داده‌های وارد شده به مدل

اطلاعات هندسی: اطلاعات هندسی از مهم‌ترین اجزای مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه در برنامه HEC RAS است. وارد نمودن اطلاعات هندسی موردنیاز شامل اطلاعات اتصال برای سیستم آبراهه (طرح شماتیک سیستم کانال)، داده‌های مقاطع عرضی و اطلاعات سازه‌های هیدرولیکی (سیل بر و سد و غیره) می‌باشند. به این منظور با استفاده از نقشه توپوگرافی مقاطع عرضی کانال فیدر یک و کانال فیدر دو برای مدل تعریف گردید. به‌منظور مدل‌سازی این کانال‌ها مطابق شکل ۴ و شکل ۵ تعداد ۹ مقطع عرضی برای فیدر یک و تعداد ۱۳ مقطع عرضی برای فیدر دو که ۳ مقطع اول مربوط به سازه آبگیر ورودی بوده، در نظر گرفته شد و هم‌چنین برای مدل‌سازی سازه کنترل جریان ورودی از مشخصات سازه آبگیر کانال فیدر یک و فیدر دو گزارش‌های مطالعات کنترل سیل رودخانه سیستان و مطالعات مرحله اول ارزیابی کیفی سازه‌های هیدرولیکی سیستان شرکت مهندسین مشاور آبشاران، استفاده گردید.



شکل ۴- کانال فیدر یک.

Figure 4. Feeder canal one.



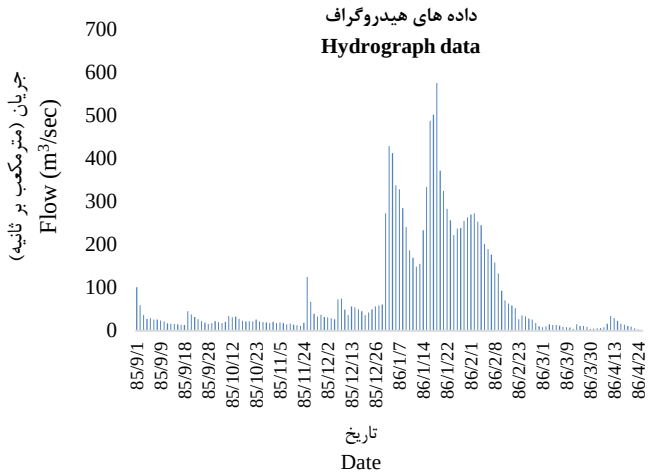
شکل ۵- کانال فیدر دو.

Figure 5. Feeder canal 2.

اطلاعات جریان: پس از وارد نمودن اطلاعات هندسی به منظور شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه، محاسبه نیمرخ سطح آزاد و پدیده‌های هیدرولیکی و رسوبی دو کانال آبگیر، اطلاعات جریان در راستای مدلسازی جریان به صورت شبه ماندگار به مدل وارد گردید. با توجه به بهره‌برداری افغانستان از بند کمال‌خان در ۷۵ کیلومتری دشت سیستان با اهداف، آبیاری ۱۷۴,۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی، ذخیره ۵۲ میلیون مترمکعب آب، تولید ۹ مگاوات برق و کنترل سیل از طریق انحراف جریان به سمت گود زره، جریان رودخانه هیرمند به سمت ایران کاهش قابل‌توجهی داشته است. از سوی دیگر براساس معاهده ۱۳۵۱ ایران و افغانستان میزان حق آبه سیستان معادل حجم جریان ۸۲۰ MCM در سال در نظر گرفته شده است.

حداکثر حجم ذخیره مخازن چاه‌نیمه برابر ۱۴۵۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که از این میزان ۴۲۱ میلیون مترمکعب به عنوان یک ذخیره استراتژیک در

مخازن ۳-۱ چاه‌نیمه برای تامین آب شرب منطقه سیستان و شهرستان زاهدان برای استفاده در دوره‌های کم آبی رودخانه هیرمند نگهداری می‌شود (۳۰). در این راستا در این پژوهش براساس نیاز سالانه چاه‌نیمه‌ها، برای داده‌های شبیه‌سازی جریان، از هیدروگراف اصلاح شده سال ۸۶-۱۳۸۵ رودخانه سیستان مطابق شکل ۶ به میزان یک میلیارد مترمکعب استفاده شد.



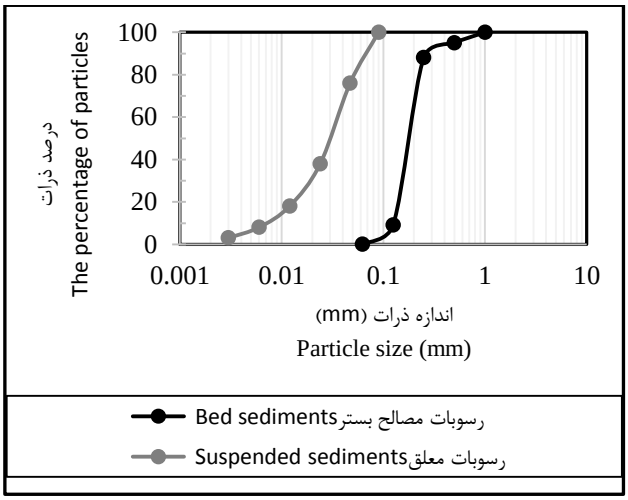
شکل ۶- هیدروگراف اصلاح شده سال آبی ۸۶-۱۳۸۵.

Figure 6. Modified hydrograph of water year 85-86.

داده‌های رسوب: برای وارد نمودن داده‌های رسوب معلق به مدل از منحنی سنجه رسوب یک‌خطی استفاده گردید. در این روش داده‌های دبی رسوب با دبی جریان متناظر آن‌ها به یک نمودار تمام لگاریتمی منتقل شده و بهترین خط برازش با استفاده از روش حداقل مربعات از میان نقاط عبور داده می‌شود؛ بنابراین در این روش بدون توجه به نحوه پراکنش نقاط فقط یک خط از بین نقاط عبور داده می‌شود.

$$Qs = aQ^{b}_{w} \quad (۶)$$

در این رابطه، a فاصله از مبدأ و b شیب‌خط می‌باشد. ضریب a دارای محدوده خاصی نیست، در مقابل ضریب b محدوده نسبتاً کوچکی دارد (۳۱). دانه‌بندی رسوبات معلق و رسوبات بستر در اولین مقطع بالادست و مقطع انتهای پایین‌دست برداشت و به مدل معرفی گردید و با توجه به تغییرات کم دانه‌بندی در مسیر برای مقاطع میانی میانیابی صورت گرفت. اندازه متوسط رسوبات بستر در محدوده مورد مطالعه رودخانه سیستان ۰/۱۷ میلی‌متر و اندازه متوسط رسوبات معلق ۰/۰۳ میلی‌متر می باشد. دانه‌بندی مربوط به رسوبات بستر برای مقطع بالادست و رسوبات معلق معرفی شده به نرم‌افزار HEC RAS در شکل ۷ ارائه شده است. با هدف آبگیری حداکثر در سازه‌های آبگیر فیدر یک و دو و به منظور جلوگیری از تأثیر دریچه‌های سازه آبگیر کانال فیدر یک و فیدر دو در عملکرد رسوبی دو کانال فیدر یک و فیدر دو و ایجاد شرایط مقایسه یکسان، دریچه‌های هر دو سازه در ارتفاع حداکثر ۴ متر باز در نظر گرفته شد.



شکل ۷- نمودار دانه‌بندی رسوبات مصالح بستر برای اولین مقطع بالادست، مقطع انتهای پایین‌دست و رسوبات معلق.

Figure 7. Gradation curve of bed sediments for the upstream section and suspended sediments.

به منظور ارزیابی و مقایسه دقت و صحت ارتفاع سطح آب محاسباتی و روابط انتقال رسوب جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)[1] و و ضریب تبیین[2] (R^2) استفاده گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2} \quad (۷)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2} \quad (۸)$$

که در این روابط، n تعداد داده‌ها، i اندیس تعداد داده‌ها، O_i مقادیر مشاهداتی و P_i مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. حداقل مقدار برای RMSE و حداقل و حداکثر مقدار برای R^2 به ترتیب برابر صفر و یک می‌باشد.

به منظور مقایسه نتایج رسوب‌گذاری در رودخانه سیستان و کانال‌های آبگیر فیدر یک و دو در دو سناریوی پژوهش، میزان حجم رسوب‌گذاری در واحد طول رودخانه با تقسیم حجم رسوب‌گذاری بر طول بازه مقاطع محاسبه گردید هم‌چنین درصد تله‌اندازی رسوبات ته‌نشین شده، از حاصل تقسیم حجم رسوبات ورودی به حجم رسوب‌گذاری مقطع، ضرب در عدد ۱۰۰ محاسبه شد.

نتایج و بحث

صحت‌سنجی رسوبی مدل HEC RAS: در این پژوهش برای واسنجی جریان در مدل HEC RAS، ضریب زبری بستر رودخانه که با عدم قطعیت مواجه است به صورت دستی تغییر داده شد تا زمانی که اشل برآورد شده مربوط به تعداد محدودی از دبی‌های اندازه‌گیری شده با اشل اندازه‌گیری شده در مقطع عرضی ایستگاه هیدرومتری جریکه برابر شود بعد از انجام مراحل واسنجی ضریب زبری مانینگ این بازه از رودخانه برای بستر سیلابی ۰/۰۴ و برای مجرای اصلی رودخانه ۰/۰۲ به دست آمد.

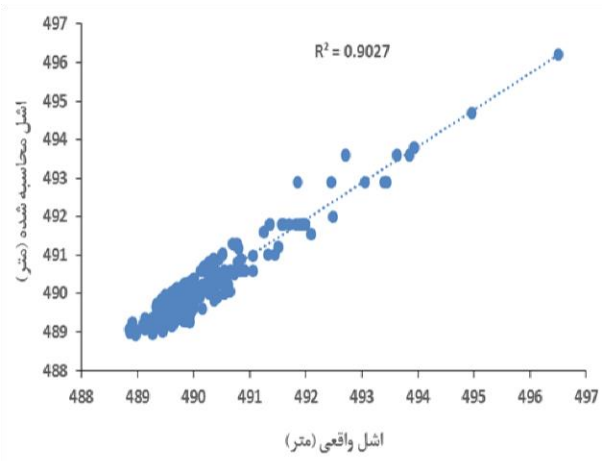
1- Root Mean Square Error (RMSE)
2- Determination coefficient

برای صحت‌سنجی جریان در مدل از داده‌های دبی–اشل ایستگاه هیدرمتری جریکه در بازه زمانی ۱۳۸۶–۱۳۸۵ استفاده گردید. مقایسه اشل اندازه‌گیری و محاسبه شده با معیار ریشه میانگین مربعات (RMSE)، خطای معادل ۰/۳۶ متر را نشان می‌دهد که کم‌تر از ۱۰ درصد ماکزیمم تغییرات سطح آب در ایستگاه هیدرومتری جریکه است. مقدار ضریب تبیین برای داده‌های اشل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برابر ۰/۹ به دست آمد. منحنی برازش مربوط به اشل واقعی و برآورد شده در شکل ۸ ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه روابط انتقال رسوب.

Table 1. Comparison of sediment transport relations.

ردیف Row	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE (ton/day)	روابط انتقال رسوب Sediment transport relationships	ضریب تعیین R^2
1	107318	مایر–پیتر مولر MPM	0.56
2	107616	آکر وایت Acker-whit	0.58
3	103481	یانگ Yang	0.41
4	107644	ویلکوک Wilcok	0.55
5	54000	انگلوند هانسن Engelund-Hansen	0.82
6	87379	لورسن Laursen	0.41
7	52162*	توفلاتی Toffaleti	0.89*



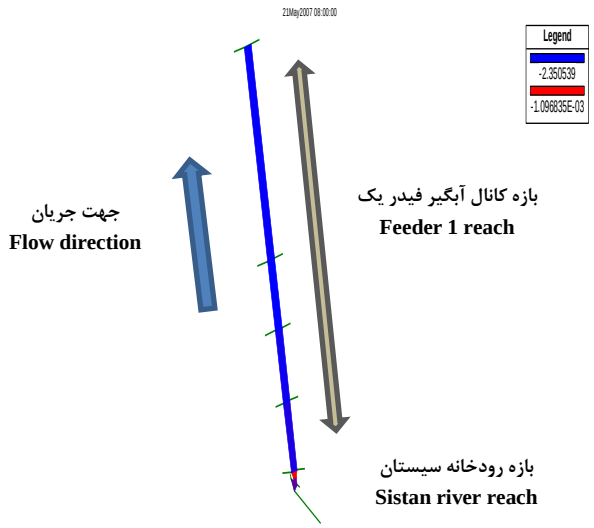
شکل ۸- مقایسه سطح آب در شرایط اندازه‌گیری و محاسبه شده در مرحله صحت‌سنجی.

Figure 8. Comparison of water level in real and calculated conditions in the verification stage.

برای صحت‌سنجی روابط بخش رسوب مدل HEC RAS از داده‌های اندازه‌گیری شده رسوب در ایستگاه هیدرومتری جریکه در سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ بهره گرفته شد. نتایج مقایسه مقدار رسوب اندازه‌گیری شده و محاسبه شده براساس دو معیار مجذور میانگین مربعات خطا وضریب تبیین مربوط به هریک از روابط انتقال رسوب در جدول ۱ آمده است. براساس نتایج جدول ۱، معادله انتقال رسوب توفالتی با RMSE برابر با ۵۲۱۶۲ تن و R^2 برابر ۰/۸۹ به عنوان بهترین رابطه رسوبی انتخاب گردید که این نتیجه با نتایج پژوهش مرادی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴)، Sleibi Mustafa و همکاران (۲۰۱۷)، Moradinejad و همکاران (۲۰۲۲)، محمدی و همکاران (۲۰۲۱) تطابق دارد (۱۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴).

نتایج شبیه‌سازی کانال آبگیر فیدر یک

تغییرات تراز بستر: براساس نتایج شبیه‌سازی مدل HEC RAS در این سناریو، کانال فیدر یک قادر است هیدروگراف جریان با دبی حداکثر سیلاب شبیه‌سازی برابر ۳۵۲ مترمکعب بر ثانیه بوده را بدون هیچ‌گونه مشکلی از کلیه مقاطع عرضی عبور دهد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، پلان محدوده فرسایش در پایان سیلاب در شکل ۹ ارائه گردیده است و با توجه به شکل در کل طول مسیر رودخانه سیستان و کانال فیدر یک فرسایش رخ می‌دهد.



شکل ۹- پلان بازه‌های فرسایش کانال فیدر یک و رودخانه سیستان.

Figure 9. The plan of erosion reaches of Feeder one canal and Sistan river.

نتایج شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر مقاطع رودخانه سیستان و کانال فیدر یک، در پایان سیلاب در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر جدول نشان می‌دهد که تمامی مقاطع رودخانه سیستان و کانال آبگیر فیدر یک در حالت فرسایشی است و میانگین وزنی فرسایش مقاطع رودخانه سیستان برابر ۱/۵ متر کانال فیدر یک برابر ۲ متر است. کم‌ترین میزان فرسایش در مجاورت سازه آبگیر کانال فیدر یک در مقطع ۳ رودخانه سیستان و مقطع ۱ کانال آبگیر فیدر یک می‌باشد و بیش‌ترین مقدار فرسایش

در مقطع چهارم کانال آبگیر فیدر یک با مقادیر ۲/۴۳ متر می‌باشد.

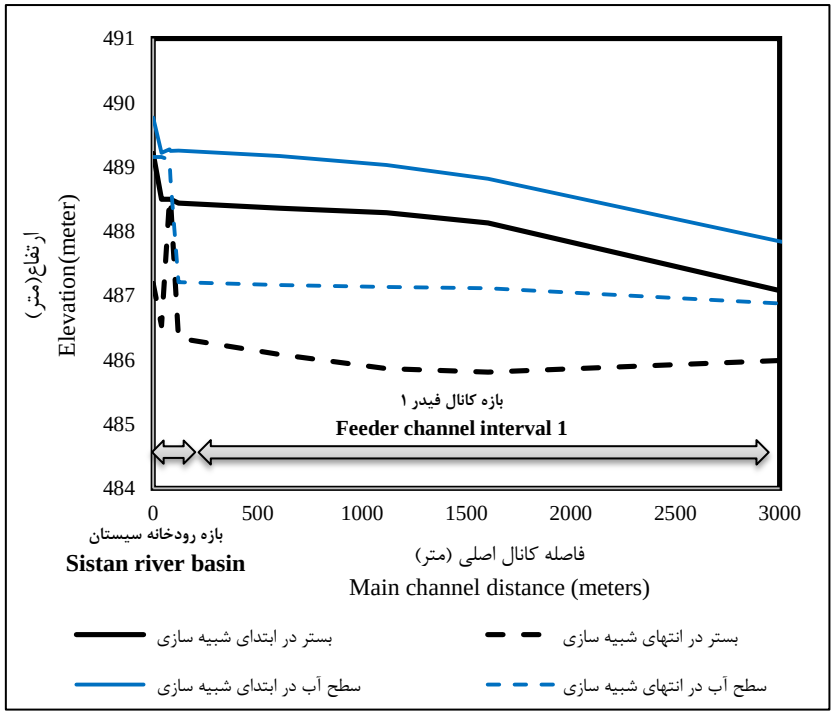
نتایج شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر مقاطع رودخانه سیستان و کانال فیدر یک، در پایان سیلاب در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر جدول نشان می‌دهد که تمامی مقاطع رودخانه سیستان و کانال آبگیر فیدر یک در حالت فرسایشی است و میانگین وزنی فرسایش مقاطع رودخانه سیستان برابر ۱/۵ متر کانال فیدر یک برابر ۲ متر می‌باشد. کم‌ترین میزان فرسایش در مجاورت سازه آبگیر کانال فیدر یک در مقطع ۳ رودخانه سیستان و مقطع ۱ کانال آبگیر فیدر یک می‌باشد و بیش‌ترین مقدار فرسایش در مقطع چهارم کانال آبگیر فیدر یک با مقادیر ۲/۴۳ متر است.

جدول ۲- تغییرات تراز بستر مقاطع فیدر یک در پایان سیلاب.

Table 2. Changes in the bed level of feeder one at the end of the flood.

ردیف Row	نام مقطع Section name	طول بازه مقطع (m) The length of the cross section	تراز اولیه بستر (m) The initial level of the substrate	تغییرات تراز بستر (m) Bed level changes
1	رودخانه سیستان 1 Sistan River	20	489.2	-2.02
2	رودخانه سیستان 2 Sistan River	39	488.5	-1.97
3	رودخانه سیستان 3 Sistan River	21	488.5	0.00
4	فیدر 1-1 Feeder 1	21	488.5	0.00
5	فیدر 1-2 Feeder 1	262	488.4	-2.10
6	فیدر 1-3 Feeder 1	498	488.4	-2.28
7	فیدر 1-4 Feeder 1	498	488.3	-2.43
8	فیدر 1-5 Feeder 1	993	488.1	-2.32
9	فیدر 1-6 Feeder 1	750	487.0	-1.00
	میانگین وزنی فرسایش مقاطع رودخانه سیستان Weighted average erosion of Sistan river sections			-1.5
	میانگین وزنی فرسایش مقاطع کانال آبگیر فیدر یک The weighted average erosion of feeder 1 catchment channel sections			-2.0

در شکل ۱۰ تغییرات تراز کف و سطح آب رودخانه سیستان و کانال فیدر یک در ابتدا و انتهای بازه زمانی شبیه‌سازی ارائه شده است و با توجه به شکل با کاهش تراز بستر کانال آبگیر فیدر یک در پایان سیلاب به دلیل فرسایش، سطح آب نیز در پایان سیلاب کاهش پیدا نموده است. با توجه به شکل ۱۰ در مقطع بالادست رودخانه سیستان تراز سطح آب در دبی یکسان ۲۰ مترمکعب بر ثانیه در پایان سیلاب در مقایسه با آغاز سیلاب به میزان ۰/۶ متر کم‌تر گردیده است که این نتیجه با در نظر گرفتن دو شاخه شدن رودخانه هیرمند در مقطع بالادست رودخانه سیستان، افزایش آبگیری رودخانه سیستان و کاهش آبگیری رودخانه پریان مشترک را به دنبال دارد.



شکل ۱۰- تغییرات تراز بستر و سطح آب رودخانه سیستان و کانال فیدر یک.

Figure 10. Changes in the bed and water level of the Sistan River and Feeder One Canal.

حجم رسوب‌گذاری انجام‌شده: تغییرات حجم رسوب تجمعی ورودی به مقاطع، حجم تغییرات بستر، حجم رسوب‌گذاری در واحد طول و راندمان تله‌اندازی رسوبات مقاطع مربوط به رودخانه سیستان و کانال فیدر یک در پایان سیلاب در جدول ۳ ارائه گردید. براساس نتایج شبیه‌سازی میزان فرسایش مقاطع رودخانه سیستان برابر ۱۴۹ مترمکعب و کانال فیدر یک برابر ۱۳۰۹۷ مترمکعب می‌باشد و میانگین حجم فرسایش در واحد طول برای رودخانه سیستان برابر با ۲ مترمکعب در متر طول رودخانه و برای کانال فیدر یک برابر با ۴ مترمکعب در متر طول رودخانه می‌باشد. میزان راندمان تله‌اندازی رسوبات با توجه به فرسایشی بودن کل مقاطع برابر صفر است.

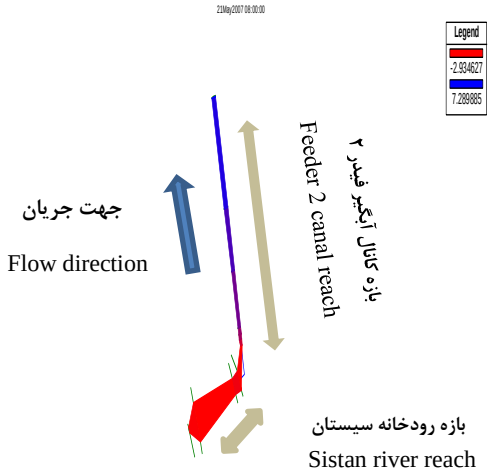
جدول ۳- حجم رسوب‌گذاری فیدر یک در پایان سیلاب.

Table 3. Sedimentation volume of feeder one at the end of flood.

ردیف Row	شماره مقطع section number	حجم رسوب تجمعی وارد شده به مقطع (m^3) Cumulative sediment volume entered into the section (m^3)	حجم تجمعی تغییرات بستر (m^3) Cumulative volume of bed changes (m^3)	حجم تغییرات بستر در واحد طول The volume of bed changes per unit length	راندمان تله‌اندازی رسوبات Sediment trapping efficiency
1	رودخانه سیستان 1 Sistan River	100238	-66	-3.3	0
2	رودخانه سیستان 2 Sistan River	100304	-83	-2.1	0
3	رودخانه سیستان 3 Sistan River	100386	0	0.0	0
4	فیدر 1-1 Feeder 1	100387	0	0.0	0
5	فیدر 1-2 Feeder 1	100387	-1542	-5.9	0
6	فیدر 1-3 Feeder 1	101929	-2858	-5.7	0
7	فیدر 1-4 Feeder 1	104787	-2623	-5.3	0
8	فیدر 1-5 Feeder 1	107409	-5036	-5.1	0
9	فیدر 1-6 Feeder 1	112446	-1038	-1.4	0
	مقاطع رودخانه سیستان Sections of the Sistan River		-149	-2	
	مقاطع کانال آبگیر فیدر 1 Sections of feeder water catchment channel 1		-13097	-4	

نتایج شبیه‌سازی کانال آبگیری فیدر دو

تغییرات تراز بستر: براساس نتایج شبیه‌سازی مدل HEC RAS در این سناریو، کانال فیدر دو قادر است هیدروگراف جریان با دبی حداکثر برابر ۳۵۲ مترمکعب بر ثانیه بوده را بدون هیچ‌گونه مشکلی از کلیه مقاطع عرضی خود عبور دهد. پلان محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه سیستان و کانال فیدر دو در پایان سیلاب در شکل ۱۱ ارائه گردیده که با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در طول مسیر رودخانه سیستان فرسایش و در کانال فیدر دو رسوب‌گذاری رخ می‌دهد.

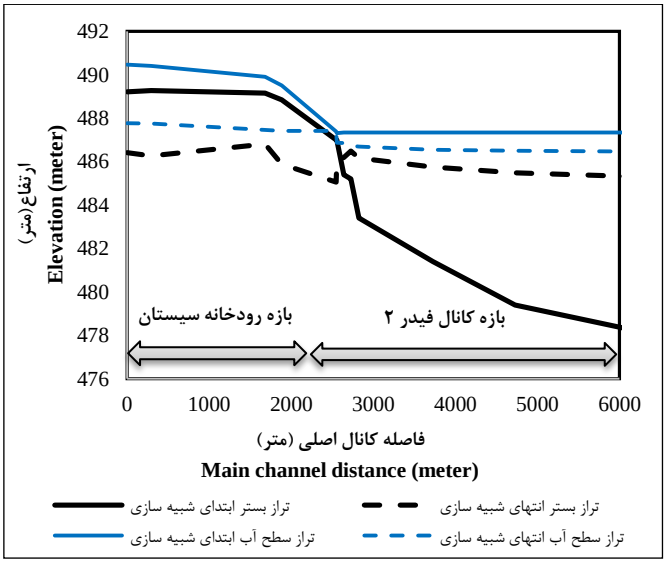


شکل ۱۱- پلان محدوده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری کانال فیدر دو و رودخانه سیستان.

Figure 11. Plan of erosion and sedimentation reaches of Feeder two canal and Sistan river.

نتایج شبیه‌سازی تغییرات تراز بستر مقاطع رودخانه سیستان و کانال فیدر دو، در پایان سیلاب در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر جدول ۴ نشان می‌دهد که میانگین وزنی فرسایش برای رودخانه سیستان برابر ۲/۶۴ متر و میانگین وزنی رسوب‌گذاری برای کانال فیدر دو برابر ۵/۱۹ متر می‌باشد. مقطع ۲ رودخانه سیستان با مقدار ۳ متر بیش‌ترین میزان فرسایش و مقطع دوازدهم از کانال فیدر دو با مقدار ۷/۳ متر دارای بیش‌ترین مقدار رسوب‌گذاری است.

در شکل ۱۲ تغییرات تراز کف و سطح آب رودخانه سیستان و کانال فیدر دو در ابتدا و انتهای بازه زمانی شبیه‌سازی ارائه شده است و با توجه به شکل به دلیل تراز بسیار کم بستر کانال آبگیر فیدر دو علی‌رغم رسوب‌گذاری و افزایش تراز بستر کانال آبگیر فیدر کاهش تراز سطح آب در پایان سیلاب در آن مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۲- تغییرات تراز بستر رودخانه سیستان و کانال فیدر دو.

Figure 12. Changes in the bed level of Sistan River and Feeder 2 canal.

جدول ۴- تغییرات تراز بستر مقاطع فیدر دو در پایان سیلاب.

Table 4. Changes in the bed level of feeder two sections at the end of the flood.

ردیف Row	نام مقطع Section name	طول بازه مقطع (m) Length of cross section (m)	تراز اولیه بستر (m) Initial bed level (m)	تغییرات تراز بستر (m) Bed level changes (m)
1	رودخانه سیستان 1 Sistan River	147	489.2	-2.79
2	رودخانه سیستان 2 Sistan River	841	489.3	-3.00
3	رودخانه سیستان 3 Sistan River	795	489.2	-2.34
4	رودخانه سیستان 4 Sistan River	431	488.8	-2.96
5	رودخانه سیستان 5 Sistan River	336	487.0	-1.94
6	فیدر 2-1 Feeder 2	47	487.0	-0.93
7	فیدر 2-2 Feeder 2	85	485.4	0.79
8	فیدر 2-3 Feeder 2	92	485.2	1.29
9	فیدر 2-4 Feeder 2	500	483.4	2.77
10	فیدر 2-5 Feeder 2	950	481.4	4.35
11	فیدر 2-6 Feeder 2	1375	479.4	6.08
12	فیدر 2-7 Feeder 2	877	478.0	7.28
13	فیدر 2-8 Feeder 2	5	487.0	-0.89
میانگین وزنی فرسایش مقاطع رودخانه سیستان Weighted average erosion of Sistan river sections				-2.64
میانگین وزنی رسوب‌گذاری مقاطع کانال آبگیر فیدر دو Weighted average sedimentation of feeder two catchment channel sections				5.19

با توجه به شکل ۱۲ به دلیل فرسایش و کاهش تراز بستر رودخانه سیستان در بالادست، سطح آب در دبی یکسان ۲۰ مترمکعب بر ثانیه در پایان سیلاب به میزان ۲/۶ متر کم‌تر از تراز سطح آب در ابتدای سیلاب گردیده است و کانال آبگیر فیدر دو در مقایسه با کانال آبگیر فیدر یک سبب کاهش بیش‌تر بستر در مقطع بالادست رودخانه سیستان به دلیل رقوم پایین‌تر آبگیری سازه آبگیر فیدر دو در مقایسه با سازه آبگیر فیدر یک می‌شود که این نتیجه با در نظر گرفتن دوشاخه شدن رودخانه هیرمند در مقطع بالادست رودخانه سیستان، سبب افزایش بیش‌تری در آبگیری رودخانه سیستان و کاهش آبگیری رودخانه پریان مشترک می‌شود.

حجم رسوب‌گذاری انجام‌شده: در جدول ۵ نتایج حجم رسوب تجمعی ورودی به مقاطع، تغییرات حجم رسوب‌گذاری، حجم رسوب‌گذاری در واحد طول و راندمان تله‌اندازی رسوبات رودخانه سیستان و کانال فیدر دو در پایان سیلاب ارائه گردیده است. براساس نتایج جدول ۵ میزان فرسایش مقاطع رودخانه سیستان برابر ۱۸۶۷۲ مترمکعب و میزان رسوب‌گذاری مقاطع کانال فیدر دو برابر ۶۲۱۴۶ مترمکعب است. فرسایش ایجادشده در مقاطع رودخانه سیستان سبب افزایش غلظت رسوبات حمل شده به پایین‌دست و تسریع در رسوب‌گذاری مقاطع کانال آبگیر فیدر ۲ می‌شود درحالی‌که براساس نتایج پژوهش کلانتری و حسن‌پور (۱۴۰۲) کانال فیدر ۲ برای شرایط آبگیری در وضعیت رقوم حداکثر سطح آب مخازن چاه نیمه در کل مقاطع رودخانه سیستان، رسوب‌گذاری رخ می‌دهد و میزان حجم رسوب‌گذاری مقاطع رودخانه سیستان برابر با ۱۵ هزار مترمکعب می‌باشد(۳۵).

براساس نتایج جدول ۵، حجم فرسایش در واحد طول برای رودخانه سیستان برابر با ۷ مترمکعب در متر طول رودخانه و حجم رسوب‌گذاری برای کانال فیدر دو برابر با ۸ مترمکعب در متر طول رودخانه می‌باشد. راندمان تله‌اندازی رسوبات برای رودخانه سیستان برابر صفر می‌باشد و کانال آبگیر فیدر دو به دلیل تراز بستر پایین سبب تله‌اندازی حجم قابل‌توجهی از رسوبات جریان می‌گردد بطوری‌که مقاطع ۷ و ۸ کانال آبگیر فیدر دو بالغ بر ۵۰٪ رسوبات جریان را تله‌اندازی می‌نمایند که بخشی از این رسوبات جریان مربوط به رسوبات بستر رودخانه سیستان در بالادست کانال آبگیر فیدر دو می‌باشد و این موضوع سبب افزایش هزینه‌های نگهداری و لایروبی کانال آبگیر فیدر دو می‌گردد.

جدول ۵- حجم رسوب‌گذاری فیدر دو در پایان سیلاب.

Table 5. Sedimentation volume of feeder two at the end of flood.

ردیف Row	شماره مقطع section number	حجم رسوب تجمعی وارد شده به مقطع (m^3) Cumulative sediment volume entered into the section (m^3)	حجم تجمعی تغییرات بستر (m^3) Cumulative volume of bed changes (m^3)	حجم تغییرات بستر در واحد طول The volume of bed changes per unit length	راندمان تله‌اندازی رسوبات Sediment trapping efficiency
1	رودخانه سیستان 1 Sistan River	100238	-941	-6.4	0
2	رودخانه سیستان 2 Sistan River	101179	-6569	-7.8	0
3	رودخانه سیستان 3 Sistan River	107747	-7278	-9.2	0
4	رودخانه سیستان 4 Sistan River	115025	-2126	-4.9	0
5	رودخانه سیستان 5 Sistan River	117151	-1759	-5.2	0
6	فیدر 2–1 Feeder 2	118910	-129	-2.7	0
7	فیدر 2–2 Feeder 2	119039	192	2.3	0.16
8	فیدر 2–3 Feeder 2	118847	351	3.8	0.29
9	فیدر 2–4 Feeder 2	118496	4304	8.6	3.63
10	فیدر 2–5 Feeder 2	114193	12856	13.5	11.26
11	فیدر 2–6 Feeder 2	101337	25436	18.5	25.10
12	فیدر 2–7 Feeder 2	75901	19147	21.8	25.23
13	فیدر 2–8 Feeder 2	56754	-10	-2.0	0
	مقاطع رودخانه سیستان Sections of the Sistan River		-18672	-7	
	مقاطع کانال آبگیر فیدر 2 Sections of feeder water catchment channel 2		62146	8	

نتیجه‌گیری کلی

نتایج شبیه‌سازی کانال‌های آبگیر فیدر یک و دو با استفاده از مدل HEC RAS با هیدروگراف سالانه به میزان یک میلیارد مترمکعب برای تأمین آب موردنیاز چاه‌نیمه‌ها به شرح زیر است:

- براساس نتایج صحت‌سنجی و واسنجی مدل HEC-RAS، یک مدل توانمند برای شبیه‌سازی رسوب است و رابطه توفالتی، بهترین رابطه انتقال رسوب برای رودخانه سیستان است.
- در هر دو سناریوی آبگیری کانال آبگیر فیدر یک و کانال آبگیر فیدر دو در شرایط رقوم حداقل سطح آب مخازن چاه‌نیمه سیستان، مقاطع عرضی رودخانه سیستان مورد فرسایش قرار خواهند گرفت.
- در سناریوی آبگیری کانال آبگیر فیدر یک میزان فرسایش مقاطع فیدر یک برابر با ۱۳۱۰۰ مترمکعب حاصل گردید که باعث کاهش تراز بستر کانال فیدر یک به مقدار۲ متر می‌گردد.
- در سناریوی آبگیری کانال آبگیر فیدر دو میزان رسوب‌گذاری مقاطع برابر با ۶۲۱۵۰ مترمکعب حاصل گردید که باعث افزایش تراز بستر کانال فیدر دو به مقدار ۵/۲ متر می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد رشته مهندسی آب-گرایش سازه‌های آبی مصوب و دفاع شده در گروه مهندسی آب دانشکده آب‌وخاک دانشگاه ملی زابل استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر خود را از مسئولان دانشکده آب‌وخاک دانشگاه زابل و هیئت‌داوران این مقاله که با مطالعه و نقد پژوهش انجام شده، در ارتقای کیفی این پژوهش و بهبود متن حاضر یاری نمودند، اعلام نمایند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش مربوط به پایان‌نامه فوق‌لیسانس نویسنده اول می‌باشد که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل‌دسترسی می‌باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:

نویسنده اول و دوم: آماده‌سازی داده‌ها، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، تهیه پیش‌نویس مقاله، طرح تحقیق و روش‌شناسی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله، بازبینی مقاله، بازدیدهای میدانی

نویسنده سوم: دسترسی به داده‌ها و داده‌برداری، آماده‌سازی داده‌ها، بازدیدهای میدانی

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد در دانشگاه زابل به انجام رسیده و از حمایت مالی دانشگاه زابل تحت عنوان کمک هزینه انجام پایان‌نامه برخوردار بوده است.

منابع

1.Jalili, H., Hosseinzadeh Dalir, A., & Farsadizadeh, D. (2011). The effect of the geometry of the catchment opening on the amount and pattern of sedimentation in the lateral catchment. *Iranian Water Research Journal*. 5 (9), 1-10. [In Persian]

2.Rahiminezhad, Z., & Tayari, O. (2015). Modification and Training of Khabr's River of Baft, using HEC-RAS model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 5 (19), 17-29. [In Persian]

3.Montaseri, H., Ghodsian, M., & Dehghani, A. (2009). Experimental Study on turbulent flow field around submerged vanes at a lateral diversion in a U shape rectangular channel bend. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 16 (2), 221-233. [In Persian]

4.Seyedian, S., & Shafaeibajestan, M. (2010). Comparison of Suspended Load Delivered Into the Intake by Changing the Canal Side Angle from Perpendicular to 45 Degrees. *Journal of Water and Soil*. 24 (5), 985-994. [In Persian]

5.Gibson, S., Brunner, G. W., Piper, S., & Jensen, M. (2006). Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC). Reno, NV, USA. 57-64.

6.Behrangi, F., Banihashemi, M. A., Pourbojarian, A., & Amini, M. (2006). Comparing results of HEC-RAS model with observed values in sedimentation of Latian dam's reservoir. 8th International River Engineering Conference. 26-28. [In Persian]

7.Akbari, Gh. M., Faghfourmaghrebi, M., & Tarem, S. (2011). Examining the combination of sediment transport equations and methods for calculating particle fall speed in the modeling of surface bed form changes. The 6th National Congress of Civil Engineering. [In Persian]

8.Pirou, M., Ghamshi, M., Nohani, A., & Ravansalar, M. (2012). Investigating the state of river bed sediment with HEC-RAS.4 numerical model, a case study of Bashar Yasouj River. National Congress of Inter-basin water transfer (Challenges and Opportunities). [In Persian]

9.Motlabian, M., & Hassanpour, F. (2013). A study of the locus of the erosion and sedimentation in Sistan River using HEC-RAS model. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 4 (10), 1377-1386.

10.Jabari, A., Hosseini, S. A., Haghiabi, A. H., Emam Gholizadeh, S., & Behnia, A. K. (2014). Prediction of the sediment load in the river by HEC-RAS. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 4 (16), 12-23. [In Persian]

11.Moradinejad, A., Haghiabi, A., & Torabi, H. (2014). Selecting the most appropriate sediment transport equations by numerical model HEC-RAS.4.1 (Case Study: Markazi Province Qara-chai River). *Watershed Management Research Journal*. 27 (104), 123-131. [In Persian]

12.Noroozi, G., Tahmasebipour, N., Zeinivand, H., & RahimiNasab, M. (2014). A Simulation of Sediment Transport of Floods and its Temporal Variation Using HEC RAS: A Case Study of Poldokhtar Station of Kashkan River, Lorestan Province. *International Bulletin of Water Resources and Development*. 2 (2), 66. [In Persian]

13.Berghout, A., & Meddi, M. (2016). Sediment transport modelling in wadi Chemora during flood flow events. *Journal of Water and Land Development*. 31, 23-31.

14.Hameed, L. K. (2016). Estimating of Sediment Estimating of Sediment Transport Rates for Euphrates River in Al- Hindiya City Using HEC-RAS Model. *The Arab Journal of Sciences & Research Publishing*. 2 (3), 77-90.

15.Ochiere, H. O. (2016). Modelling of sedimentation dynamics in an underground canal in southwest kano irrigation scheme-kenya. A thesis of the Master of Science Degree in Agricultural Engineering of Egerton University.

16.Ghimire, G. R. (2016). Developing sediment transport and deposition prediction model of lower ohio river near the Olmsted locks and dam area. Thesis for: MS in Civil Engineering Advisor: Dr. Bruce A. DeVantier. Southern Illinois University Carbondale.

17. Das, B., & Sil, B. S. (2017). Assessment of Sedimentation in Barak River reach using HEC RAS. Development of water resources in india. *Water Science and Technology Library*. 75, 95-102.
18. Haque, M. H., Shaun, S., Kibria, K. M., Mohib, K. M., Sultana, A., & Mamoon, W. B. (2019). Sediment Modeling of Kobadak River by HEC RAS. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 10 (4), 516-521.
19. Moradinejad, A., & Hosseini, A. (2022). Accuracy Estimation of Sediment Discharge Transfer Relationships of Khondab River, Joshirvan Station using HEC-RAS Model. *Journal of Environment and Water Engineering (EWE)*. 8 (1), 161-176. [In Persian]
20. Thiyagarajan, S. V. (2022). Sediment Transport Modelling in Stream Flow by HEC-RAS Model-A State-of-the-Art. In book: Recent Advances in Civil Engineering. 481-491.
21. Lakzaeianpour, Gh., Delbari, M., & Rostami, M. (2016). Environmental study of Chahnime water resources. International Conference on Innovation in Science & Technology. [In Persian]
22. Nourzaei, A. (2018). Specialized blog on agricultural issues, rural, economic and social development, new and transformative ideas. [In Persian]
23. Ahmari, J., Tajrishi, M., & Torabi, A. (2001). The study of sedimentation process in Sistan river. 3rd Iranian Hydraulic Conference. University of Tehran. 183-193. [In Persian]
24. Amiri, M., Keykha, M., & Hassanpour, F. (2015). Evaluating the performance of Sistan and Zahak diversion dams in Sistan River using HEC-RAS hydraulic model. *Scientific and Research Electronic Journals*. 20 (4), 51-67. [In Persian]
25. Mohandesin Moshaver Absaran. (2016). Studies of the second stage of water supply in the Sistan plain (Sistan river system). Ministry of Energy, Sistan and Baluchistan Regional Water Company. 97-126. [In Persian]
26. HEC RAS (Hydrologic Engineering Centre - River Analysis System) In an Underground Canal in Southwest Kano Irrigation Scheme. (2016). *International Journal of Engineering Science Invention, Kenya*. 4 (9), 15-31.
27. US Army corps of Engineer. (2008). Engineering Design Manual – Channel stability assessment for flood control project.
28. Toffaletti, F. B. (1968). A Procedure for Computation of the Total River Sand Discharge and detailed Distribution, Bed to Surface. Committee on Channel Stabilition, U.S. Army corps od Engineers Watweways Experiment Station Technical Report NO. 5.
29. Shafai Bajestan, M. (2008). Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport. Second Edition, Shahid Chamran University Press, 549 p. [In Persian]
30. Mohandesin Moshaver Samaneh Farayandehaye Mohiti. (2008). Evaporation studies in Chahnime 4. Ministry of Energy, Sistan and Baluchistan Regional Water Company. [In Persian]
31. Rahimi, N., Hassanpour, F., & Sharifazari, S. (2018). Determination of the Most Appropriate Statistical Method for the Suspended Load Estimation in the Sistan River. *Watershed Management Research Journal*. 30 (4), 72-82. [In Persian]
32. Sleibi Mustafa, A., Oleiwi Sulaiman, S., & Al-Alwani, Kh. 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 (3), 570-577.
33. Moradinejad, A., & Hosseini, S. A. (2022). Accuracy Estimation of Sediment Discharge Transfer Relationships of Khondab River, Joshirvan Station using HEC-RAS Model. *Environment and Water Engineering (EWE)*. 8 (1), 161-176. [In Persian]
34. Mohammadi, S., Hasanpour, F., Sharifazari, S., & Foroughi, F. (2021). Assessment of Modern Regression Methods to Suspended Sediment Load Estimation in the Sistan River. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 12 (2), 1-15. [In Persian]
35. Kalantari, M., & Hassanpour, F. (2023). Investigating the Effect of Water Level of Chahnimeh Reservoirs on Sedimentation of Feeder 2 Canal. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 14 (1), 100-117. [In Persian]