



The use of the HEC-RAS model to evaluate the pattern of sedimentation variations in areas of the Talar river

Fatemeh Hashemi¹ | Ali Shahnazari² | Andersen Mathias Neumann³

1. Postdoc Researcher, Faculty of Water Engineering, University of Sari Agriculture and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: F.Hahsemi@sanru.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor of Water Irrigation and Drainage, Faculty of Water Engineering, University of Sari Agriculture and Natural Resources, Sari, Iran E-mail: F.Hahsemi@sanru.ac.ir
3. Professor, Department of Agroecology, Aarhus University, Denmark. E-mail: mathiasn.andersen@agro.au.dk

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 2024/02/07 Received in revised 2024/05/09 Accepted 2024/05/13 Published 2024/05/15 Published online 2025/09/23 Keywords: HEC-geoRAS add-on, sedimentation, erosion, Exner equation.	The catchment area of the Talar River in Mazandaran Province is subject to annual flooding events that facilitate the transport of substantial quantities of silt. To investigate sediment transport dynamics within this watershed, samples were collected at five designated sections along an 11-kilometer segment of the Talar River. The sampling intervals were delineated as follows: 24.7–22.4 km, 18.2–20.5 km, 17.5–18 km, 16.75–17.5 km, and 11.5–16.75 km, measured from the urban area of Malakala-Najjarkala to Arab Roshan, with all distances calculated from the shoreline. This study aimed to analyze sedimentation and erosion patterns over a five-year period (2016–2021) employing the HEC-RAS model. Sediment transport and volume were assessed based on long-term data obtained from the Kiakla hydrometric station, with a specific focus on flood conditions associated with return periods of 2, 10, 25, 50, and 100 years. The findings indicate that the cumulative sediment input at the beginning of the monitored section is 0.9 million tonnes lower than the total sediment at the end. The river exhibits a pronounced tendency towards erosion. In the first section (22.4–24.7 km), the mean sediment height is 11 cm, accompanied by significant sedimentation totaling 6 million tonnes. The second section reflects an approximate deposition of 1 million tonnes. The third section demonstrates a relatively stable sediment pattern. In the fourth section, the conditions for erosion—both in terms of depth and volume—are deemed unsuitable for sediment harvesting. The fifth section (11.5–16.75 km) records erosion amounting to approximately 8.3 million tonnes, with height variations ranging from 10 to 20 cm. Under these circumstances, sediment removal is impractical; However, the implementation of flood management strategies and river engineering interventions is strongly recommended.
Cite this article: Hashemi, Fatemeh., & Shahnazari, Ali. (2025). The use of the HEC-RAS model to evaluate the pattern of sedimentation variations in areas of the Talar river. <i>Applied Researches in Geographical Sciences</i>, 25 (78), 256-277. DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.78.16	
© The Author(s). Publisher: Kharazmi University DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.78.16	

Extended Abstract

Introduction

Numerical models are powerful tools for analyzing the effects of sediment transport and exploring various scenarios under different conditions. Among the most prominent models in this category are HEC-RAS (US Army, 1989), HEC-6 (US Army, 1982), MOBED (Krishnappan, 1981), GSTARS (US Army, 1998), MIKE-11 (DHI, 2003), FLUVIAL (Chang, 1998), and SSIM (Olsen, 1993). The HEC-RAS model is particularly renowned for its versatility in simulating a wide range of river phenomena. This software is capable of accurately modeling both steady and unsteady flows in one-dimensional and two-dimensional scenarios. It also effectively simulates transverse structures such as bridges, diversion dams, reservoirs, and spillways. To visualize the study area and extract essential information—such as flood zones and water inundation depths derived from hydraulic analysis—the integration of ArcGIS software and its HEC-geoRAS extension is essential. The combination of ArcGIS and HEC-geoRAS provides river studies specialists with a highly effective tool for making informed decisions, accurately determining cross sections, and managing sediment (US Army, 1989).

Materials and Methods

The data for this study were collected through field research conducted along five consecutive intervals of an 11-kilometer stretch of the Talar River. The intervals were as follows: 24.7–22.4 km, 18.2–20.5 km, 17.5–18 km, 16.75–17.5 km, and 11.5–16.75 km, measured from the urban area of Malakala-Najjarkala to Arab Roshan. The study area is geographically located between 36°34' to 36°38' north latitude and 52°48' to 52°46' east longitude, within the Simorgh city region. Data collection took place between the years 1395 and 1400 (2016–2021). Table 1 provides detailed information on the intervals studied. To simulate flow and sediment hydraulics, the HEC-RAS model requires three main types of input data: Geometry data, Hydraulic data, and Sediment data. Additionally, the model incorporates seven sediment transport functions, primarily focusing on coarse-grained sediments, to simulate sediment behavior in rivers. This feature enhances the model's ability to accurately replicate changes in river morphology and composition, making it a robust tool for sediment transport analysis.

Results and Discussion

The simulation results indicate a strong agreement between the observed and simulated water level values across all river flow rates, as evidenced by an R^2 value of 0.74. Additionally, the Root Mean Square Error (RMSE) values were minimal, measuring only 0.4 meters, while the normalized RMSE (nRMSE) was calculated at 18%. This level of error is considered insignificant, especially when compared to potential measurement errors arising from

inaccuracies in data collection. The findings also reveal that the river is prone to erosion in most scenarios. This is supported by the fact that the total sediment input at the beginning of the simulation period was 0.9 million tonnes less than the total sediment at the end of the period. This discrepancy highlights the erosional tendencies of the river under the studied conditions.

Conclusion

The Tofalti equation was identified as the most suitable sediment transport relationship for the study region. Discharge-sediment data from the Shirgah station were analyzed using a power equation ($Y = 22.8X^{1.8}$), yielding an R^2 value of 0.85, which falls within the middle limit curve. Analysis of the river's upstream sections and comparison of depth variations between 1395 and 1400 (2016–2021) revealed a significant increase in the riverbed level during the initial period, with this trend becoming more pronounced downstream. Limited erosion was observed in the second, third, and fourth intervals, and the sedimentation patterns at the beginning and end of the simulation period were consistent. However, in the fifth interval, downstream of the studied section, a notable decline in the riverbed level was observed, which intensified further downstream. In this section, the increased gradient and water velocity led to the erosion of sedimentary materials transported from upstream. Based on these findings, it is recommended to collect sediments during the early stages, considering environmental, economic, and social factors. However, in certain areas where the river exhibits a steep slope and reduced width, erosive behavior makes sediment harvesting unsuitable. These results align with the findings of Asadi et al. (2016) and Kivanlu (2013). In summary, it can be concluded that the river's sediment-carrying capacity decreases progressively downstream..

References

- Chang, H, 1998, Generalized Computer Program FLUVIAL-12 Mathematical Model for Erodible Channels. Users Manual. 10.4025/actascitechnol.v41i1.39539
- Danish Hydraulic Institute, 2003, "Mike11 version 3.01 user manual", https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2021/Water_Resources/Mike_11_ref.pdf
- Krishnappan, B.G., 1981, "programming for MOBED, an unsteady, nonuniform, mobile boundary flow model, ", Canada center for Inland waters, 107p.
- Olsen N.R.B. (1993). SSIIM - a three-dimensional numerical model for simulation of water and sediment flow. Transactions on Ecology and the Environment vol 8, © 1994 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3541. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/HY94/HY94027FU2.pdf>
- U.S. Army corps of Engineer, 1982. "Hec6 Users Manual". <https://www.scribd.com/document/318091722/HEC-RAS-5-0-Reference-Manual>.
- U.S. Army corps of Engineers, 1989, "sedimentation Investigation of Rivers. And Reservoirs, code: EM 1110-2-4000, PP 6.1-6.13. <https://doks.el.erdc.dren.mil/guidance/sedimentation-investigations-of-rivers-and-reservoirs.pdf>

کاربرد مدل HEC-RAS در ارزیابی الگوی تغییرات رسوب گذاری بخش هایی از رودخانه تالار

سیده فاطمه هاشمی^۱، علی شاهنظری^۲، ماتیاس نیومان آندرسون^۳

۱. پژوهشگر پسادکتری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. رایانامه: sfhashemi85@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. رایانامه: Aliponh@yahoo.com

۳. استاد دانشگاه Aarhus، دانشکده Agroecology، دانمارک. رایانامه: mathiasn.andersen@agro.au.dk

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	حوضه آبریز رودخانه تالار در استان مازندران هرساله شاهد سیلاب های بزرگ با حجم رسوب انتقالی بسیار زیاد می باشد. برای بررسی انتقال رسوب از حوضه ی آبریز مذکور، ۱۱ کیلومتر از رودخانه تالار در پنج بازه مکانی در فواصل ۲۲/۴-۲۴/۷، ۱۸/۲-۲۰/۵، ۱۷/۵-۱۸/۰۰، ۱۶/۷۵-۱۷/۵ و ۱۱/۵-۱۶/۷۵ کیلومتر از محدوده شهری از دریا ملاکلا- نجار کلا تا عرب روشن انتخاب شد تا الگوی تغییرات رسوب گذاری و فرسایش در بازه زمانی پنج ساله (۱۴۰۰-۱۳۹۵) با توجه به قابلیت های مدل HEC-RAS، مورد بررسی قرار گرفت. بر همین اساس از آمار بلندمدت ایستگاه هیدرومتری کیاکلا، در شرایط سیلاب با دوره ی بازگشت های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای حوضه ی آبریز ایستگاه مذکور انتقال رسوب و حجم آورد رسوب تجزیه و تحلیل و بررسی شد. نتایج نشان داد مجموع رسوب ورودی در طول کل شبیه سازی در ابتدای دوره از مجموع رسوب در انتهای دوره شبیه سازی به میزان ۰/۹ میلیون تن کمتر و رودخانه در اکثر مواقع به صورت فرسایش پذیر است. همچنین متوسط ارتفاع رسوب در بازه مکانی اول (۲۲/۴-۲۴/۷) ۱۱ سانتیمتر و میزان رسوب گذاری ۶ میلیون تن و رسوب گذاری قابل توجه می باشد. در بازه مکانی دوم (۱۸/۲-۲۰/۵) میزان رسوب گذاری تقریباً ۱ میلیون تن می باشد. در بازه مکانی سوم نیز نتایج کم و بیش مشابه وجود دارد. در بازه مکانی چهارم شرایط از نظر عمق و حجم فرسایش برای برداشت مناسب نیست. بازه مکانی پنجم (۱۱/۵-۱۶/۷۵) میزان فرسایش به طور تقریبی ۸/۳ میلیون تن به دست آمده است. دامنه تغییر ارتفاع فرسایش در بازه مکانی پنجم از ۱۰ الی ۲۰ سانتیمتر متغیر است.
تاریخ دریافت:	
۱۴۰۲/۱۱/۱۸	
تاریخ بازنگری:	
۱۴۰۳/۰۲/۲۰	
تاریخ پذیرش:	
۱۴۰۳/۰۲/۲۴	
تاریخ انتشار:	
۱۴۰۳/۰۲/۲۶	
تاریخ انتشار آنلاین:	
۱۴۰۴/۰۷/۰۱	
کلیدواژه ها:	
الحاقیه HEC-geoRAS، رسوب گذاری، فرسایش، معادله Exner	

استناد: هاشمی، سیده فاطمه؛ و شاهنظری، علی (۱۴۰۴). کاربرد مدل HEC-RAS در ارزیابی الگوی تغییرات رسوب گذاری بخش هایی از رودخانه تالار. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۵ (۷۸)، ۲۷۷-۲۵۶.

<http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.78.16>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه خوارزمی تهران.

مقدمه

عوامل طبیعی و انسانی باعث می‌شود رودخانه‌ها با رسوب‌گذاری شدید و فرسایش بستر یا سواحل مواجه هستند. فرسایش و رسوب‌گذاری و اثرات بلندمدت آن‌ها، بسته به موقعیت و رژیم هیدرولوژیکی، تغییرات چشمگیری در ژئومورفولوژی رودخانه ایجاد می‌کند که غالباً به سه شکل بار معلق، بار بستر یا بار شستشو^۱ صورت می‌پذیرد (جوشی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). بر همین اساس مطالعات بار رسوبی که بتواند ضمن شناخت رفتار مورفولوژی رودخانه، اقدامات ساماندهی را میسر نماید، اجتناب‌ناپذیر است. چرا که بار رسوبی با تغییرات زمانی و مکانی زیادی روبرو است (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۱). این مسئله بررسی جریان و مکانیسم انتقال رسوب را دشوار می‌سازد. همچنین علیرغم پیشرفت فناوری‌های مختلف که در زمینه مدیریت فرایندهای هیدرولوژیکی رودخانه وجود دارد، دسترسی به داده‌های پایه موردنیاز برای ارزیابی این پدیده‌ها و در نتیجه شناخت مسائل آن، دشوار است. لذا روابط تجربی، مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی مختلفی توسعه یافتند که قابلیت مدل کردن خصوصیات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی رودخانه را دارا می‌باشند.

از این میان مدل‌های عددی قادر هستند اثرات مختلف انتقال رسوب را مطالعه نموده و سناریوهای متعددی را تحت شرایط مختلف موردبررسی قرار دهد. از عمده‌ترین این مدل‌ها می‌توان به مدل HEC-RAS (ارتش ایالات متحده، ۱۹۸۹)^۳، HEC-6 (ارتش ایالات متحده، ۱۹۸۲)، MOBED (کریشناپان^۴، ۱۹۸۱)، GSTARS (ارتش ایالات متحده، ۱۹۹۸)، MIKE-11 (دی‌اچ‌آی، ۲۰۰۳)^۵، FLUVIAL (چانگ^۶، ۱۹۹۸) و SSIM (اولسن^۷، ۱۹۹۳) اشاره نمود. از میان مدل‌های موجود، مدل HEC-RAS^۸ یکی از کاربردی‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف رودخانه‌ای به شمار می‌رود. این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی جریان‌های یک بعدی و دو بعدی ماندگار و غیرماندگار بوده و به‌خوبی می‌تواند سازه‌های عرضی همچون پل، سدهای انحرافی و مخزنی و سرریز را مدل نماید. همچنین به‌منظور نمایش محدوده مورد مطالعه و تحلیل و استخراج اطلاعات موردنیاز همچون پهنه سیلاب و عمق آب‌گرفتگی حاصل از تحلیل هیدرولیکی، از نرم‌افزار ArcGIS یکی از افزونه‌های آن بنام HEC-geoRAS استفاده شود. تلفیق ArcGIS و HEC-geoRAS ابزار بسیار قدرتمندی را در اختیار کارشناسان بخش مطالعات رودخانه قرار می‌دهد که بتوانند در تعیین دقیق مقاطع عرضی و مدیریت رسوبی آن تصمیم مناسب اتخاذ نمایند (ارتش ایالات متحده آمریکا، ۱۹۸۹). پژوهش‌های مختلفی در رابطه با شبیه‌سازی تک بعدی، دوبعدی و جریان ماندگار و غیرماندگار با استفاده از مدل HEC-RAS انجام شده است (محمدی^۹ و همکاران، ۲۰۱۶، روشن و همکاران، ۱۳۹۲، مطلبیان، ۱۳۹۲، ریاحی و فکور، ۱۴۰۰، ظهیری و آشناور، ۱۴۰۰، گودرزی و همکاران، ۱۴۰۱، مولودی و محمدی، ۱۴۰۰، جوشی و همکاران، ۲۰۱۹، گیبسون^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷). عمده‌ای تحقیقات یا به ارزیابی خصوصیات هیدرولیکی جریان تک بعدی و دو بعدی پرداخته (روشان و همکاران، ۱۳۹۲، محمدی و مهتدی، ۱۴۰۱، مهرورز و همکاران، ۱۳۹۹) به بررسی چگونگی پهنه‌بندی جریان سیلابی (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱، علیشاهی و همکاران، ۱۳۹۵، زراعتکار و حسن‌پور، ۱۳۹۵، رضایی، ۱۳۹۷، شفیع مطلق و عبادتی، ۱۳۹۹). همچنین مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و چگونگی الگوی فرسایش هم موضع تحقیقات دیگری در این زمینه است (امام قلی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹، جباری و همکاران، ۱۳۹۳، عرفانی و همکاران، ۱۳۹۸، مرادی و همکاران، ۱۳۹۷) و بخش دیگری، به چگونگی انتخاب مناسب‌ترین معادلات انتقال رسوب اختصاص

^۱wash load^۲Joshi^۳U. S. Army^۴Krishnapan^۵DHI^۶Chang^۷Olsen^۸Hydrologic engineering center river system analysis^۹Mohammad^{۱۰}Gibson

دارد (مرادی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). گودرزی و همکاران (۱۴۰۱) در تحقیقی به مدل‌سازی عددی انتقال رسوب و فرسایش کناره رودخانه کشکان پرداختند که نتایج آن نشان داد حجم رسوبات معلق انتقالی در فروردین ماه نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر بوده و رسوب کل با استفاده از رابطه ینگ با خطای ۱۱/۸۷+ بهترین تابع برآورد رسوب شناخته شد. جوشی و همکاران (۲۰۱۹) نیز در تحقیقی از تلفیق مدل HEC-RAS با افزونه Arc-GIS (HEC-geoRAS) چگونگی انتقال رسوبات را برای ضرایب زبری مانینگ مختلف کالیبره و اعتبارسنجی نمودند. نتایج مدل، الگوی تغییر بستر بخش‌هایی از رودخانه را نشان می‌دهد که با فرسایش و رسوب واقعی مطابقت دارد. گیسون و همکاران (۲۰۱۶) الگوی رسوب‌گذاری را در دو رودخانه پویالاب و وایت ریور در غرب واشنگتن با استفاده از مدل HEC-RAS موردبررسی قرار دادند و دریافتند که این دو رودخانه شامل سیستم‌هایی با شیب بالا و منبع رسوب در پایین دست هستند که این مسئله موجب می‌شود انباشتگی رسوب در طول هر دو رودخانه افزایش یابد. با توجه به این موضوع هرگونه پیش‌بینی ریسک سیل آینده یا بررسی‌های کاهش سیلاب، نیاز به تجزیه و تحلیل مورفولوژیکی دارد.

حوضه آبریز رودخانه تالار در استان مازندران هرساله شاهد سیلاب‌های بزرگ با حجم رسوب انتقالی بسیار زیاد می‌باشد (گزارش جامع سیلاب استان مازندران، ۱۳۹۸). از طرفی مسائل و مشکلات ناشی از فرسایش بستر و دیواره‌های رودخانه تالار، در بازه‌های مختلف این رودخانه مشهود می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه اکنون مطالعات در حد کافی و موردنیاز به‌منظور آشکارسازی روند فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه تالار حداقل بر اساس بررسی سوابق تحقیق که برای این پژوهش به عمل آمد، یافت نشد و همچنین از آنجایی که تحقیقات صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه تنها به جنبه‌های مدیریتی متمرکز بوده است، بر همین اساس در تحقیق حاضر برای بررسی ابعاد مختلف انتقال رسوب از حوضه آبریز مذکور، بخش‌هایی از رودخانه تالار انتخاب شد تا با توجه به قابلیت‌های مدل HEC-RAS، بهترین رابطه انتقال رسوب تعیین شده و الگوی تغییرات رسوب‌گذاری و فرسایش در بازه زمانی پنج ساله (۱۴۰۰-۱۳۹۵) موردبررسی قرار گیرد. همچنین انتقال رسوب و حجم آورد رسوب در شرایط سیلاب با دوره‌ی بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله با استفاده آمار بلندمدت ایستگاه هیدرومتری کیاکلا، برای حوضه‌ی آبریز ایستگاه مذکور موردبررسی قرار گرفت.

روش‌شناسی

منطقه مورد مطالعه

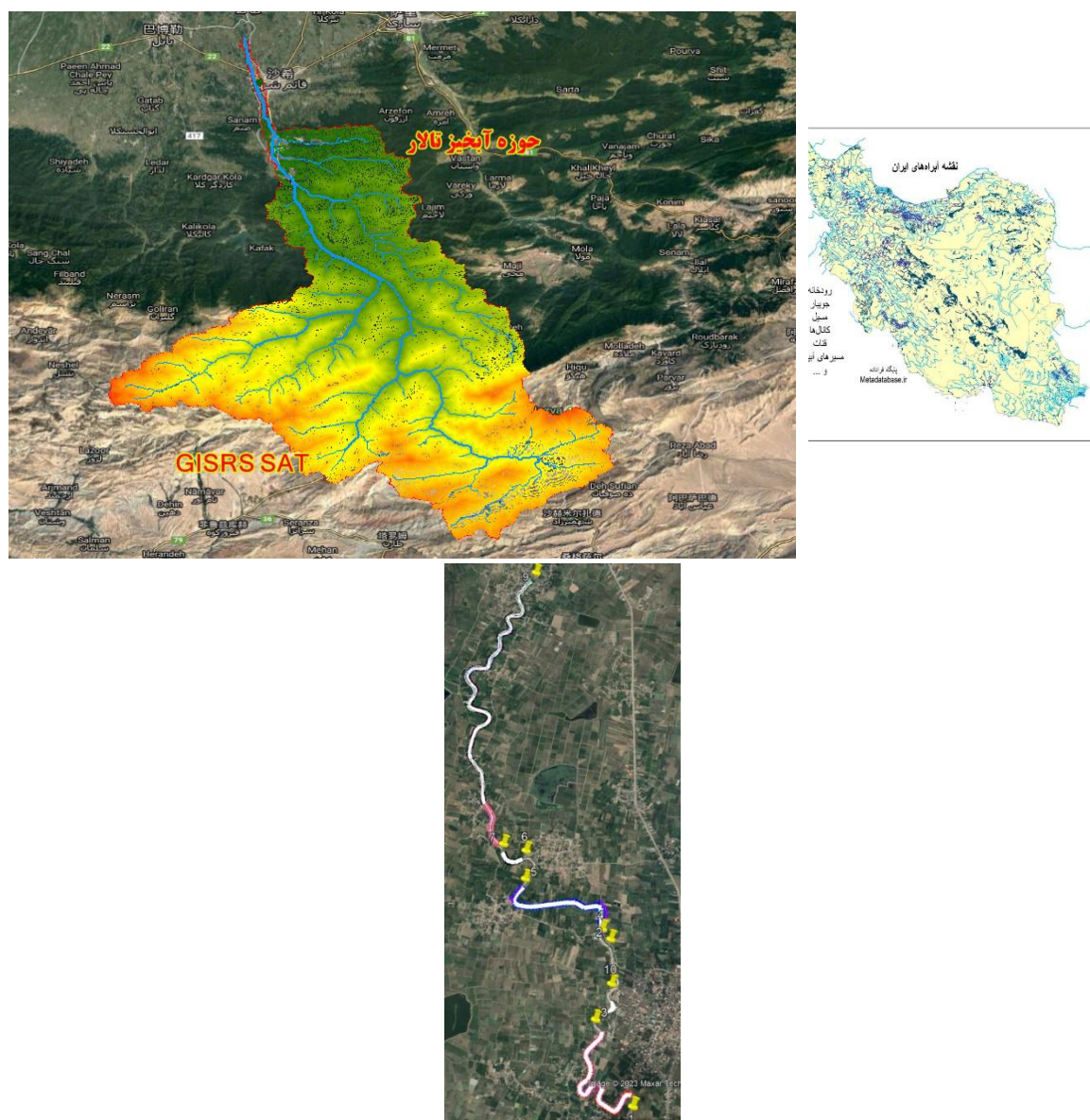
رودخانه تالار از رودخانه‌های اصلی حوزه آبریز دریای مازندران می‌باشد که در ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این رودخانه، پس از جمع‌آوری آب‌های ارتفاعات سوادکوه و فیروزکوه به دریای مازندران می‌پیوندد، رژیم آبدهی حوزه تالار برفی بارانی بوده و دارای رژیم پایه‌ای دائم می‌باشد (مطالعات جامع مهندسی رودخانه‌های شرق استان مازندران، ۱۳۹۲). اطلاعات موردنیاز این مقاله از یک پژوهش میدانی در ۵ بازه مکانی متوالی این رودخانه به طول ۱۱ کیلومتر در فواصل ۲۲/۴-۲۴/۷، ۱۸/۲-۲۰/۵، ۱۷/۵-۱۸/۰۰، ۱۶/۷۵-۱۷/۵ و ۱۱/۵-۱۶/۷۵ کیلومتر از محدوده شهری ملاکلا-نچار کلا تا عرب روشن، واقع در ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۴۶ دقیقه طول شرقی (شهرستان سیمرغ)، در طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۵ به دست آمد. در جدول (۱) مشخصات بازه‌های مکانی آورده شده است.

جدول (۱). مشخصات جغرافیایی بازه‌های مکانی مورد مطالعه از رودخانه تالار

بازه‌ها	محدوده	آغاز (متر)	خاتمه (متر)	طول بازه مکانی (کیلومتر)
بازه مکانی اول	ملاکلا-نچار کلا	X= 66462 Y= 4048571	X= 660848 Y= 4049358	۲/۳
بازه مکانی دوم	برج خیل-ملاکلا	X= 660556 Y= 4050764	X= 659234 Y= 4051218	۲
بازه مکانی سوم	برج خیل ۱	X= 659126 Y= 4051634	X= 659909 Y= 4051669	۰/۵
بازه مکانی چهارم	برج خیل ۲	X= 658749 Y= 4051767	X= 658368 Y= 4052365	۰/۷۵

بازه مکانی پنجم	عرب روشن	X= 658353 Y=4052370	X=658257 Y=4056144	۵
-----------------	----------	------------------------	-----------------------	---

بررسی میدانی از محدوده رودخانه تالار نشان می‌دهد دو ایستگاه هیدرومتری شیرگاه- تالار و کیاکلا - تالار در این محدوده وجود دارد که می‌توان از داده‌های دبی آب و رسوب آن استفاده نمود. مساحت حوزه آبریز تالار تا ایستگاه شیرگاه ۱۷۶۸ کیلومترمربع و تا ایستگاه کیاکلا ۲۳۸۶/۷۸۹ کیلومترمربع است که قسمت اعظم آن مناطق کوهستانی پوشیده از جنگل است (گزارش جامع سیلاب استان، ۱۳۹۸). در شکل (۱)، موقعیت بازه‌های مکانی و ایستگاه‌های هیدرومتری ارائه شده است.



شکل (۱). جانمایی حوزه آبریز رودخانه تالار و بازه مکانی مورد مطالعه به همراه ایستگاه هیدرومتری محدوده

رویکرد مدل HEC-RAS در انتقال رسوب

نرم‌افزار HEC-RAS به منظور انجام محاسبات هیدرولیکی یک بعدی برای شبکه کاملی از کانال‌های طبیعی و مصنوعی طراحی شده است. بخش انتقال رسوب این مدل برای شبیه‌سازی یک بعدی ته‌نشین شدن رسوب و یا فرسایش و آبستگي

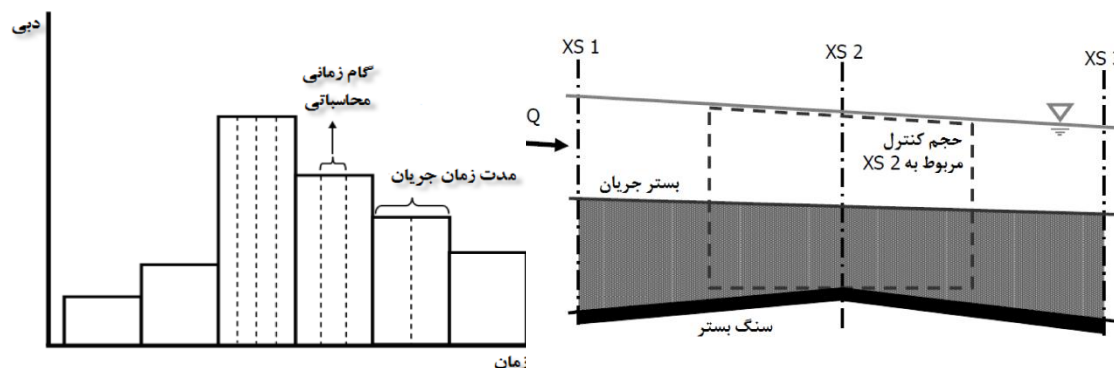
بستر در سال ۲۰۰۶ با عنوان نسخه ۴ معرفی شد (سیستم تحلیل رودخانه HEC-RAS^۱، ۲۰۱۰). این مدل براساس معادلات جریان و انتقال رسوب و معادله پیوستگی رسوب در شرایط یک بعدی و فرض جریان شبه غیرماندگار^۲ توسعه یافته است. معادلات جریان مبتنی بر روش محاسبه پروفیل سطح آب در مقاطع جریان برای جریان دائمی از طریق حل معادله ۱ به روش گام به گام استاندارد است.

$$Y_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_e \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه Y : عمق آب در مقطع، Z : تراز کف کانال اصلی، V : سرعت متوسط جریان، α : ضریب تصحیح انرژی جنبشی، g : شتاب ثقل و h_e : اتلاف انرژی کل است. همچنین HEC-RAS جهت محاسبه انتقال رسوب از معادله پیوستگی رسوب Exner استفاده می نماید که به صورت رابطه (۲)، در مدل حل می شود:

$$(1-v_p)B \frac{\partial \alpha}{\partial x} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن B : عرض کانال، α : ارتفاع بستر کانال، v_p : تخلخل لایه فعال، t : زمان، x : فاصله و Q_s : میزان رسوب انتقالی می باشد. این معادله به راحتی حجم رسوب را در حجم کنترل مشخص می کند که این مقدار معادل تفاوت بین حجم رسوب ورودی و خروجی است. در شکل (۲)، طرح شماتیک حجم کنترل که توسط HEC-RAS برای محاسبات رسوب استفاده می شود، آورده شده است. در جریان شبه غیرماندگار نیز، هیدروگراف پیوسته جریان به صورت یک هیدروگراف گسسته بیان می شود شکل (۳). به طوری که در هر بازه زمانی مقادیر جریان ثابت در نظر گرفته می شود. به عبارت دیگر مقادیر جریان در هر بازه زمانی به صورت جریان ماندگار فرض می شود (راهنمای کاربردی^{۱۳} HEC-RAS، ۲۰۱۶).



شکل (۲). طرح شماتیک حجم کنترل در نرم افزار HEC-RAS

شکل (۳). تبدیل هیدروگراف پیوسته به هیدروگراف گسسته در حالت شبه غیرماندگار

این مدل همچنین این قابلیت را دارد که تغییرات پروفیل طولی بستر رودخانه را در اثر رسوب گذاری و فرسایش برای دوره های طولانی مدت شبیه سازی نماید. هنگام استفاده از این نرم افزار، سری پیوسته جریان به قطعه های جریان ماندگار براساس متغیرهای دبی و زمان تقسیم می شود. برای هر یک از قطعه های جریان ماندگار، پروفیل سطح آب محاسبه می گردد و با استفاده از آن سرعت، شیب انرژی، عمق و سایر پارامترها در هر یک از مقاطع عرضی به دست می آید. سپس نرخ انتقال رسوب در هر یک از مقاطع محاسبه می گردد. این نرخ نشان دهنده میزان رسوب انتقالی از هر مقطع در طول زمان است. سپس میزان رسوب گذاری و یا فرسایش در هر یک از مقاطع محاسبه خواهد شد و با استفاده از آن، تغییرات حاصل در

^۱HEC-RAS River Analysis System

^۲Quasi unsteady flow

^{۱۳}HEC-RAS Application Guide

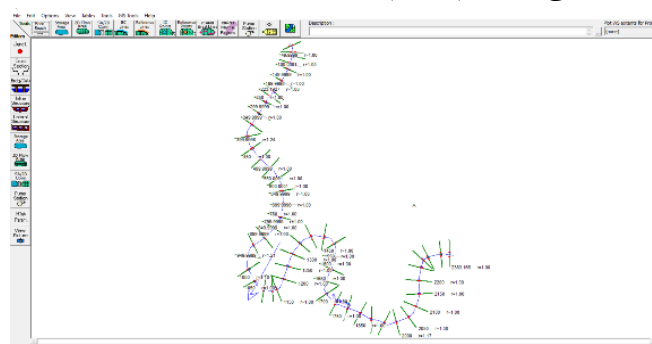
مقاطع هندسی برای بازه زمانی مربوط به دست خواهد آمد. در مرحله بعد، همین روند محاسباتی برای بازه زمانی بعدی تکرار خواهد شد.

روش انجام پژوهش

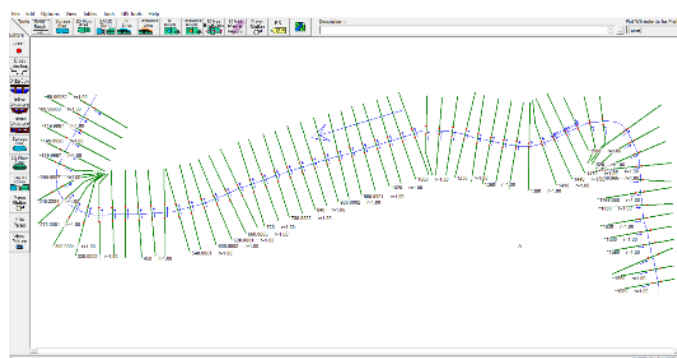
شبیه‌سازی الگوی انتقال رسوب در بازه‌های مکانی مورد بررسی با استفاده از مدل HEC-RAS

به‌منظور استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب، اطلاعات رودخانه در سه گام کلی ۱- داده‌های هندسی، ۲- داده‌های هیدرولیکی و ۳- داده‌های رسوبی به مدل وارد می‌شود. شروع کار با مدل HEC-RAS وارد کردن داده‌های هندسی مورد نیاز است که شامل اطلاعات اتصال برای سیستم آبراهه (طرح شماتیک سیستم رودخانه)، داده‌های مقاطع عرضی و داده‌های سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند. این اطلاعات جزء اولین و اصلی‌ترین اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه است. در واقع با ورود جریان به داخل رودخانه بر مبنای شکل سطح مقطع رودخانه است که پارامترهای هیدرولیکی آن نظیر سرعت، عمق و سطح آبگرفتگی مشخص می‌شود. هندسه مقطع در شرایط موجود با استفاده از نقشه رودخانه با مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه شده توسط شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان مازندران تهیه شد. بدین‌صورت که ابتدا نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار AutoCAD ویرایش و سپس به محیط ArcGIS ۹.۳ وارد شدند و بعد از اعمال تغییراتی از طریق الحاقیه HEC-geoRAS آماده ورود به نرم‌افزار HEC-RAS می‌شود. از طریق الحاقیه HEC-geoRAS در محیط GIS با استفاده از ابزار Flow Area 2D سطح جریان در پهنه رودخانه مورد مطالعه در محیط HEC-RAS ترسیم گردید و با استفاده از ابزار SA/2D Area BC Lines مناطق بالادست و پایین‌دست رودخانه مشخص شد.

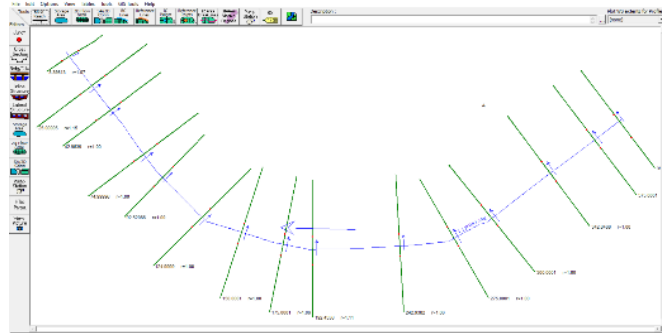
هر مقطع عرضی دارای یک نام کانال، یک نام بازه مکانی و یک ایستگاه رودخانه می‌باشد. در این مرحله محل‌هایی نظیر خم‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است. لازم به ذکر است پس از تهیه هندسه رودخانه در شرایط موجود لازم است تا ضمن شناسایی محدوده‌های تغییر یافته در اثر دخل و تصرف انسان نسبت به شبیه‌سازی هندسه اولیه و یا به عبارتی مقطع طبیعی رودخانه اقدام شد که با توجه به بازدید میدانی از محل فاصله مقاطع عرضی نسبت به یکدیگر ۵۰ متر جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شده و در مجموع ۱۶۴ مقطع عرضی استخراج گردید. در نهایت با استفاده از الحاقیه HEC-geoRAS برای به دست آوردن سایر خصوصیات جریان، نقشه مورد نظر به نرم‌افزار HEC-RAS وارد گردید. در شکل (۴) الف، ب و ج برای نمونه مشخصات هندسی سه بازه مکانی اول، دوم و سوم آورده شده است.



الف- پلان مدل HEC-RAS رودخانه تالار در بازه مکانی ملاکلا - نجارکلا



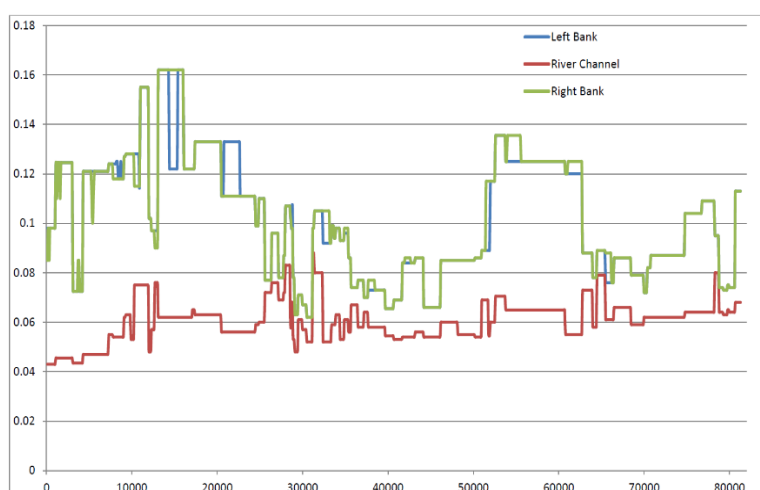
ب- پلان مدل HEC-RAS رودخانه تالار در بازه مکانی ملاکلا - برج خیل



ج- پلان مدل HEC-RAS رودخانه تالار در بازه مکانی برج خیل بخش ۱

شکل (۴). پلان رودخانه تالار در بازه‌های مکانی نمونه آن در محل HEC-RAS با استفاده از الحاقیه HEC-geoRAS

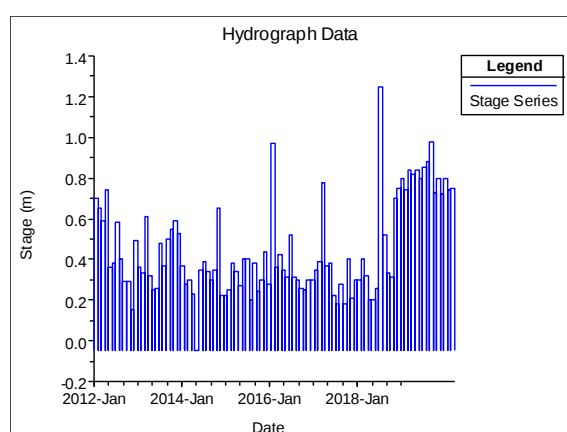
ضرایب همگرایی و واگرایی برای ارزیابی افت انرژی و ضریب زبری مانینگ از جمله مواردی است که نقش مؤثری در تراز آب و سرعت جریان در هر مقطع دارد و به عنوان ورودی مدل در این مرحله به مدل وارد می‌شود. تعیین ضریب زبری مناسب که معرف شرایط واقعی رودخانه باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در رودخانه تالار با توجه به بازدیدهای به عمل آمده و جداول معتبر (راهنمای کاربردی HEC-RAS، ۲۰۱۶) این ضرایب مشخص و به مدل وارد شد. در شکل (۵)، مقادیر ضریب مانینگ بکار رفته در مدل، در سواحل راست و چپ و همین‌طور بانک اصلی ارائه شده است.



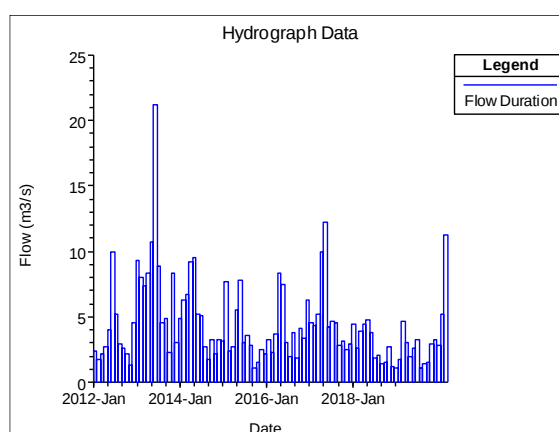
شکل (۵). میزان ضریب زبری مانینگ بکار گرفته در مدل در سواحل چپ و راست و بانک اصلی رودخانه

در گام دوم اطلاعات جریان شبه غیر ماندگار به مدل وارد شد. شرایط مرزی متعددی در این مرحله در مدل-HEC RAS موجود می‌باشد. اعمال شرایط مرزی بستگی به نوع جریان از نظر زیر بحرانی، فوق بحرانی و ماندگار و غیر ماندگار

بودن آن دارد. با این تفاسیر این شرایط مرزی را می‌توان به دو دسته شرایط مرزی بالادست و شرایط مرزی پائین‌دست تقسیم‌بندی نمود. سری زمانی دبی تنها شرایط مرزی است که برای بالادست توسط مدل لحاظ می‌گردد. درحالی‌که برای شرایط مرزی پائین‌دست، سه شرط مرزی که عبارت‌اند از عمق نرمال، سری زمانی دبی و سری زمانی تراز سطح آب در نظر گرفته می‌شود. ویرایشگر جریان شبه‌غیردایمی به‌صورت خودکار مقاطع عرضی را که به‌صورت مرزهای خارجی در مدل می‌باشند، لیست می‌نماید. در این تحقیق با توجه به شرایط موجود و اطلاعات در دسترس به‌منظور مدل‌سازی جریان رودخانه در محدوده مورد مطالعه از روش تراز سطح آب برای شرایط پائین‌دست و سری زمانی دبی برای شرایط بالادست استفاده شد. در شکل‌های (۶) و (۷) این موارد آورده شده است. دمای آب نیز در کنار سایر موارد در این مرحله به مدل وارد شد.



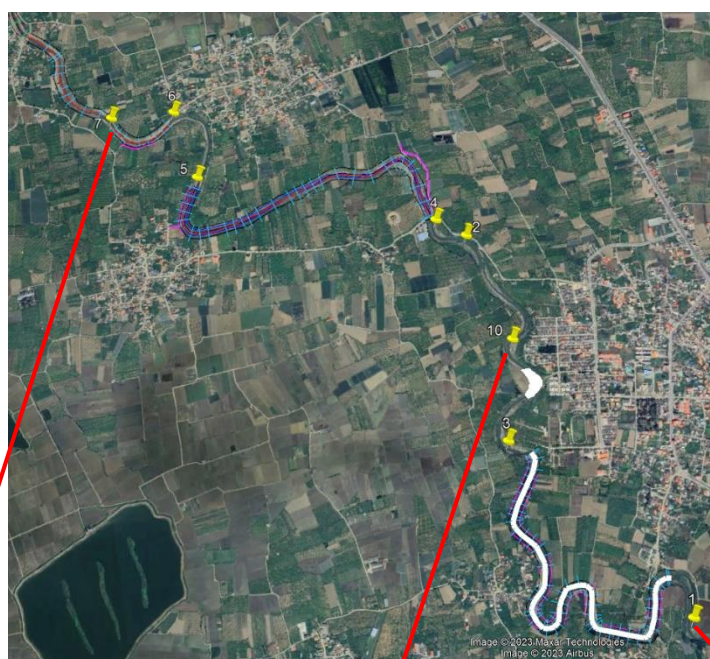
شکل (۷). هیدروگراف اطلاعات سری زمانی تراز سطح آب
در بازه زمانی ماهانه در طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۰۰



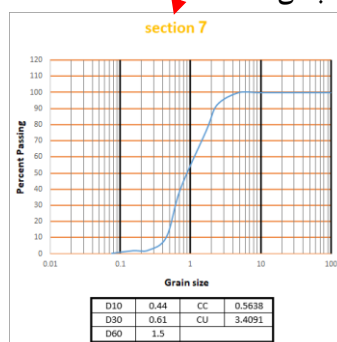
شکل (۶). هیدروگراف اطلاعات سری زمانی دبی در بازه
زمانی ماهانه در طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۰۰

در گام سوم اطلاعات مورد نیاز جهت تحلیل رسوب به مدل وارد می‌شود که عبارت‌اند از: دانه‌بندی مصالح بستر در بازه‌های مکانی مختلف (بستر سیلابی و بستر اصلی رودخانه)، شرایط مرزی (منحنی سنج رسوب در بازه مکانی بالادست رودخانه)، نقاط تغییر دبی رسوبی رودخانه، نوع معادله انتقال رسوب و ضرایب عددی به کار رفته در معادله انتقال و انتخاب نوع معادله مربوط به محاسبه سقوط ذرات. در شکل (۸). الف، ده نقطه نمونه‌برداری شده ارائه شده است. سه منحنی دانه‌بندی از رودخانه در بخش ب-د از همین شکل به‌عنوان نمونه آورده شده است.

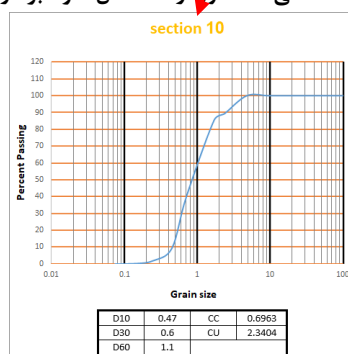
برای تعیین شرایط مرزی نیز در این مرحله از منحنی سنج رسوب^۴ استفاده شد. یک منحنی سنج، رسوب ورودی را بر اساس جریان ورودی تعیین می‌کند. برای به دست آوردن این منحنی در پژوهش حاضر از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری کیاکلا (پائین‌دست) استفاده شده و با یکی از روش‌های متداول مانند روش FAO و یا روش USBR، منحنی سنج رسوب جریان به دست آمد و هر نموداری که بیشترین میزان ضریب همبستگی را نشان می‌داد، مبنای محاسبات قرار گرفت. در همین مرحله از ورود داده‌ها به مدل، محدوده‌ای از جریان که وارد می‌شود، بایستی به‌طور کامل شامل جریان‌های مورد انتظار در طول شبیه‌سازی نیز باشد؛ زیرا چنانچه دبی عبوری از رودخانه، از حد بالای منحنی سنج تجاوز نماید، مدل HEC-RAS قادر به برون‌یابی نبوده و بزرگ‌ترین بار رسوبی موجود در داده‌های ورودی را به‌عنوان دبی رسوبی متناظر با آن در نظر خواهد گرفت. همچنین چنانچه دبی عبوری از رودخانه از حد پائین منحنی سنج کمتر باشد، با فرض بار رسوبی صفر در جریان صفر، مقدار بار رسوبی در دبی موردنظر درون‌یابی خواهد شد.



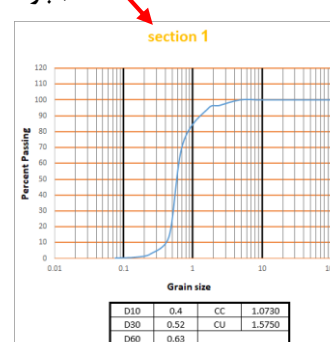
الف) بازه‌های مکانی مطالعاتی. نقاط زرد رنگ محل نمونه برداری جهت دانه بندی است



د- منحنی دانه بندی از نقطه ۷، بازه مکانی ۵



ج- منحنی دانه بندی از نقطه ۱۰، بازه مکانی ۳



ب- منحنی دانه بندی نقطه ۱ یک، بازه مکانی یک

شکل (۸). نمونه‌ای از نتایج آزمایشات دانه بندی از بستر رودخانه تالار در بازه مکانی انتخابی

همچنین این مدل در حال حاضر از هفت تابع انتقال رسوب (عمدتاً درشت دانه) جهت مدل سازی رسوب در رودخانه‌ها استفاده می‌کند. به همین جهت بخش انتقال رسوب این مدل از توانایی نسبتاً بالایی جهت شبیه سازی تغییرات ریخت شناسی و رسوبی در رودخانه‌ها برخوردار می‌باشد. در جدول (۲) خصوصیات این توابع آورده شده است. شایان ذکر است که نه تنها در این مدل، بلکه در همه مدل های ریاضی، نتایج انتقال رسوب به نوع تابع انتقال رسوب وابسته می‌باشد. در نتیجه باید هنگام مدل سازی، نوع تابع انتقال با توجه به شرایط توسعه مدل (محدوده ذرات به کار رفته، شرایط هیدرولیکی جریان و همچنین مشخصات هندسی رود) انتخاب تا از نتایج غلط و دور از واقعیت اجتناب گردد.

جدول (۲)- خلاصه‌ای بر عمده ترین معادلات انتقال رسوب در مدل HEC-RAS

معادله انتقال رسوب	سال	نحوه استخراج	دانه بندی	توضیحات
ایکسر - وایت ^{۱۵}	۱۹۷۳	آزمایشگاهی	ماسه - شن	رسوبات معلق تابعی از سرعت برشی و بار بستر تابعی از تنش برشی است.

^{۱۵}Ackers & White

انگلند - هانسن ^{۱۶}	۱۹۶۷	آزمایشگاهی	ماسه	برای رودخانه‌های ماسه‌ای که دارای بار معلق قابل هستند موفق بوده است.
لارسن - کوپلند ^{۱۷}	۱۹۸۹۱	آزمایشگاهی - صحرایی	سیلت - شن	در دانه‌بندی ریز موفق بوده است.
مایر - پیتر و مولر ^{۱۸}	۱۹۸۴	آزمایشگاهی	ماسه - شن	در دانه‌بندی شن موفق بوده است.
توفالیتی ^{۱۹}	۱۹۶۸	آزمایشگاهی - صحرایی	ماسه	محاسبه ستون‌های عمودی غلظت - موفق در رودخانه‌های بزرگ
یانگ ^{۲۰}	۱۹۷۳-۸۴	آزمایشگاهی - صحرایی	ماسه - شن	به سرعت جریان و سرعت سقوط حساس است.
ویل کاک ^{۲۱}	۲۰۰۱-۰۳	آزمایشگاهی - صحرایی	ماسه - شن	توانایی حمل رسوبات با افزایش مقدار ماسه زیاد می‌شود.

واسنجی^{۲۲} مدل

واسنجی مدل در طی دو مرحله مجزا انجام شد. در مرحله اول مدل هیدرولیکی مورد واسنجی قرار می‌گیرد به‌طوری‌که تراز سطح آب در حالت مشاهداتی و شبیه‌سازی در ایستگاه کیاکلا واقع در پایین‌دست بازه‌های مکانی مطالعاتی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در مرحله دوم نیز با استفاده از مدل رسوبی ارائه شده در جدول (۲)، الگوی رسوب‌گذاری در محدوده مطالعاتی مورد واسنجی قرار گرفت و به‌منظور ارزیابی هیدرولیکی نتایج مدل، رفتار مدل با رفتار مشاهده‌ای مقایسه شد. برای انجام هرگونه آنالیز رسوب روی رودخانه براساس پیشینه تحقیق صورت گرفته دستکم برای مطالعه پیشرو، لازم است بهترین رابطه انتقال رسوب که توانایی پیش‌بینی دقیقی از شرایط طبیعی رودخانه دارد، تعیین شود. یکی از متغیرهایی که صحت‌سنجی آن بررسی شد و در تحلیل نتایج این تحقیق از اهمیت بسیار زیادی نیز برخوردار است، تراز سطح آب و چگونگی تغییرات آن در دوره شبیه‌سازی می‌باشد. نرم‌افزار HEC-RAS توانایی شبیه‌سازی جریان‌های حاوی بار رسوبی را از طریق هفت معادله انتقال رسوب ارائه می‌دهد. هر یک از معادلات انتقال رسوب با رابطه منحنی سنج منطقه، مقایسه می‌شود و در نهایت معادله‌ای که بیشترین همپوشانی را با آن دارد به‌عنوان بهترین رابطه رسوبی انتخاب می‌گردد. بر همین اساس پارامتر تراز سطح آب شبیه‌سازی در طی سال‌های آماری ۱۴۰۰-۱۳۹۵ با تراز سطح آب ثبت شده مورد ارزیابی قرار گرفت تا بتوان چگونگی رفتار مدل را نسبت به شرایط مرجع سنجید.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و ارزیابی مدل

نتایج شبیه‌سازی مطابق با شکل (۹) نشان داد در همه دبی‌های عبوری از رودخانه، مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی و شبیه‌سازی به هم نزدیک بوده، به‌طوری‌که R^2 آن ۰/۷۴ گزارش شده است. همچنین مقادیر RMSE نیز ناچیز و برابر با ۰/۴ متر و nRMSE نیز ۱۸ درصد محاسبه گردید که این مقدار در مقایسه با خطای اندازه‌گیری ناشی از عدم دقت در برداشت اطلاعات قابل چشم‌پوشی است.

^{۱۶}Engelund & Hansen

^{۱۷}Laursen

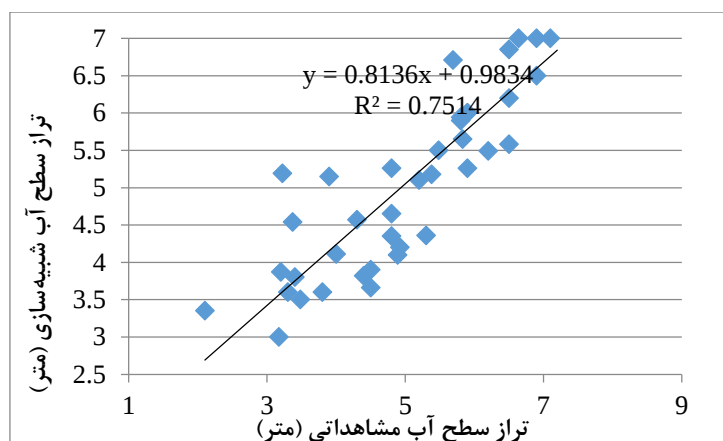
^{۱۸}Meyer-Peter & Muller

^{۱۹}Toffaletti

^{۲۰}Yang

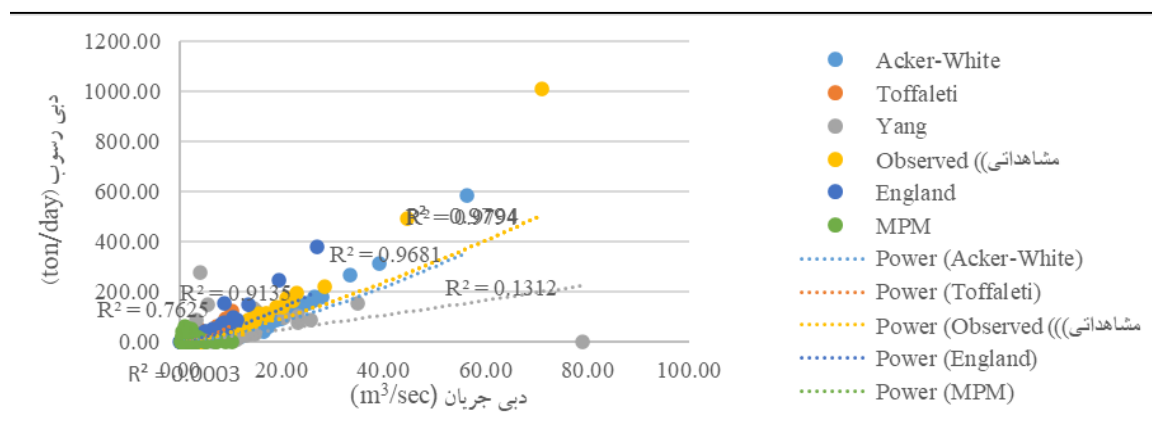
^{۲۱}Wilcock

^{۲۲} Calibration



شکل (۹). نمودار یک به یک مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده

برای واسنجی بخش رسوب مدل HEC-RAS نتایج هر یک از معادلات انتقال رسوب با شرایط طبیعی منطقه مقایسه شد. برای این کار از داده های دبی- رسوب در طی سال های ۱۴۰۰-۱۳۹۵ بهره گرفته شد. بر همین اساس مدل برای سال ۱۳۹۵ مورد واسنجی قرار گرفت و در ادامه مدل برای سال های ۱۴۰۰-۱۳۹۵ ارزیابی شد. در نهایت معادله توفالیتی که با RMSE برابر با ۹۷ تن در روز و R^2 برابر با ۰/۹۷ بیشترین همپوشانی را با شرایط طبیعی منطقه داشت که به عنوان بهترین رابطه رسوب در محدوده مطالعاتی انتخاب گردید. از این میان، توابع ایکرز- وایت، ویلکاک و لارسن کمترین میزان R^2 را داشتند که نشان می دهد مقادیر شبیه سازی شده با این توابع، همپوشانی کمی با مقادیر واقعی دارد. دلیل این امر را می توان در این حقیقت اساسی دنبال نمود که این دو رابطه بیشتر برای شرایط آزمایشگاهی و فلوام آن توصیه می شود و برای شرایط صحرایی نظیر آنچه در این پژوهش شاهد حاکم است، کارایی کمتری دارد. از سویی دیگر، بعد از رابطه توفالیتی، توابعی نظیر اینگلند و یانگ با داشتن ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۷۶ در محدوده مورد مطالعه رتبه دوم و سوم R^2 را شامل می شوند. نتایج واسنجی و ارزیابی روابط انتقال رسوب در شکل (۱۰) و جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۱۰). نتایج رسم توابع توانی هفت معادله انتقال رسوب و مقایسه با نتایج دبی- رسوب ایستگاه کیاکلا

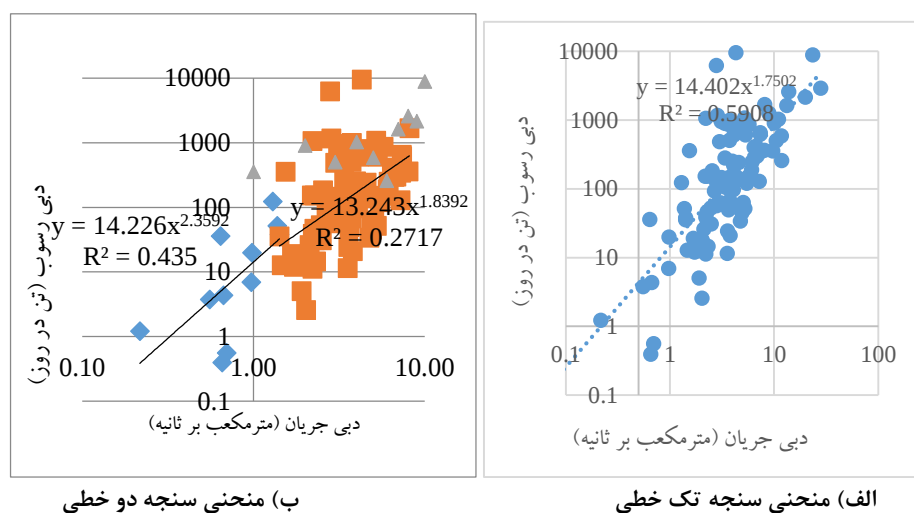
جدول (۳). نتایج شاخص های آماری از هفت معادله انتقال رسوب در مدل HEC-RAS

MPM	Ackers-White	Yang	Wilcock	England	Laursen	Toffaleti	شاخص های آماری
17.6	23.75	61.71	67.68	12.35	180.62	96.69	RMSE (t/d)
559.47	80.77	214.37	1271.9	443.53	-1294.63	584.24	nRMSE
1	0.96	0.84	23.52	0.78	167.49	47.99	EF (%)

-20.77	5.28	2.1	1.03	3.56	20.23	-10.15	MAE (%)
۰/۱۳	-	۰/۷۶	-	۰/۹۱	-	۰/۹۷	R ²

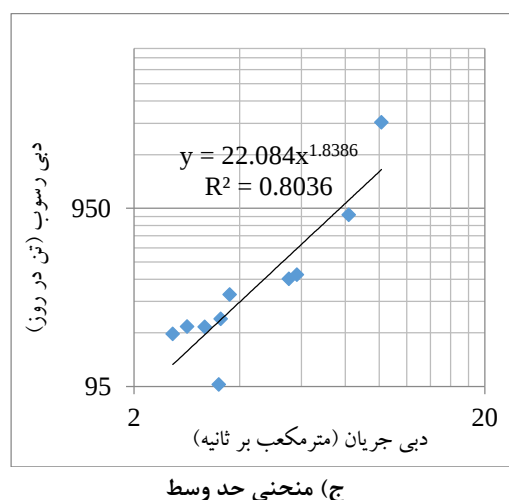
انتخاب بهترین تابع برازش منحنی سنج رسوب

منحنی سنج رسوب به ازای آمار ۵ ساله ایستگاه شیرگاه تحت روش‌های منحنی سنج تک خطی، منحنی سنج دو خطی و منحنی حد وسط مورد آنالیز قرار گرفت. مطابق با شکل (۱۱)، ج، بالاترین R^2 برای داده‌های دبی- رسوب ایستگاه شیرگاه تحت منحنی حد وسط است که ۰/۸۵ به دست آمد که مبنای محاسبات قرار گرفت. معادله توانی آن، $Y = ۲۲/۸ X^{1.8}$ می‌باشد که در آن X به صورت دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه و Y به صورت رسوب برحسب تن در روز است.



(ب) منحنی سنج دو خطی

(الف) منحنی سنج تک خطی



(ج) منحنی حد وسط

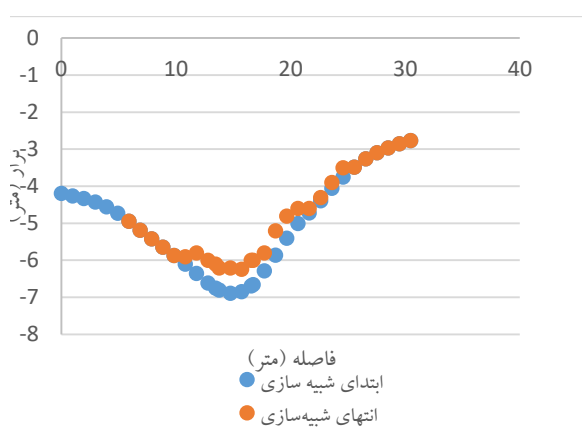
شکل (۱۱). نتایج انتخاب منحنی سنج رسوب براساس معادلات یک به یک در ایستگاه شیرگاه

نتایج شبیه‌سازی رسوب با استفاده از مدل HEC-RAS

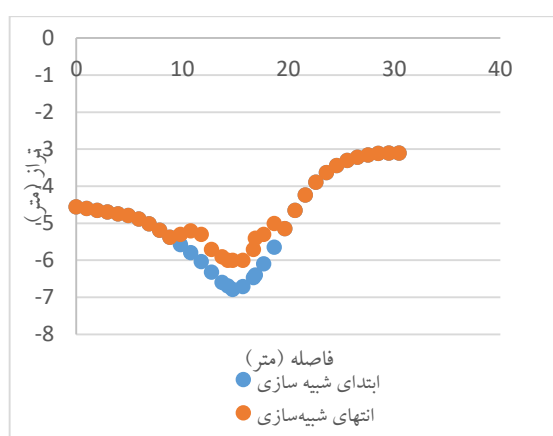
پس از وارد کردن اطلاعات مورد نیاز به مدل HEC RAS و تعیین بهترین رابطه انتقال رسوب، مدل برای بازه زمانی ۵ ساله اجرا گردید و تغییرات هیدرولیک و مقاطع مورد بررسی قرار گرفت.

تغییرات مقاطع در سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰

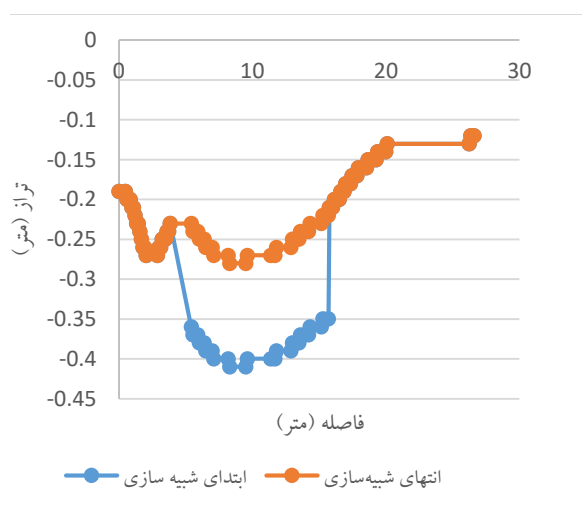
در این پژوهش الگوی رسوب گذاری ۵ بازه مکانی از رودخانه تالار در محدوده شهر کیاکلا، مورد بررسی قرار گرفت. ۵۱ مقطع مربوط به بازه مکانی اول، ۳۱ مقطع مربوط به بازه مکانی دوم، ۹ مقطع مربوط به بازه مکانی سوم، ۱۰ مقطع مربوط به بازه مکانی چهارم و ۶۳ مقطع مربوط به بازه مکانی آخر می باشد. با بررسی مقاطع در بالادست رودخانه و مقایسه تغییرات عمق بین سال های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ می توان به این نتیجه رسید که در بازه مکانی اول، اکثریت ۷۰ درصدی مقاطع، تراز بستر به مقدار قابل توجهی افزایش یافته که هر چه به سمت پایین دست امتداد یابد، این افزایش بیشتر می شود (شکل (۱۲)، الف تا د). در بازه مکانی دوم، سوم و چهارم فرسایش به مقدار کم رخ داده و نمودار رسوب گذاری ابتدا و انتهای دوره شبیه سازی بر هم منطبق هستند. این مسئله مؤید این حقیقت است که رودخانه در حالت تعادل قرار دارد و پیشنهاد می شود برداشت از آن صورت نگیرد (شکل (۱۲)، ذ تا س). در پایین دست بازه مکانی پنجم، تراز بستر به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است که به سمت پایین دست این کاهش بیشتر می شود. در این محدوده از رودخانه به دلیل افزایش شیب و سرعت آب، مواد رسوبی حمل شده از بالادست فرسایش می شوند شکل (۱۲)، ش تا ع.



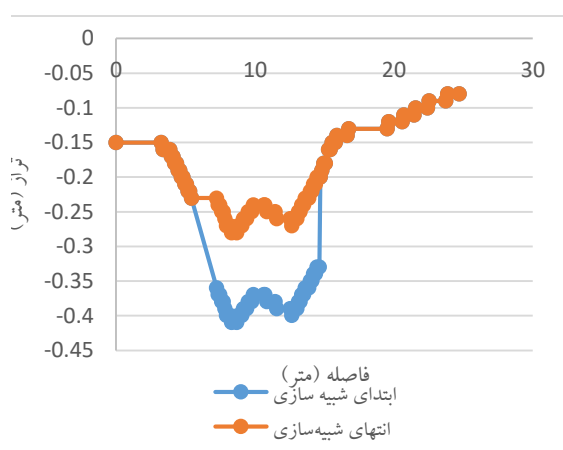
ب) الگوی رسوب گذاری در مقطع شماره ۱۴ از بازه مکانی اول



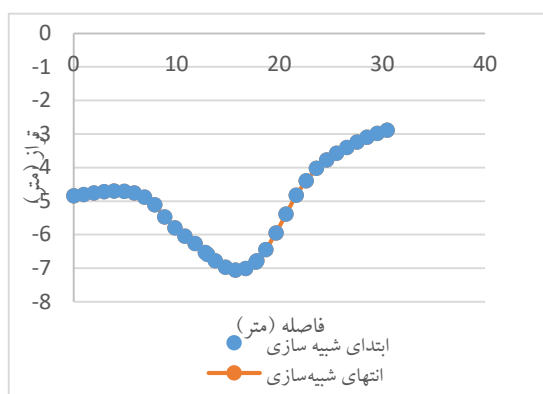
الف) الگوی رسوب گذاری در مقطع شماره ۱۳ از بازه مکانی اول



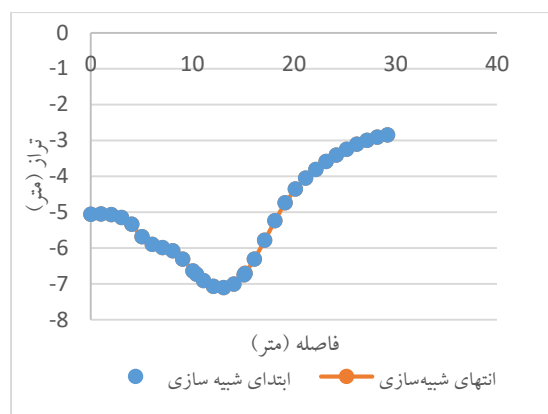
د) الگوی رسوب گذاری در مقطع شماره ۲۸ از بازه مکانی اول



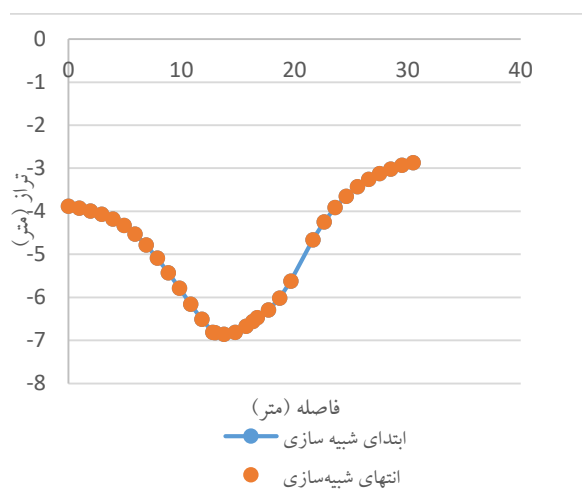
ج) الگوی رسوب گذاری در مقطع شماره ۲۷ از بازه مکانی اول



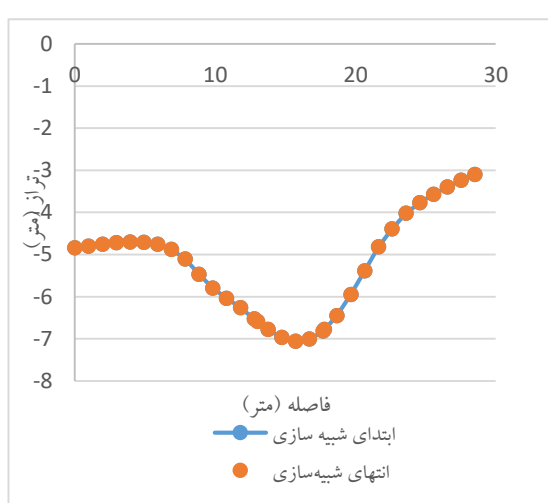
ر) الگوی تعادلی در مقطع شماره ۶۱ از بازه مکانی دوم



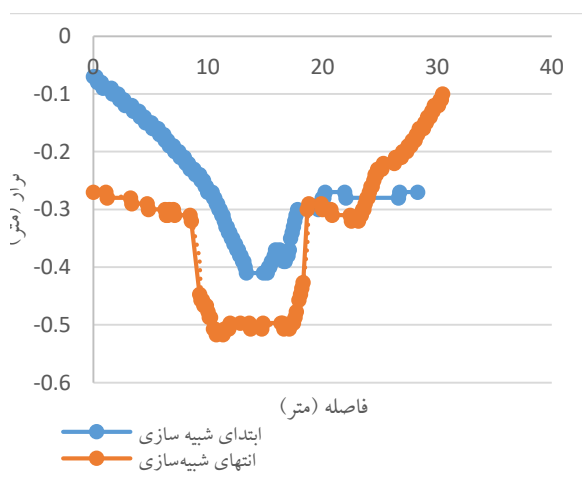
ذ) الگوی تعادلی در مقطع شماره ۶۰ از بازه مکانی دوم



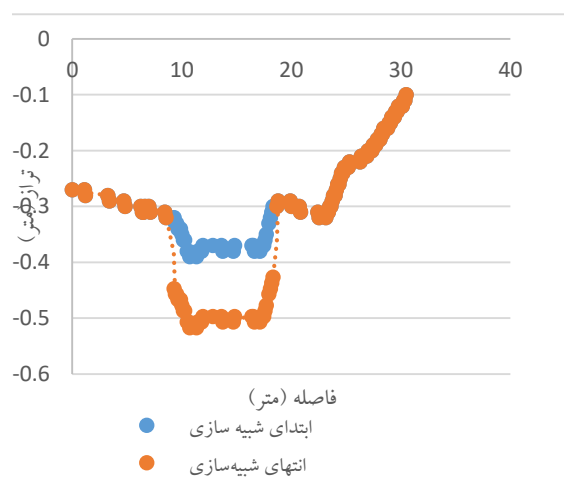
س) الگوی تعادلی در مقطع شماره ۹۰ از بازه مکانی چهارم



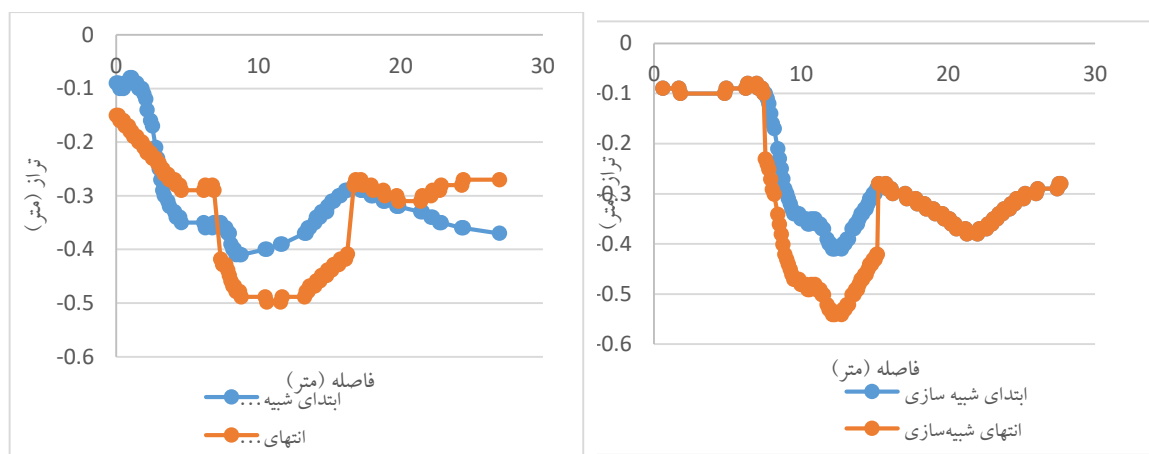
ز) الگوی تعادلی در مقطع شماره ۸۰ از بازه مکانی سوم



ص) الگوی فرسایش در مقطع شماره ۱۴۶ از بازه مکانی پنجم



ش) الگوی فرسایش در مقطع شماره ۱۴۵ از بازه مکانی پنجم

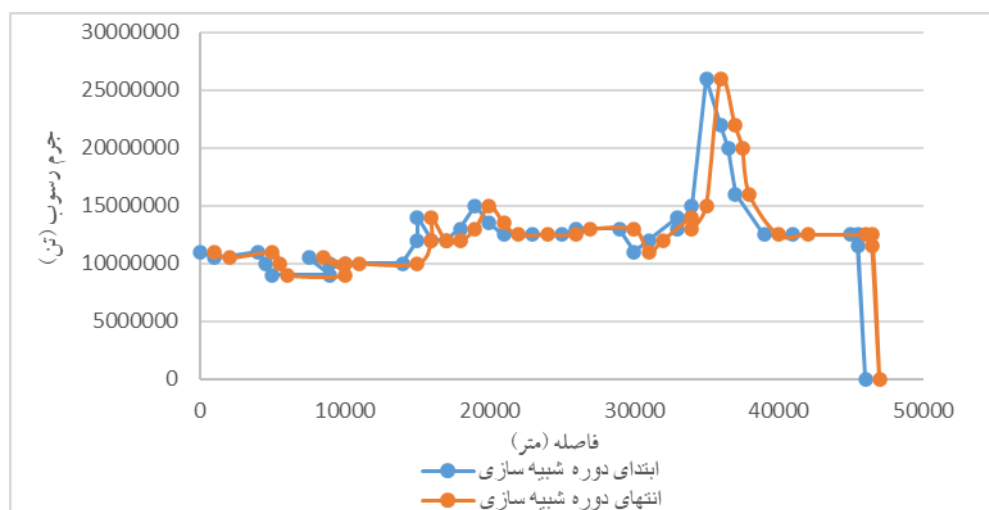


ع) الگوی فرسایش در مقطع شماره ۱۴۸ از بازه مکانی
فرسایش

ض) الگوی فرسایش در مقطع شماره ۱۴۷ از بازه مکانی
فرسایش

شکل (۱۲). الگوی فرسایش و رسوب گذاری در مقاطع مختلف بازه های مکانی مورد مطالعه

شکل (۱۲) میزان فرسایش و رسوب گذاری را در هر مقطع برحسب تن نشان می دهد. با بررسی روند تغییرات رسوب گذاری در بازه مکانی مورد مطالعه از رودخانه می توان محدوده برداشت رسوبات را مشخص نمود. در قسمت قابل توجهی از بازه های مکانی مورد مطالعه رودخانه تالار در مقاطع مختلف، فرسایش و رسوب گذاری به طور متناوب تکرار شده است. در بازه مکانی ابتدایی مورد مطالعه میزان رسوب گذاری در این مقاطع بیشتر از فرسایش است و جهت برداشت رسوب با لحاظ سایر موارد محیط زیستی و اقتصادی می تواند مناسب باشند. در بازه های مکانی میانی رودخانه به علت کاهش شیب و عریض شدن رودخانه، رودخانه حالت تعادلی دارد و این بخش جهت برداشت رسوبات توصیه نمی شود. در بازه مکانی انتهایی نیز، به دلیل افزایش ناگهانی شیب و کاهش عرض رودخانه و پیچان رودی شدن آن، رودخانه حالت فرسایشی یافته است و این بخش نیز برای برداشت مصالح مناسب به نظر نمی رسد. روی هم رفته می توان چنین استنباط نمود ظرفیت حمل رودخانه از بالادست به سمت پایین دست کاهش می یابد.



شکل (۱۳). وزن تجمع رسوبات ورودی و خروجی مقاطع مختلف

مجموع رسوب ورودی رودخانه در کل بازه مکانی شبیه سازی در ابتدای دوره از مجموع رسوب در انتهای دوره شبیه سازی کمتر است که تفاوت بین آن ها، ۰/۹ میلیون تن می باشد که نشان دهنده این است که رودخانه در اکثر مواقع به صورت فرسایش پذیر بوده است (شکل (۱۳)). با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی مدل HEC-RAS حجم متوسط رسوب

خروجی از مقاطع مختلف رودخانه، میزان تغییرات در تراز کف هر یک از مقاطع و عمق مجاز برداشت مصالح شن و ماسه در بازه‌های مکانی مختلف قابل تعیین است. در بازه مکانی اول که از کیلومتر ۲۴/۷ از دریا تا کیلومتر ۲۲/۴ از دریا است، متوسط ارتفاع رسوب ۱۱ سانتی‌متر بوده و میزان رسوب‌گذاری حدود تقریباً ۶ میلیون تن می‌باشد. در این بازه مکانی میزان رسوب‌گذاری قابل توجه می‌باشد. در بازه مکانی دوم که از کیلومتر ۲۰/۵ از دریا تا کیلومتر ۱۸/۲ از دریا می‌باشد، طول بازه مکانی حدود ۳ کیلومتر بوده و میزان رسوب‌گذاری تقریباً ۱ میلیون تن می‌باشد. در بازه مکانی سوم روندی کم‌وبیش مشابه وجود دارد. در بازه مکانی چهارم شرایط از نظر عمق و حجم فرسایش برای برداشت مناسب نیست و این محدوده نیز به میزان قابل توجهی با فرسایش مواجه است. بازه مکانی پنجم که از کیلومتر ۱۶/۷۵ از دریا تا کیلومتر ۱۱/۵ از دریا ادامه دارد، میزان فرسایش به‌طور تقریبی ۸/۳ میلیون تن به دست آمده است. دامنه تغییر ارتفاع فرسایش در بازه مکانی پنجم از ۱۰ الی ۲۰ سانتیمتر متغیر است. در چنین شرایطی امکان برداشت رسوب در آن وجود ندارد بلکه بایستی به راهکارهای مدیریت سیلاب و مهندسی رودخانه اندیشید. از سویی دیگر نتایج مربوط به میزان فرسایش و رسوب‌گذاری هر کدام از مقاطع و همین‌طور طول رودخانه تالار نشان می‌دهد اگرچه ممکن است رسوب قابل توجهی برای برداشت وجود داشته باشد اما بازدهی‌های میدانی نشان می‌دهد میزان برداشت بسیار بیشتر از این مقدار بوده و این مسئله خسارات زیادی را به دنبال داشته است.

جدول (۴). وزن و عمق رسوبات ته‌نشین شده

میزان بار بستر در مقطع (تن)	مجموع بار رسوبی خارج شده (تن)	کیلومتر از دریا	بازه مکانی
۶۲۹۱۱۰۰	۳۰۸۴۰۸۰	۲۴/۷ - ۲۲/۴	۱
۱۳۶۳۳۷۰	۳۳۴۵۹۵	۲۰/۵ - ۱۸/۲	۲
۱۰۹۵۸۳	-۱۰۱۲۲۷	۱۸/۰ - ۱۷/۵	۳
۱۱۹۶۷	-۲۰۴۶۶	۱۷/۵ - ۱۶/۷۵	۴
۸۲۵۶۳۰۰	-۳۲۸۷۱۸	۱۶/۷۵ - ۱۱/۵	۵

نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج هر یک از معادلات انتقال رسوب با شرایط طبیعی منطقه نشان داد که معادله توفالتی با RMSE برابر با ۹۷ تن در روز و R^2 برابر با ۰/۹۷ بیشترین همپوشانی را با شرایط طبیعی منطقه داشت و به‌عنوان بهترین رابطه رسوب انتخاب گردید. همچنین داده‌های دبی - رسوب ایستگاه شیرگاه تحت منحنی حد وسط با R^2 ، ۰/۸۵ مطابق معادله توانی $X^{1.8}$ ۲۲/۸ $Y =$ به دست آمد. همچنین با بررسی مقاطع در بالادست رودخانه و مقایسه تغییرات عمق بین سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ چنین استنباط می‌شود در بازه مکانی اول، تراز بستر به مقدار قابل توجهی افزایش یافته که هر چه به سمت پایین دست امتداد یابد، این افزایش بیشتر می‌شود. در بازه مکانی دوم، سوم و چهارم فرسایش به مقدار کم رخ داده و نمودار رسوب‌گذاری ابتدا و انتهای دوره شبیه‌سازی بر هم منطبق هستند. در بازه مکانی پنجم، در پایین دست بازه مکانی مورد مطالعه تراز بستر به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است که به سمت پایین دست این کاهش بیشتر می‌شود. در این محدوده از رودخانه به دلیل افزایش شیب و سرعت آب، مواد رسوبی حمل شده از بالادست فرسایش می‌شوند. بر همین اساس پیشنهاد می‌گردد در بازه مکانی ابتدایی با لحاظ سایر موارد محیط زیستی و اقتصادی و اجتماعی به برداشت رسوبات اقدام شود. ولی در سایر بازه‌های مکانی به دلیل افزایش ناگهانی شیب و کاهش عرض رودخانه و پیچان رودی شدن آن، رودخانه حالت فرسایشی داشته و این بخش نیز برای برداشت مصالح مناسب به نظر نمی‌رسد و در واقع ظرفیت حمل رودخانه از بالادست به سمت پایین دست کاهش می‌یابد که با نتایج اسدی و همکاران (۱۳۹۶) و کیوانلو (۱۳۹۳) همخوانی دارد.

منابع

- اسدی، فاطمه زهرا؛ فضل اولی، رامین؛ و عمادی، علیرضا (۱۳۹۶). بررسی تغییرات بستر رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS4.0 (مطالعه موردی: رودخانه تالار). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸(۱۵)، ۲۵-۳۵.
<https://sid.ir/paper/230370/fa>
- امامقلی زاده، صمد؛ شیردل، سولماز؛ گنجویان، محمدعلی؛ محمدیون محمد؛ فتحی مقدم، منوچهر (۱۳۸۹). بررسی وضعیت فرسایش و رسوب گذاری رودخانه شیرین دره با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS. فصلنامه مهندسی آب، ۱(۱)، ۱۹-۳۴.
- جباری، آزاده؛ حسینی، سید احمد؛ حقی آبی، امیرحمزه؛ امام قلی زاده، صمد؛ و بهنیا، عبدالکریم. (۱۳۹۳). برآورد دبی انتقال رسوب رودخانه با استفاده از مدل ریاضی HEC-RAS. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۴(۱۶)، ۱۲-۲۳.
<https://sid.ir/paper/247203/fa>
- رضایی، پرویز. (۱۳۹۷). تعیین پهنه سیل گیر با استفاده از GIS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه گوهررود در محدوده شهر رشت). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۷(۲۷)، ۴۱-۵۶.
<https://sid.ir/paper/226669/fa>
- روشان، حسین؛ وهاب زاده، قربان؛ سلیمانی، کریم؛ و فرهادی، رسول. (۱۳۹۲). شبیه سازی رفتار هیدرولیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS در محیط GIS (مطالعه موردی: رودخانه بشار، استان کهگیلویه و بویراحمد). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۴(۷)، ۷۰-۸۴.
<https://sid.ir/paper/230251/fa>
- ریاحی مدوار، حسین؛ فکوری، بهمن. (۱۴۰۰). تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل HEC-RAS در شبیه سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان رودخانه کارون با رویکرد مونت کارلو. هیدرولیک، ۱۶(۱)، ۱-۲۲.
<https://sid.ir/paper/966224/fa>
- زراعتکار، زهرا؛ و حسن پور، فرزاد. (۱۳۹۵). شبیه سازی سیلاب شهری بیرجند با استفاده از مدل HEC-RAS و ARC-GIS. پژوهش های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۲۹(۱۱۲)، ۴۱-۵۶.
<https://sid.ir/paper/200504/fa>
- شفیعی مطلق، خسرو؛ و عبادتی، ناصر. (۱۳۹۹). پهنه بندی سیلاب و شبیه سازی رفتار هیدرولیک رودخانه با استفاده از نرم افزار HEC RAS (مطالعه موردی: رودخانه ی مارون-جنوب غرب ایران). اکوهیدرولوژی، ۷(۲)، ۳۹۷-۴۰۹.
<https://sid.ir/paper/361673/fa>
- شیخ علیشاهی، نجمه؛ جمالی، علی اکبر؛ و حسن زاده نفوتی، محمد. (۱۳۹۵). پهنه بندی سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی تحلیل رودخانه (مطالعه موردی: حوضه آبریز منشاد- استان یزد). فضای جغرافیایی، ۱۶(۵۳)، ۷۷-۹۶.
<https://sid.ir/paper/356882/fa>
- ظهوری، جواد؛ آشاور، مهران. (۱۴۰۰). کارایی HEC-RAS و GIS در شبیه سازی یک بعدی هیدرودینامیک جریان در رودخانه. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۵(۲)، ۶۳-۷۲.
https://journals.tabrizu.ac.ir/article_9090.html
- عرفانی پور قاسمی، وجیهه؛ دستورانی، محمدتقی؛ حاجی بیگلر، محبوبه (۱۳۹۸). بررسی تأثیر خصوصیات جریان در فرسایش کناره های رودخانه (مطالعه موردی: بخش هایی از رودخانه کشف رود). چهاردهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. آبخیزداری و مدیریت جامع منابع آب و خاک. chrome-extension://efaidnbmnmmnibpccjpcglclefindmkaj/https://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1075389.pdf
- کیوانلو، مجتبی. (۱۳۹۲). ارزیابی اثرات برداشت شن و ماسه بر خصوصیات هیدرولیکی و سازه های انتقال با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: رودخانه تالار). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
- گودرزی، احمد؛ یونسی، حجت اله؛ شاهینژاد، بابک؛ ترابی پوده، حسین. (۱۴۰۱). مدل سازی عددی انتقال رسوب و فرسایش کنار رودخانه ای در شرایط سیلابی مطالعه موردی: حوضه ی آبریز کشکان. هیدروژئومورفولوژی، ۳۱(۹)، ۱۵۷-۱۳۷.
- محمدی، میرعلی؛ مهندی، مهسا. (۱۴۰۱). شبیه سازی هیدرولیکی سیمینه رود با بهره گیری از نرم افزار Hec-RAS و ArcGis. هیدروژئومورفولوژی، ۳(۹)، ۸۷-۱۰۳.
https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_14323.html

- مرادی نژاد، امیر؛ حق یابی، امیرحمزه؛ ترابی، حسن. (۱۳۹۳). انتخاب مناسب‌ترین معادلات انتقال رسوب با مدل عددی HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه قره چای استان مرکزی). پژوهش‌های آبخیزداری، ۱۰۴، ۱۲۳-۱۳۱.
- مرادی، ابودر، سیدیان، سید مرتضی، کاهه، مهدی و حشمت پور، علی. (۱۳۹۷). مکان‌یابی برداشت مصالح رودخانه‌ای با استفاده از مدل HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه قورچای استان گلستان). مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۹ (۳۳)، ۷۶-۸۸. <https://sid.ir/paper/247233/fa>
- مطلبیان، محمد. ۱۳۹۲. ساماندهی تراز بستر با استفاده از مدل HEC-RAS در رودخانه سیستان. پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های آبی. دانشگاه زابل.
- مهرورزلی، ارسلان؛ مددی، عقیل؛ اسفندیاری، فریبا؛ رحیمی مسعود. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی سیلاب‌های رودخانه دره ائورت با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS (محدوده مورد مطالعه: از روستای شورستان تا تلاقی رودخانه ارس). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸ (۴)، ۱۴۶-۱۳. https://www.geomorphologyjournal.ir/article_106426.html
- مولودی، مریم؛ و محمدی، میرعلی. (۱۴۰۰). تعیین ضریب مقاومت جریان در رودخانه‌ها با بستر شنی (مطالعه موردی: رودخانه شهرچای-ارومیه). دانش آب‌و خاک (دانش کشاورزی)، ۳۱ (۴)، ۳۸-۲۵. <https://sid.ir/paper/961464/fa>
- یمانی، مجتبی؛ تورانی، مریم؛ و چزغه، سمیرا. (۱۳۹۱). تعیین پهنه‌های سیل گیر با استفاده از مدل HEC-RAS (مطالعه موردی: بالادست سد طالقان از پل گلینک تا پل وشته). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱ (۱)، ۱-۱۶. <https://sid.ir/paper/482843/fa>
- Chang, H. (1998), Generalized Computer Program FLUVIAL-12 Mathematical Model for Erodible Channels. Users Manual. 10.4025/actascitechnol.v41i1.39539
- Danish Hydraulic Institute (2003). "Mike11 version 3.01 user manual", https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2021/Water_Resources/Mike_11_ref.pdf
- Gibson S., Comport B., Corum Z. (2017). Calibrating a Sediment Transport Model through a Gravel-Sand Transition: Avoiding Equifinality Errors in HEC-RAS Models of the Puyallup and White Rivers. U.S. Army Corps of Engineers. 10.1061/9780784480625.017
- Joshi Neekita, Lamichhane Gaurav Raj, Mafuzur Rahaman Md., Kalra Ajay, Ahmad Sajjad. (2019). Application of HEC-RAS to Study the Sediment Transport Characteristics of Maumee - River in Ohio Southern Illinois Univ. 10.1061/9780784482353.024
- Krishnappan, B.G. (1981). "programming for MOBED, an unsteady, nonuniform, mobile boundary flow model, ", Canada center for Inland waters, 107p.
- Mohammad M. E., Al-Ansari N., Issa, I. E., and Knutsson S. (2016). Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. Lakes and Reservoirs: Research and Management: 21: 235-244. 10.1111/lre.12142
- Olsen N.R.B. (1993). SSIIM - a three-dimensional numerical model for simulation of water and sediment flow. Transactions on Ecology and the Environment vol 8, © 1994 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3541. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/HY94/HY94027FU2.pdf>
- U.S. Army corps of Engineera, (1982). "Hec6 Users Manual". <https://www.scribd.com/document/318091722/HEC-RAS-5-0-Reference-Manual>
- U.S. Army corps of Engineers, (1989), "sedimentation Investigation of Rivers. And Reservoirs, code: EM 1110-2-4000, PP 6.1-6.13. <https://dots.el.erdc.dren.mil/guidance/sedimentation-investigations-of-rivers-and-reservoirs.pdf>

U.S. Department of Interior, (1998), "User manual for GSTARS2.0 ",Colorado.
https://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/7thFISC/7Fisc-V1/7FISC1-1.pdf