

Assessment of soil erosion and sedimentation in rivers using the CCHE2D numerical model

Mostafa Mollaeinia^{1*}, Hamzeh Ebrahimnezhadian², Shahram Toofani³

¹Ph.D Student, Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

²Ph.D. Graduated, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

³Master Graduated, Civil Engineering Department, Faculty of Technology and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

Corresponding Author's E-mail: m-mollaeinia@shirazu.ac.ir

Received: 04 Dec. 2022
Accepted: 05 Jan. 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Erosion occurs naturally in riverbeds. The high cost and limitations of physical models have led to using mathematical and numerical models. In this research, the two-dimensional mathematical model CCHE2D was applied for the simulation of sediment transport in Saqqez River flows throughout the Kurdistan province to determine the rate of erosion and sedimentation. The Study area includes the main and sub-branches that intersect at the site of Tamogheh village. After analyzing the sensitivity of the model, the model proposed by Wu et al. with a Root Mean Square Error of 0.002 and Mean Absolute Error Percentage of 7.14 was used as the most appropriate relationship for calculating sediments. Finally, it was found that on average, in the study period, sediment deposition was about 82485 cubic meters, erosion was about 18708 cubic meters, and average bed level changes were 0.20 meters. The Khan tributary accounted for 63% of the total erosion of the study period.

Keywords: CCHE2D Software, Sedimentation, Saqqez River, Sediment Simulation, Erosion.

Introduction: Sediment hydraulics is a science that discusses the movement, erosion, and deposition of sediment materials in channels and rivers. The sediment load is divided into two parts, the bed sediment load, and the suspended load, and the sum of these two forms the total sediment load.

Simulation or modeling techniques are used in order to predict complex hydraulic phenomena. Research results have shown that the CCHE2D model is a suitable tool in hydraulic engineering for studying turbulent flows, sediment transport, morphological changes, and free surface changes with time in sedimentary beds (Athow Jr & Trawle, 1976; Habibi et al., 2014; Khosravi, 2018; Maghrebi et al., 2010).

There are many applications for natural channels with complex flow conditions, topography, and hydraulic structures (Jia et al., 2002).

Wu (2001) simulated the flow and sediment transport of the downstream of the Yellow River in China. Based on this, it was concluded that all turbulence models provide accurate results about simple flows. But regarding complex flows, the two turbulence models, k- ϵ and RNG, show more realistic results than the Zero-equation models.

Methodology: The studied area includes an area of the Saqqez River, one of the important branches of Zarrineh Rud. The total length of this river is about 100 km, and its drainage basin is about 1350 km² (Fig. 1).

The CCHE2D model is a numerical model for the simulation of unsteady turbulent flow and sediment transport in open channels, which was developed at NCCHE of the Mississippi University of Technology, USA.

In the CCHE2D model, for the hydraulic analysis of the flow, the continuity equation (1) and the Momentum equations (2) and (3) are used in the two-dimensional space (Zhang, 2005).

In the sediment section, the CCHE2D model uses the general Advection Diffusion equation (Eq.(4)) to calculate the sediment load and the continuity equation of the bed load (Eq. (5)) to calculate the deformation of the bed (Zhang, 2005).

In the field visit of the studied area in separate selected sections, flow velocities, longitudinal profile of the water level, and sedimentary materials of the bed were collected to determine the gradation and the representative diameter of the particles, as well as DEM of the area for the preparation of the computational grid and simulation. (Fig. 4).

For the studied area of Saqqez River, part of the topographic information was collected by field surveying. The other part was obtained from a complete topographic map in the form of elevation curves in AutoCAD Land format.

In the current study, the study period is from 1998 to 2010.

Results and Discussion: In the model used in this research, there are 5 main parameters in order to calibrate the model. These parameters are the disturbance model, Coincidence Factor, Schmidt number, Roughness Coefficient, and Empirical Relationship.

The comparison of the results of bed sediment distribution showed that Wu's experimental relationship is more consistent with the observed values at Cheragh-Weiss station than the modified Englund-Hansen method. In order to check the model more accurately, two statistical methods, *R.M.S.E* and *M.A.P.E*, were used (Eqs. (6) and (7)); Therefore, Wu's empirical relationship with a Correlation coefficient of 0.9268, *R.M.S.E* of 0.002, and *M.A.P.E* of 7.13 was selected for simulation.

The optimal values of the Schmidt number equal to 0.75, the Coincidence Factor equal to 0.5, and the Roughness Coefficient value equal to 0.045 were obtained and used in the simulation. Correlation diagrams of the average distribution of bed sediments are shown in Figs. 7 and 8.

By separating the results, the amount of erosion and sediment deposition for the main and sub-branches were presented in Table 4.

As a result, the total amount of erosion per year and also the total amount of sediment deposition per year in the study area of Saqqez River, with a length of 22 km, is determined.

The output results showed that Saqqez River would have an average bed level change of 0.20 m in the entire study area. Figs. 9 and 10 show an example of the bed changes output in the studied area graphically.

Conclusion: In this research, the simulation of sediment in a section of the Saqqez River in Kurdistan province, which is limited to two data measuring stations, Chirag-Weis and Qabqablo, was carried out using the CCHE2D numerical model. The results showed that the annual amount of erosion is 18708 m³ on average and the deposition of sedimentary materials is 82485 m³, among which the Khan tributary river with an amount of 11748 m³ includes about 63% of the total erosion and also with an amount of 57186 m³, includes about 69% of the total deposition of sedimentary materials in the studied area. As a result, the Khan tributary river, which meets the main branch of the Saqqez River in Tamogheh village, is morphologically in the category of young rivers, and the tendency to erosion in this tributary is more than the more mature main branch.



ارزیابی فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه‌ها با استفاده از مدل عددی CCHE2D

مصطفی ملائی‌نیا^{۱*}، حمزه ابراهیم‌نژادیان^۲، شهرام طوفانی^۳

^۱دانشجوی دکترا عمران ژئوتکنیک، بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
^۲آفارغ التحصیل دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۳آفارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: m-mollaienya@shirazu.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵

چکیده: فرسایش به صورت طبیعی در بستر و کناره رودخانه‌ها رخ می‌دهد. هزینه زیاد و محدودیت‌های مدل‌های فیزیکی سبب شده است تا مدل‌های عددی و ریاضی مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، انتقال رسوب در محدوده رودخانه سقز واقع در استان کردستان، با استفاده از مدل ریاضی دو بعدی CCHE2D و با هدف تعیین میزان فرسایش و ته‌نشست مواد رسوبی شبیه‌سازی شده است. محدوده مورد مطالعه شامل دوشاخه اصلی و فرعی است که در محل روستای تموغه با هم تلاقی می‌کنند. پس از تحلیل حساسیت مدل، فرمول وو با جذر میانگین مربع خطای ۰/۰۰۲ و میانگین درصد خطای مطلق ۷/۱۴، به عنوان مناسب‌ترین رابطه برای محاسبه رسوبات مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مشخص گردید که به طور متوسط سالانه، در محدوده مورد مطالعه، ته‌نشست رسوب حدود ۸۲۴۸۵ مترمکعب، فرسایش حدود ۱۸۷۰۸ مترمکعب و تغییرات متوسط تراز بستر ۰/۲۰ متر است که شاخه فرعی رودخانه خان ۶۳ درصد کل فرسایش محدوده مطالعاتی را به خود اختصاص داد.

کلیدواژه‌گان: CCHE2D، ته‌نشست، رودخانه سقز، شبیه‌سازی، فرسایش.

۱- مقدمه

معمول دارای پیچیدگی‌ها و محاسبات فراوانی است که دقت و توجه زیادی را می‌طلبد. از این رو لازم است، قبل از اقدام به طراحی و اجرای طرح‌های هیدرولیکی نحوه عملکرد آن‌ها مورد مطالعه قرار گیرد. به منظور پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی از فنون شبیه‌سازی یا مدل‌سازی استفاده می‌شود. امروزه با پیشرفت فراوان رایانه و توسعه هر چه بیشتر روش‌های عددی، مدل‌های ریاضی، دامنه کاربرد فوق‌العاده وسیعی یافته‌اند.

هیدرولیک رسوب، دانشی است که چگونگی حرکت، فرسایش و رسوب‌گذاری مواد رسوبی در کانال‌ها و رودخانه‌ها را مورد بحث قرار می‌دهد. این علم بر پایه علوم مختلفی نظیر مکانیک سیالات، هیدرولیک و هیدرولیک رسوب استوار است. بار رسوب به دو قسمت بار رسوبی کف و بار معلق تقسیم می‌شود که مجموع این دو، میزان کل بار رسوبی را تشکیل می‌دهد. انجام مطالعات و تحقیقات مختلف مهندسی هیدرولیک و هیدرولیک رسوب به طور

می‌کنند؛ اما در خصوص جریان‌های پیچیده، دو مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ و RNG نتایج واقعی‌تری را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. بر اساس این تحقیق، در میان مدل‌های دو معادله‌ای، مدل $k - \varepsilon$ و مدل RNG در مورد جریان‌های چرخشی، نتایج بهتری ارائه می‌کنند.

نصار (Nassar, 2011)، تحلیل حساسیت چند پارامتری از مدل CCHE2D را برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه نیل در کشور مصر انجام داد. نتایج حاصل، حاکی از آن بود که میدان جریان در رودخانه نیل عمدتاً توسط زبری بستر کنترل می‌شود؛ علاوه بر این فرمول تجربی ونریج، برای محاسبه ضریب زبری بستر، کارآمدتر است.

مغربی و همکاران (Maghrebi et al., 2010)، طی تحقیقی، الگوی جریان آشفته حول جزیره رسوبی در رودخانه شریانی را با استفاده از مدل CCHE2D، شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی که برای رودخانه سرباز انجام شد، دو دبی مختلف مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوی جریان حول جزیره رسوبی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان بوده و جزیره رسوبی در دبی‌های مختلف اثرگذاری متفاوتی بر روی الگوی جریان در ناحیه مورد بررسی دارد.

خسروی (Khosravi, 2018) به بررسی الگوی جریان آشفته و انتقال رسوب در پیچان‌رودها در بازه‌ای از رودخانه در پائین‌دست سد میناب با بهره‌گیری از نرم‌افزار CCHE2D پرداخت. نتایج بیانگر دقت بالا و خطای ناچیز مدل در پیش‌بینی پارامترهای جریان و رسوب است و نیز شرایط فرسایشی رسوب‌گذاری منطقه نشان از فرسایش‌پذیری بالای منطقه مورد مطالعه در مقابل سیلاب‌های احتمالی دارد. همچنین نتایج نشان داد برای شبیه‌سازی حالات انتقال آشفتگی و پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای در ناحیه قوس مقعر، مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ عملکرد بهتری نسبت به مدل لزجت گردابه‌ای داشته است.

حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2014)، در بررسی عددی الگوی جریان و رسوب در محل تلاقی رودخانه‌ها و با استفاده از اطلاعات موجود آزمایشگاهی، مدل CCHE2D

بررسی نتایج شبیه‌سازی الگوی جریان ناپایدار در رودخانه نکار^۱ آلمان به‌منظور پیش‌بینی تغییرات سطح آب و نیز میدان سرعت، نشان داد که مدل CCHE2D ابزار مناسبی در مهندسی هیدرولیک جهت مطالعه جریان‌های متلاطم، انتقال رسوب، تغییرات ریخت‌شناسی و تغییرات سطح آزاد با زمان در بسترهای رسوبی است (Athow Jr & Trawle, 1976).

برنامه‌های بسیاری برای کانال‌های طبیعی با شرایط جریان پیچیده، توپوگرافی و سازه‌های هیدرولیکی وجود دارد (Jia et al., 2002). ژو توسعه یک مدل ترکیبی برای آب‌های کم‌عمق و بار بستر را با استفاده از روش حجم محدود ارائه داده است (Zhou, 1997). مدل دو بعدی است که برای شبیه‌سازی جریان سطح آزاد، انتقال رسوب، کیفیت آب و تغییرات مورفولوژیکی کانال، توسعه داده شده است. این مدل قادر به تولید مکانیسم فیزیکی واقع‌گرایانه می‌باشد.

در دهه‌های اخیر، فرآیندهای حاکم بر جریان آب و حمل رسوب به‌صورت دقیق‌تر مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. همچنین، با پیشرفت‌های به وجود آمده در حوزه رایانه و توسعه روش‌های محاسبات عددی، استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی، به‌صورت چشمگیری افزایش یافته است. امروزه مدل‌های CFD، ابزاری موثر برای مهندسی هیدرولیک، در بررسی کانال‌های روباز و فرآیندهای رودخانه‌ای محسوب می‌شود (Zhang et al., 2007).

ژانگ و همکاران (Zhong et al., 2009)، نرخ انتقال رسوب در معادله انتقال رسوب را محاسبه و تغییرشکل بستر رودخانه را در دو بعد افقی شبیه‌سازی کردند.

وو (Wu, 2001)، جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد^۲ در کشور چین را شبیه‌سازی کرد. همچنین با استفاده از مدل عددی دو بعدی، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه نمود؛ بر این اساس، این نتیجه حاصل شد که تمام مدل‌های آشفتگی، نتایجی واقعی در مورد جریان‌های ساده ارائه

² Huang He (Yellow River)

¹ Neckar

عصبی مصنوعی و رگرسیون چندمتغیره (رودخانه ونایی) پرداختند. با توجه به شواهد حاصل، مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP از دقت بهتری نسبت به مدل دیگر در تخمین میزان رسوب منطقه برخوردار بود. از سوی دیگر با توجه به مقدار شاخص R^2 که برای دو مدل محاسبه شده است، دقت تخمین مدل به مقدار $90/47$ برای مدل MLP محاسبه شده، مقدار R^2 برای این مدل برابر $0/89$ است. پس از مدل شبکه عصبی مصنوعی MLP، مدل رگرسیون خطی چند متغیره با مقدار R^2 برابر با $0/353$ قرار دارد که این امر بیانگر دقت سه برابری مدل MLP نسبت به مدل رگرسیون می‌باشد.

مروری بر مطالعات حاصل نشان می‌دهد که در عمده مطالعات رسوب رودخانه‌ها، به مدل‌های عددی و هوش مصنوعی صرف اتکا شده است. با توجه به ماهیت تصادفی رسوب‌گذاری رودخانه، انجام عملیات میدانی در موقعیت مورد مطالعه می‌تواند تا حد زیادی در افزایش دقت مطالعات تاثیرگذار باشد. از این رو در تحقیق حاضر با انجام توامان مطالعات میدانی و عددی، سعی در تخمین دقیق نرخ رسوب‌گذاری و فرسایش در طی زمان در محدوده مورد مطالعه گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل محدوده‌ای از رودخانه سقز است که از بالادست به ایستگاه چراغ‌ویس و از پایین‌دست به ایستگاه قَبَقَبَلو ختم می‌شود. رودخانه سقز یکی از شاخه‌های مهم زرينه‌رود است. شاخه‌های اولیه زرينه‌رود تا حوالی روستاهای قشلاق، افغانان و کندلان به نام چم میرنقشینه و پس از این نقطه، به نام رودخانه سقز مشهور است. رودخانه سقز در جهت شمال غربی جریان یافته و در روستای تموغه پس از تلاقی با رودخانه فرعی خان به سقز تغییر مسیر می‌دهد و وارد شهرستان سقز می‌شود؛ از میان این شهر می‌گذرد و با طی مسافتی پریپیچ‌وخم به دریاچه سد زرينه‌رود می‌ریزد. با توجه به تخلیه جریان‌های این رودخانه به سد زرينه‌رود و اهمیت اطلاع از نرخ ته‌نشینی رسوبات در

را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که مدل در سطح اطمینان ۹۰ درصد قادر است پروفیل طولی سطح آب، پروفیل طولی رسوب‌گذاری مشاهداتی در مدل آزمایشگاهی و پروفیل طولی فرسایش مشاهداتی در مدل آزمایشگاهی در محدوده محل تلاقی را پیش‌بینی کند.

سعیدیان و مرادی (Saeediyani & Moradi, 2021) در تحقیقی به منظور تخمین رسوب با استفاده از مولفه‌های مختلف فرسایش در کاربری‌های گوناگون نهشته‌های سازند گچساران، بخشی از حوزه آبخیز کوه گچ شهرستان ایذه را انتخاب نمودند. در این تحقیق تعیین رابطه بین رسوب تولیدی و مولفه‌های مختلف فرسایش مانند میزان رواناب، مقدار نفوذپذیری خاک و شروع آستانه رواناب و فرسایش در کاربری‌های مختلف سازند گچساران به کمک رگرسیون چندمتغیره انجام گرفت. نتایج نشان داد که تخمین رسوب با استفاده از مولفه‌های مختلف فرسایش، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد و می‌توان از آن در سایر حوزه‌های آبخیز استفاده نمود. همچنین نتایج نشان داد که در تخمین رسوب به وسیله مولفه‌های مختلف فرسایش، شروع آستانه رواناب و فرسایش بیشترین تاثیرگذاری مثبت و منفی را دارد.

ثاقبیان (Saghebani, 2021) در تحقیقی جهت کاهش مقدار خطا در پیش‌بینی دبی رسوبی از روش‌های پیش‌پردازش سری زمانی به همراه روش‌های هوشمند مبتنی بر کرنل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) استفاده نمود. نتایج نشان داد که در حالت اول، مقدار معیار خطا برای مدل برتر به ترتیب از $0/35$ و $0/37$ برای روش‌های GPR و SVM به $0/28$ و $0/29$ برای مدل‌های تلفیقی کاهش یافت. به طور کلی، مدل‌های ترکیبی دقت مدل‌سازی را بین ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش دادند. جهت ارزیابی قابلیت اطمینان مدل برتر، از تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو استفاده شد و نتایج نشان داد که مدل GPR دارای درجه عدم اطمینان مطلوبی در مدل‌سازی است.

ابوالفتحی و همکاران (Abolfathi et al., 2018) به ارزیابی مدل‌های تخمین میزان رسوب رودخانه با روش شبکه

معادله پیوستگی (۱) و معادلات اندازه حرکت (۲) و (۳) در فضای دوبعدی به صورت متوسط در عمق استفاده می‌شود (Zhang, 2005).

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor}v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{cor}u \quad (3)$$

که در آن u و v سرعت در هر نقطه در جهت x و y و z رقوم بستر، g شتاب ثقل، t زمان، h عمق آب در هر نقطه، $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}, \tau_{yx}$ مؤلفه‌های تنش برشی رینولدز، τ_{bx}, τ_{by} مؤلفه‌های تنش برشی در سطح بستر و f_{cor} اثر پیچشی می‌باشند.

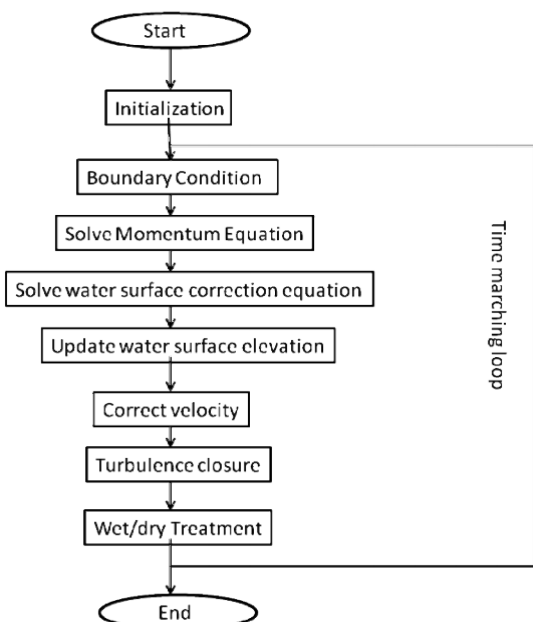


Fig. 2 Flowchart of the solution method in CCHE2D software

شکل ۲ فلوجارت روش حل در نرم‌افزار CCHE2D

مخازن سدها، این ناحیه به عنوان بازه مورد مطالعه انتخاب گردید. این حوضه آبریز با حداکثر ارتفاع ۲۸۲۵ متر از سطح آب‌های آزاد و حداقل ارتفاع ۱۴۰۳ متر مابین طول‌های شرقی ۴۶ درجه و ۰۲ دقیقه الی ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۶ درجه و ۰۶ دقیقه الی ۳۶ درجه و ۲۲ دقیقه در استان کردستان و در محدوده شهرستان سقز قرار گرفته است. طول کل این رودخانه حدود ۱۰۰ کیلومتر و مساحت حوضه آبریز آن حدود ۱۳۵۰ کیلومترمربع است (شکل ۱).

۲-۲- مدل CCHE2D

مدل CCHE2D، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز است که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی^۱ (NCCHE) دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه شده و توسعه یافته است. در این مدل هیدرودینامیکی دوبعدی، برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده تحت عنوان CHE-MESH استفاده می‌شود و حل میدان جریان و انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم‌افزار با عنوان CCHE-GUI، انجام می‌شود (Zhang et al., 2007). فلوجارت حل عددی در نرم‌افزار CCHE2D به قرار شکل ۲ می‌باشد.

□ معادلات حاکم بر جریان آب و رسوب

در مدل CCHE2D، برای تحلیل هیدرولیک جریان از



Fig. 1 Study area
شکل ۱ منطقه مورد مطالعه

¹ National Center for Computational Hydraulic and Engineering

۲-۳- داده‌ها و روش تحقیق

موقعیت داده‌برداری از مصالح بستر به قرار مقاطع جدول ۱ و بر روی عکس گوگل ارث شکل ۳ مشخص شده است. در بازدید میدانی صورت‌گرفته از محدوده مورد مطالعه در مقاطع منتخب جداگانه، سرعت‌های جریان، نیمرخ طولی سطح آب و مواد رسوبی بستر، جهت تعیین دانه‌بندی و مشخص کردن قطر معرف ذرات و نیز مختصات رقوم ارتفاعی منطقه به منظور تهیه شبکه محاسباتی و شبیه‌سازی، برداشت گردید. نمودار دانه‌بندی مورد استفاده در این بخش در شکل ۴ درج شده است. همچنین جرم مخصوص مصالح برداشت‌شده بر اساس نتایج آزمایش فوق برابر ۲/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده است.

جدول ۱ موقعیت برداشت مصالح رسوبی بستر

Table 1 The location of the collection of bed sedimentary materials

Data collection position	Longitude	Latitude
1	X=600993	Y=4006818
2	X=601127	Y=4006993
3	X=601230	Y=4007136
4	X=601395	Y=4007268
5	X=601620	Y=4007245
6	X=601800	Y=4007188

در بخش رسوب، مدل CCHE2D برای محاسبه بار رسوب، معادله کلی پخش-انتقال (معادله (۴)) و برای محاسبه تغییر شکل بستر، معادله پیوستگی بار بستر (معادله (۵)) را به کار می‌گیرد. رسوبات غیریکنواخت بر اساس اندازه ذرات به دسته‌های مختلف k دسته‌بندی می‌شوند (Zhang, 2005).

$$\frac{\partial(hc_k)}{\partial t} + \frac{\partial(Uhc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vhc_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) + E_{bk} - D_{bk} \quad (4)$$

$$(1 - p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(\delta c_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} = -E_{bk} + D_{bk}, (k = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (5)$$

که در آن p' تخلخل مواد بستر، δ ضخامت لایه بار بستر (میلی‌متر)، c_{bk} غلظت متوسط بار معلق همه اندازه ذرات (gr/litr)، q_{bkx} و q_{bky} نرخ انتقال رسوب هر دسته در جهات x و y ، E_{bk} و D_{bk} نسبت تبادل مواد لایه بستر و بار معلق و ε_s ضریب پخش می‌باشند.



Fig. 3 Location of the sections of sedimentary bed materials

شکل ۳ موقعیت مقاطع برداشت مصالح رسوبی بستر

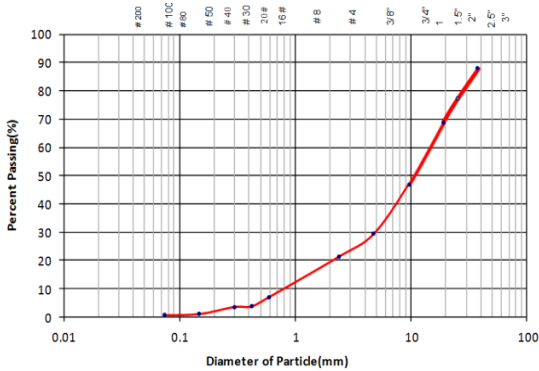


Fig. 4 Particle-size distribution curve of bed sedimentary materials

شکل ۴ نمودار دانه‌بندی مواد رسوبی بستر

12128		
598544.04	4004360.65	1586
598544.04	4004360.65	1586
598691.94	4004372.65	1590
598663.73	4004371.19	1590
598626.32	4004366.41	1590
598597.15	4004371.96	1590
598583.06	4004395.58	1590
598584.61	4004416.28	1590
598586.94	4004433.36	1590
598595.95	4004465.75	1590
598592.66	4004452.24	1590
598601.79	4004478.07	1590

Fig. 5 The file containing the coordinates and elevation numbers of the points of the study area in *.mesh-xyz format

شکل ۵ فایل حاوی مختصات و رقوم ارتفاعی نقاط محدوده مطالعاتی با فرمت *.mesh-xyz

برای وارد کردن داده‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به مدل CCHE2D، پنج حالت مختلف وجود دارد که هر کدام با فرمت‌های مخصوص مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیق حاضر از حالت دوم -یک فایل حاوی مختصات و رقوم ارتفاعی نقاط محدوده مطالعاتی با فرمت *.mesh-xyz- استفاده شده است. در فایلی که برای این روش آماده می‌شود، سطر اول بیانگر تعداد نقاط مورد استفاده و سطرهای بعد هر ستون، معرف مختصات x ، y و رقوم ارتفاعی نقطه می‌باشند (شکل ۵).

برای بازه مورد مطالعه رودخانه سقز چای، بخشی از اطلاعات توپوگرافی با نقشه‌برداری میدانی جمع‌آوری شد و بخش دیگر آن از یک نقشه توپوگرافی کامل به صورت منحنی‌های میزان در فرمت نرم‌افزار AutoCAD Land به دست آمد. برای استخراج داده‌های رقوم از این نقشه، با استفاده از دستور Macro در نرم‌افزار AutoCAD Land، فایل خروجی با فرمت Textpad استخراج شد. پس از تبدیل منحنی‌های میزان به داده‌های نقطه‌ای با روش فوق، این داده‌ها در فرمت فایل ورودی نرم‌افزار تولید شبکه آماده شده است. بعد از تشکیل شبکه‌های محاسباتی و مش‌بندی محدوده مورد مطالعه، نوبت تکمیل شرایط اولیه جریان است (شکل ۶).

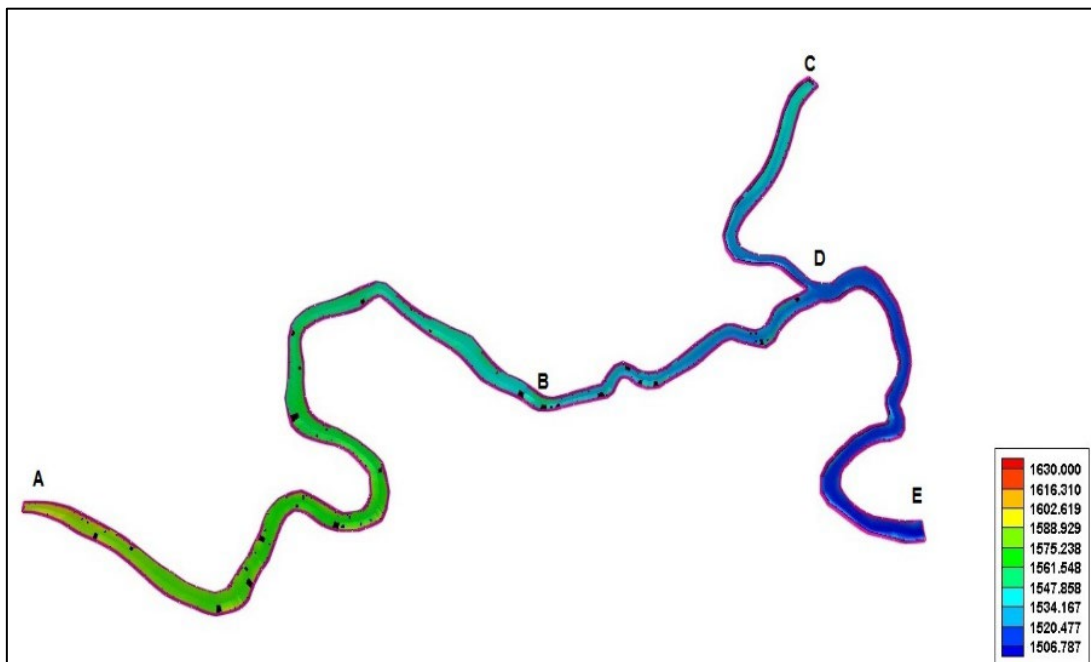


Fig. 6 Initial Condition exerted to CCHE2D model
شکل ۶ شرایط اولیه اعمالی در مدل CCHE2D

پس از تعیین شرایط اولیه و مرزی جریان، برای اجرای مدل باید مدت‌زمان دوره شبیه‌سازی و طول گام‌های محاسباتی مدل آشفتگی موردنظر را انتخاب نمود. مدت‌زمان شبیه‌سازی تابعی از طول مسیر شبیه‌سازی، شبکه‌بندی و... است که معمولاً با انتخاب مقادیر پیش‌فرض و سعی و خطا، تعیین می‌گردد. طول گام‌های محاسباتی نیز متناسب با شبکه‌بندی و بازه‌های مورد نیاز جهت استخراج طرح، تعیین و پس‌از آن مدل اجرا می‌گردد.

برای انجام شبیه‌سازی انتقال رسوب، ابتدا باید شبیه‌سازی جریان انجام شود؛ پس‌از آن با تعیین پارامترهای مدل انتقال رسوب، شبیه‌سازی قابل انجام خواهد بود. در این مدل تنظیمات پارامترهای رسوب به هفت گروه کلی تقسیم شده‌اند:

- **گروه اول** حاوی تعداد دسته‌های دانه‌بندی رسوب و قطر متوسط هر دسته است.
- **گروه دوم** حاوی پارامترهای انتقال رسوب مانند معادله تجربی مورد استفاده و نوع انتقال رسوب آبراهه (بارکف یا بار معلق یا هر دو) می‌باشد.
- **گروه سوم** شامل جرم مخصوص دانه‌های رسوب و طول انطباق آن‌ها است.
- **گروه چهارم** پارامترهای زبری بستر را دربر می‌گیرد که همانند قسمت شرایط اولیه جریان قابل تنظیم هستند.
- **گروه پنجم** مربوط به خصوصیات فرسایش‌پذیری کناره‌ها است.
- **گروه ششم** مربوط به تنظیم نمونه‌های رسوبات بستر بوده که شامل تخلخل بستر و اندازه رسوبات هر یک از نمونه‌ها است و در

گروه هفتم، اطلاعات و خصوصیات شرایط مرزی در قالب فایل‌هایی با پسوند *.sbc، حاوی اطلاعات شرایط مرزی بار معلق و با پسوند *.bbc، حاوی اطلاعات مربوط به شرایط مرزی بار بستر، تعیین می‌شوند (Zhang, 2005). در این تحقیق رسوبات به ۶ دسته تقسیم شده و قطر متوسط در هر گروه به‌عنوان قطر معرف به مدل معرفی شد (Simons & Şentürk, 1992) (جدول ۳).

شرایط اولیه جریان شامل تراز اولیه سطح آب، ضریب زبری کف و جداره‌ها و تراز اولیه بستر است. در هنگام وارد کردن فایل شبکه به مدل، فقط اطلاعات تراز اولیه بستر در آن وجود دارد؛ بنابراین تراز سطح آب و زبری کف و جداره‌ها باید به مدل وارد شوند. برای این منظور در رابط کاربری، ابزارهایی پیش‌بینی شده که توسط آن‌ها می‌توان برای تمام یا قسمت‌های دلخواهی از شبکه، مقادیر پارامترهای فوق را معین نمود. این مقادیر در فایل شبکه ذخیره می‌شوند.

پارامترهای جریان شامل خصوصیات آب مانند جرم مخصوص، لزجت سینماتیکی، ثابت ون کارمن و خصوصیات زبری کف است. خصوصیات آب می‌تواند توسط کاربر انتخاب شود؛ ولی مقادیر پیش‌فرض مدل معمولاً مناسب بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. خصوصیات زبری شامل گزینه‌هایی است که به کاربر امکان می‌دهد از میان مقادیر موجود در فایل شبکه که در بخش قبل تعیین شد یا معادلات تجربی موجود در مدل، برای محاسبه زبری استفاده نماید و یا مقادیر ضریب زبری را به‌دلخواه به محدوده محاسباتی تخصیص دهد.

شرایط مرزی جزء جدایی‌ناپذیر روش‌های عددی حل معادلات دیفرانسیل می‌باشند. در مدل حاضر نیز وجود شرایط مرزی برای حل مسئله ضروری است. این مدل قابلیت استفاده از شرایط مرزی ماندگار و نیمه‌ماندگار را دارا است. در مرز ورودی، می‌توان یک دبی ثابت و یا هیدروگراف دبی ورودی را به‌عنوان شرط مرزی در نظر گرفت. همچنین مرز خروجی را می‌توان آزاد و یا تراز ثابت سطح آب، منحنی دبی-اشل یا هیدروگراف سطح آب در نظر گرفت. تمام این شرایط با استفاده از فایل‌هایی با فرمت خاص به مدل معرفی می‌شوند.

در مطالعه حاضر شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان در بازه‌های رودخانه در قالب سری بلندمدت آبدهی رودخانه سقز در محل ایستگاه قَبَلو و رودخانه خان در محل ایستگاه چراغ‌ویس از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹، به مدل معرفی شد (جدول ۲).

جدول ۳ طبقه‌بندی ذرات رسوب بستر

Table 3 Classification of bed sediment particles

Material Type	Grain size classification	The percentage of bed materials (%)	Average particle diameter (mm)
Cobbles	Class 6	12.33	190
Coarse Gravel	Class 5	18.76	30.1625
Fine Gravel	Class 4	47.61	5.554
Coarse Sand	Class 3	18.79	0.4743
Fine Sand	Class 2	1.93	0.1115
Slit	Class 1	0.58	0.011

پیش از انجام تحلیل حساسیت، برای دستیابی به یک شبکه بهینه باید ابعاد شبکه را تغییر داد تا نتایج مستقل از ابعاد شبکه شوند. تغییر ابعاد شبکه تا دستیابی به کمترین اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی ادامه می‌یابد. بدین منظور پس از شبیه‌سازی جریان در بازه‌های کوتاه‌مدت و تغییر ابعاد شبکه، در نهایت شبکه به‌دست‌آمده شامل ۳۲۱ گره در طول و ۲۱ گره در عرض شد. طول سلول‌های شبکه به‌طور متوسط حدود ۵/۵ متر بود و تا حد امکان سعی شد خطوط شبکه از حالت عمود بر هم خارج نشوند.

در مدل مورد استفاده در این تحقیق، ۵ پارامتر اصلی به‌منظور واسنجی مدل وجود دارد. این پارامترها عبارتند از: مدل آشفتگی، فاکتور انطباق، عدد اشمیت، ضریب زبری و رابطه تجربی. پس از انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای حساس در مرحله واسنجی، تدقیق می‌شوند. به‌منظور واسنجی مدل، وجود یک نقشه رقومی از کف مسیل، تراز سطح آب و مقاطع عرضی مسیل ضروری است؛ اما با توجه به طول زیاد مسیل و همچنین عدم وجود نقشه‌ای مناسب، ناگزیر از یک پروفیل طولی و ۳۹ مقطع عرضی با مقیاس کوچک در ناحیه‌ای ۲۶۰۰ متری در محل ایستگاه چراغ‌ویس بر روی رودخانه خان استفاده شد. با توجه به اطلاعات موجود، واسنجی مدل صرفاً بر اساس پروفیل طولی مسیل صورت گرفت. به این منظور، روابط تجربی ظرفیت حمل رسوب وو و روش اصلاح‌شده انگلند-هانسن، به ازای رسوبات در قالب مقادیر مختلف عدد اشمیت، فاکتور انطباق بار معلق و ضریب زبری آزمایش شدند تا نتایج خروجی مدل

جدول ۲ شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان

Table 2 Inlet and Outlet boundary Condition

Range	Water Level Height (m)		Average Discharge (m ³ /s)
	Input Range	Output Range	
A-B	1591	1534	5.11
B-D	1534	1519.65	5.11
C-D	1538	1519.65	3.87
D-E	1519.65	1507.75	8.98

برای حل معادلات انتقال رسوب توسط مدل، وجود شرایط مرزی ضروری است. در اینجا وجود شرایط مرزی در بالادست (ورودی) به‌صورت غلظت بار معلق و نرخ حرکت بارکف در جریان ورودی کافی است. در مطالعه حاضر برای شرایط مرزی رسوب از سری بلندمدت غلظت بار معلق و نرخ حرکت بارکف رودخانه سقز در محل ایستگاه قَبَلو و رودخانه خان در محل ایستگاه چراغ‌ویس از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹، استفاده شد. در مرز خروجی شرط مرزی وجود ندارد.

برای اعمال خصوصیات بستر، در تمام طول آبراهه، بستر به‌صورت فرسایش‌پذیر در نظر گرفته شده و دانه‌بندی بستر با دانه‌بندی رسوبات یکسان و تخلخل ذرات نیز برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته شده است. پس از تعیین تمام پارامترها و شرایط مرزی، اجرای مدل انتقال رسوب انجام می‌شود. برای این منظور بازه زمانی موردنظر و همچنین گام‌های زمانی انجام محاسبات ضروری است.

۳- نتایج و بحث

برای انجام شبیه‌سازی، تعیین تعدادی از پارامترها توسط کاربر انجام می‌شود که برخی از آن‌ها دارای مقادیر مشخص، برخی قابل‌اندازه‌گیری یا محاسبه و سایر مقادیر، تجربی هستند که در مدل‌های ریاضی برای واسنجی مدل به کار می‌روند و باید به‌صورت سعی و خطا تعیین شوند.

همچنین روابط ظرفیت حمل رسوب توسط کاربر از میان گزینه‌های موجود در مدل انتخاب می‌شوند. مرحله تحلیل حساسیت به‌منظور شناسایی پارامترهایی که بیشترین تاثیر را بر نتایج مدل دارند، انجام می‌شود تا در مرحله واسنجی زمان کمتری برای رسیدن به نتایج مطلوب صرف شود.

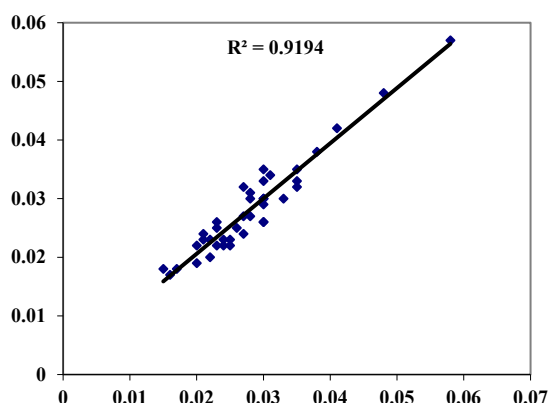


Fig. 7 Correlation diagram of observational sediment distribution with the Wu et al. relation

شکل ۷ نمودار همبستگی نگار توزیع رسوب بستر مشاهداتی با رابطه وو

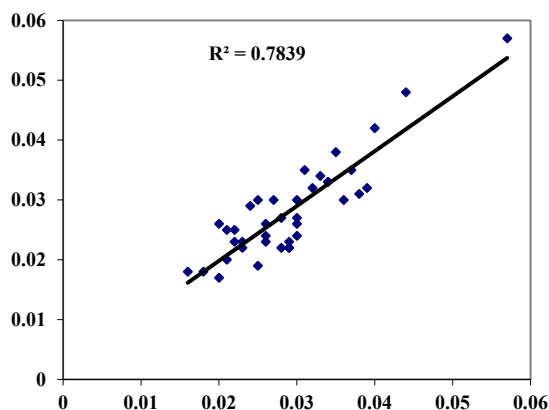


Fig. 8 Correlation diagram of observational sediment distribution with the Engelund-Hansen relation

شکل ۸ نمودار همبستگی نگار توزیع رسوب بستر مشاهداتی با رابطه انگلند-هانسن

جدول ۴ نتایج مقدار فرسایش و ته‌نشست رسوب در بازه‌های مدل‌سازی شده

Table 4 The results of the amount of erosion and Sediment deposition in the modeled regions

Regions	Erosion (m ³)	Sediment deposition (m ³)
Sub-branch, Khan River	11748	57186
Main branch, Saqqez River	6959	25298
Total	18708	82485

کل فرسایش در محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود. همچنین میزان کل ته‌نشست رسوب در سال به‌طور متوسط

با مقادیر مشاهداتی مطابقت داشته باشند.

مقایسه نتایج توزیع رسوبات بستر نشان داد که رابطه تجربی وو نسبت به روش اصلاح‌شده انگلند-هانسن، هماهنگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی در ایستگاه چراغ‌ویس دارد. جهت بررسی دقیق‌تر مدل از دو روش آماری جذر میانگین مربع خطا یا $E.S.M.R$ ¹ و میانگین درصد خطای مطلق یا $E.P.A.M$ ² استفاده گردید (معادلات (۶) و (۷))؛ بنابراین رابطه تجربی وو با ضریب همبستگی ۰/۹۲۶۸ و جذر میانگین مربع خطای ۰/۰۰۲ و میانگین درصد خطای مطلق ۷/۱۳ برای شبیه‌سازی انتخاب شد که با توجه به دامنه کلی واسنجی در نظر گرفته‌شده برای مدل رسوب (Donigian, 2000)، این روش در رده خیلی خوب قرار می‌گیرد.

$$R.M.S.E = \sqrt{\left| \frac{1}{n} + \sum_{i=1}^n (q_o - q_e)^2 \right|} \quad (6)$$

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{q_o - q_e}{q_o} \right| \times 100 \quad (7)$$

در این معادلات q_e مقدار مشاهداتی و q_o مقدار محاسباتی حاصل از مدل است.

مقدار ضریب زبری نیز برابر ۰/۰۴۵ مطابق با وضع موجود بستر رودخانه شامل مصالح بستر، پیچ و خم‌ها و ضوابط و روش‌های تجربی موجود انتخاب و در شبیه‌سازی لحاظ گردید. نمودارهای همبستگی نگار توزیع متوسط رسوبات بستر در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

بعد از انجام مراحل شبیه‌سازی، نتایج مربوط به هر دوره، بارگذاری و با نمایش داده‌ها در پنجره داده‌های جدولی و گرافیکی از آن‌ها خروجی گرفته می‌شود. با تفکیک نتایج، مقدار فرسایش و ته‌نشست رسوب برای دوشاخه اصلی و فرعی مطابق با جدول ۴ ارائه گردید.

با توجه به نتایج، ملاحظه می‌گردد در محدوده مورد مطالعه رودخانه سقز با طول ۲۲ کیلومتر، میزان کل فرسایش در سال به‌طور متوسط ۱۸۷۰۸ مترمکعب است و رودخانه فرعی خان با میزان ۱۱۷۴۸ مترمکعب، حدود ۶۳ درصد از

² Mean Absolute Percentage Error

¹ Root Mean Square Error

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی رسوب در بازه‌ای از رودخانه سقز چای در استان کردستان که محدود به دو ایستگاه داده‌سنجی چراغ‌ویس و قَبَقَلو است، با استفاده از مدل عددی CCHE2D انجام شد. در نهایت مشخص گردید سالیانه میزان کل فرسایش به‌طور متوسط ۱۸۷۰۸ مترمکعب و ته‌نشست مواد رسوبی ۸۲۴۸۵ مترمکعب است که در این میان رودخانه فرعی خان با میزان ۱۱۷۴۸ مترمکعب، حدود ۶۳ درصد از کل فرسایش و همچنین با میزان ۵۷۱۸۶ مترمکعب، حدود ۶۹ درصد از کل ته‌نشست مواد رسوبی در محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود. در نتیجه رودخانه فرعی خان که در روستای تموغه با شاخه اصلی رودخانه سقز تلاقی می‌کند از نظر ریخت‌شناسی در رده رودخانه‌های جوان قرار دارد و میل به فرسایش در این شاخه فرعی نسبت به شاخه اصلی بالغ‌تر بیشتر است. همچنین، نتایج نشان داد که در سال ۱۳۹۴ رودخانه سقز در کل بازه مطالعه‌شده دارای تغییرات متوسط تراز بستر (کف‌کنی یا انباشت) به میزان ۰/۲۰ متر خواهد بود.

فهرست نشانه‌ها

u	سرعت در هر نقطه در جهت x
v	سرعت در هر نقطه در جهت y
z	رقوم بستر
g	شتاب ثقل
t	زمان
h	عمق آب در هر نقطه
$\tau_{ij}, (i, j = x, y)$	مولفه‌های تنش برشی رینولدز
$\tau_{bi}, (i = x, y)$	مولفه‌های تنش برشی در سطح بستر
f_{cor}	اثر پیچشی
p'	تخلخل مواد بستر
δ	ضخامت لایه بار بستر
c_{bk}	غلظت متوسط بار معلق همه اندازه ذرات
$q_{bki}, (i = x, y)$	نرخ انتقال رسوب هر دسته در جهات y و x
E_{bk}	نسبت تبادل مواد لایه بستر

۸۲۴۸۵ مترمکعب است. رودخانه فرعی خان با میزان ۵۷۱۸۶ مترمکعب، حدود ۶۹ درصد از کل ته‌نشست مواد رسوبی در محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود و این بیانگر آن است که رودخانه فرعی خان به دلیل ارتفاع و شیب بیشتر و در نتیجه جوان‌تر بودن نسبت به شاخه اصلی رودخانه سقز، فرسایش‌پذیرتر نشان می‌دهد.

نتایج خروجی نشان داد که رودخانه سقز در کل محدوده مطالعه‌شده دارای تغییرات متوسط تراز بستر به میزان ۰/۲۰ متر خواهد بود. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمونه‌ای از خروجی تغییرات بستر در محدوده مورد مطالعه به صورت گرافیکی نمایش داده شده است.



Fig. 9 An example of bed changes in an area of the sub-branch of the Khan River

شکل ۹ نمونه تغییرات بستر در ناحیه‌ای از شاخه فرعی رودخانه خان

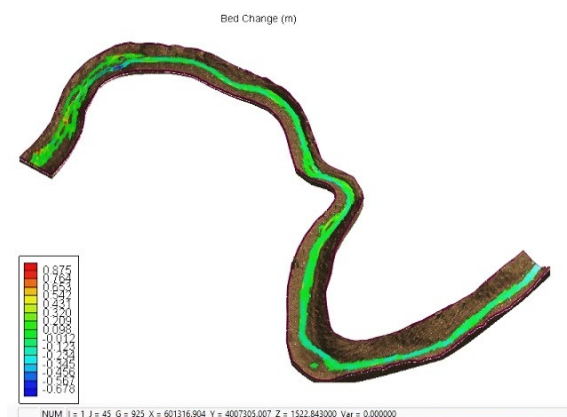


Fig. 10 An example of bed in an area of the main branch of the Saqqez River

شکل ۱۰ نمونه تغییرات بستر در ناحیه‌ای از شاخه اصلی رودخانه سقز

۵- سپاس‌گزاری

از سازمان آب منطقه‌ای استان کردستان برای همکاری در ارائه اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق، صمیمانه سپاس‌گزاریم.

D_{bk}	نسبت تبادل مواد بار معلق
ε_s	ضریب پخش
$R.M.S.E$	جذر میانگین مربع خطا
$M.A.P.E$	میانگین درصد خطای مطلق
q_e	مقدار مشاهداتی
q_o	مقدار محاسباتی

References

منبع‌ها

- study of Sarbaz River. , *Iranian Hydraulic Association, Tarbiat Modarres University*. <https://civilica.com/doc/96156>
- Nassar, M. A. (2011). Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(3), 187–195.
- Saeediyani, H., & Moradi, H. R. (2021). Sediment Estimation Using Different Erosion Components. *Water and Soil*, 35(3), 365–378. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.69031.1029>
- Saghebani, S. M. (2021). Estimation of Suspended Sediment Load Using Integrated Intelligent Methods with Considering Model Uncertainty. *Water and Soil*, 35(4), 475–488. <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.68665.1021>
- Simons, D. B., & Şentürk, F. (1992). *Sediment transport technology: water and sediment dynamics*. Water Resources Publication.
- Wu, W. (2001). CCHE2D sediment transport model (version 2.1). *National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, MS, USA*.
- Zhang, Y. (2005). CCHE2D-GUI—graphical user interface for the CCHE2D model user's manual—version 2.2. *Mississippi, US: National Center for Computational Hydroscience and Engineering*.
- Zhang, Y., Jia, Y., & Wang, S. S. Y. (2007). A conservative multi-block algorithm for two-dimensional numerical model. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 1(1), 43–55.
- Zhong, D. Y., Zhang, H. W., Zhang, J. H., & Ding, Y. (2009). Two-dimensional numerical model of flow and sediment transport for wandering rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40(9), 1040–1047.
- Abolfathi, D., Madadi, A., & Asghari, S. (2018). Modeling the estimation of river sediment with the help of artificial neural network method (Case study: Geleroodriver). *Quantitative Geomorphological Research*, 7(2), 196–208. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_81033.html
- Athow Jr, R. F., & Trawle, S. (1976). *Enlargement of Marcus Hook Anchorage, Delaware River; Hydraulic Model Investigation*.
- Donigian, A. S. (2000). HSPF training workshop handbook and CD, lecture# 19, calibration and verification issues, slide# L19-22. *EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and Prepared for US EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC*.
- Habibi, S., Rostami, M., & Mousavi, S. A. A. (2014). Numerical Simulation of Flow and Sediment Structure in Confluence of Rivers. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 8(24), 19. <https://www.magiran.com/paper/1295247>
- Jia, Y., Wang, S. S. Y., & Xu, Y. (2002). Validation and application of a 2D model to channels with complex geometry. *International Journal of Computational Engineering Science*, 3(01), 57–71.
- Khosravi, Q. (2018). Hydrodynamic Investigation of Turbulence Flow and Sediment Transport Pattern by CCHE2D: A case study of Downstream Meander of Minab Dam. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12(40), 23–39. <http://jwmsei.ir/article-1-666-en.html>
- Maghrebi, M., Moghaddam, A., & Meshki Kakhaki, M. (2010). Numerical simulation of the turbulent flow pattern around the sediment island in the arterial river using the CCHE2D model, a case

University of Leeds (Department of Civil Engineering).

Zhou, J. G. (1997). *A mathematical model for shallow water flows with sediment transport.*