

Research Paper

Calibration of Hydraulic Flow and Sediment of Quasi-Two-Dimensional Model of Shiono and Knight in Zaremrood River

Morteza Nabizadeh Valukulaei.¹, Abdolreza Zahiri.^{2*}, Amir Ahmad Dehghani.³, Mahdi Mefta.⁴

¹ PhD, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

² Associated Prof., Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

³ Prof., Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

⁴ Associated Prof., Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran



10.22125/IWE.2023.173241

Received:
December 28, 2021
Accepted:
April 27, 2022
Available online:
June 25, 2023

Keywords:
Suspended Load
Empirical Relationships,
Total load, Quasi two-
dimensional Modeling,
Shiono and Knight
Model, Zaremrood river

Abstract

In this study, the calculation of hydraulic flow and sediment (suspended load and total load) of Zaremrood river located in Mazandaran province has been investigated using Shiono and Knight quasi-two-dimensional model. This model is based on the Navier-Stokes continuity and momentum equations and is simplified by depth averaged concept. For this purpose, using the finite element method, this model was solved numerically and the lateral velocity distribution were calibrated at the Garmrood hydrometric station. Comparison of obtained results by Shiono and Knight model in different flow discharges against measured data indicates the high accuracy of the model for lateral velocity distribution. Afterward, by using the computed lateral velocity distribution, the distribution of suspended load and total load across the river was simulated. The results showed that among the 5 empirical suspended load equations selected in this study, the Einstein formula (1950) has the best accuracy in both one and quasi-two-dimensional modeling cases. This relationship in one-dimensional state with standard deviation of discrepancy ratio of 0.56% has a higher accuracy than the Rouse (1937) and Brooks (1963) sedimentary relations with a standard deviation of 0.52% and 2.47%, respectively. Finally, among the 5 experimental relationships of the total load studied, Meyer-Peter-Muller (1973), Ackers-White (1973) and Engelund-Hansen (1967) sedimentary relationships with discrepancy ratios of 66.67, 41.67 and 16.67, respectively presented the best results in one-dimensional mode, and the accuracy of all three methods was better in two-dimensional mode than in one-dimensional mode. Finally, it was found that the accuracy of suspended load and total load modeling in quasi-two-dimensional mode is more than one-dimensional, which shows the high impact of Shiono and Knight model in simulation of hydraulic flow and sediment.

* **Corresponding Author:** Abdolreza Zahiri

Address: Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran,

Email: zahiri@gau.ac.ir

Tel: 017-32426436

1. Introduction

In all previous studies, the finite difference method has been selected for numerical solution of Shiono and Knight model. Also, the accuracy of the total sediment load predictions by one-dimensional and quasi-two-dimensional models has not been compared. In this paper, finite element method is used for numerical solution of this model and the results of one-dimensional and quasi-two-dimensional modeling of bed load, suspended load and total load in Zaremruod river (one of the main branches of Tajan river located in Sari city) have been compared. In addition, the simulation of the transverse distribution of suspended load in a river is evaluated for the first time with a quasi-two-dimensional model of Shiono and Knight.

2. Materials and Methods

By depth integration of the Navier-Stokes equation under steady and uniform flow conditions, the following differential equation is proposed to solve the transverse velocity distribution of flow in straight rivers:

$$\rho g H S_{0x} - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s_{0y}^2}} + \frac{d}{dy} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{du_d}{dy} \right\} = \beta_s \rho g H S_{0x}$$

To use the finite element method, the river top width is first divided into several small intervals or sections, and each interval is considered as a computational node. It is then assumed that all the coefficients of the equation depend only on the transverse distance y . In this case, by following variable changing, the governing nonlinear differential equation will become a linear equation:

$$U(y) = u_d^2(y) - \rho \frac{f}{8} U(y) \sqrt{1 + \left(\frac{dZ_b}{dy} \right)^2} + \frac{d}{dy} \left(\frac{\rho}{2} \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \frac{dU(y)}{dy} \right) = (\beta_s - 1) \rho g H S_{0x}$$

3. Results

In this paper, using the empirical sediment transport formulas of different researchers, the bed load, suspended load and the total load of Zaremruod river at Garmrud hydrometric station were calculated (one-dimensional mode). The results showed that for estimating the suspended load of the river, the relationships of Einstein, Rouse and Brooks are more accurate and have been selected as the best formulas. For estimating the bed load, the Duboy relationship had the best accuracy with respect to the measured values. The Frijlink, and Meyer-Peter and Mueller empirical relationships were selected as the second and third highest relationships for bed load estimation. Similarly, for estimating the total sediment load, the Meyer-Peter and Mueller, Ackers-White, and Engelund-Hansen relationships were selected as the best relationships. In the second phase of this research, to improve the accuracy of sediment calculations in all three modes of sediment transport (suspended load, bed load and total load), quasi-two-dimensional modeling of sediment transport in Zarmorud River was considered. At first, the river top width was divided into about 10 to 20 small intervals, and then the flow velocities in each interval or computational node were calculated using the quasi-two-dimensional mathematical model of Shiono and Knight. By placing the values of flow velocities in each node into sediment transport formulas, suspended load, bed load and as well as total load were calculated for each node and then by lateral integration of obtained values of sediment concentrations, total suspended load, bed load and total load were estimated. It was interesting to note that in almost all three types of sediment transport modes, the accuracy of the calculations in the quasi-two-dimensional manner was significantly higher than the one-dimensional case. For example, in a flood flow dated 22/7/1391 (with a water surface level of 128cm, a flow rate of 104.25 m³/s and a total sediment load of about 3800 kg/s), the total load estimated by the Engelund-Hansen formula was obtained 329 kg/s in the case of one-dimensional model

and about 1637 kg/s for the case of quasi-two-dimensional model, which indicates a significant increase in the accuracy of calculations by two-dimensional model.

4. Discussion and Conclusion

The increase in accuracy of quasi 2D modeling of sediment transport in comparison with 1D model is important and significant in terms of the fact that the highest amount of sediment transport through rivers is generally occurred during floods, and improving the accuracy of river sediment calculations in these conditions, is a great help in more accurate design and implementation of engineering projects and river training schemes. Another important point regarding quasi-two-dimensional models is that in addition to increasing the accuracy of sediment calculations, also allow engineers to estimate changes in sediment concentration across the river, while one-dimensional models lack this capability. By knowing the lateral distribution of sediments in the river, it is possible to identify erodible and stable regions across the river and suggest specific solutions for each case. Also, using this type of models helps engineers to propose suitable locations for the design and construction of hydraulic structures across rivers. In general, the idea of using quasi-two-dimensional models in river flow and sediment transport management has not been fully studied so far, and hence needs more researches in this regard.

5. Six important references

- 1) Bousmar, D. (2002). Flow modelling in compound channels. Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains. Ph.D. dissertation, Univ. Cath. de Louvain, Belgium.
- 2) Haddadchi, A., Omid, M.H., and Dehghani, A.A. (2013). Bedload equation analysis using bed load-material grain size. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(3), 241-249.
- 3) Nabizadeh, M., Zahiri, A., Dehghani, A.A, and Meftah Halaghi, M. (2021). Quasi two-dimensional modeling of flow hydraulics and bed load transport in Zaramrood river, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, (In Farsi).
- 4) Sheikhpour, H., (2014). Measuring the bed load and suspended load of Zalemrood river in Garmrood station and determining their ratio during the water year, Research project of Mazandaran Regional Water Company. (In Farsi)
- 5) Shiono, K. and Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 222: 617-646.
- 6) Zahiri. A. (2018). Simulation of flow and sediment transport in river bends (Case study: Karoun river). *Journal of Irrigation Engineering*, 41(2), 1-17. (In Farsi)

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest

واسنجی هیدرولیک جریان و رسوب مدل ریاضی شبه دوبعدی شیونو و نایت در رودخانه زارمرود

مرتضی نبی زاده^۱، عبدالرضا ظهیری^۲، امیراحمد دهقانی^۳، مهدی مفتاح هلقی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

مقاله پژوهشی

چکیده

در این تحقیق محاسبه دبی جریان و رسوب (بار معلق و بار کل) رودخانه زارمرود در استان مازندران به کمک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل بر مبنای معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر-استوکس بوده و به صورت متوسط در عمق ساده شده است. برای این منظور با استفاده از روش اجزاء محدود، مدل ریاضی مذکور حل عددی شده و پروفیل‌های عرضی سرعت جریان در رودخانه زارمرود در محل ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود واسنجی شد. مقایسه نتایج مدل مذکور در دبی‌های مختلف جریان با داده‌های اندازه‌گیری شده حاکی از دقت بالای مدل در برآورد توزیع عرضی سرعت جریان است. سپس با استفاده از توزیع عرضی سرعت محاسباتی، توزیع عرضی بار معلق و بار کل شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که از میان ۵ رابطه تجربی بار معلق مورد مطالعه، رابطه رسوبی اینشتین (۱۹۵۰) در هر دو حالت مدل‌سازی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی دارای بهترین دقت است. این رابطه در حالت یک‌بعدی با انحراف معیار نسبت ناجوری ۰/۵۶ درصد نسبت به روابط رسوبی راس (۱۹۳۷) و بروکس (۱۹۶۳) به ترتیب با انحراف معیار ۰/۵۲ و ۲/۴۷ درصد از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. در نهایت از میان ۵ رابطه تجربی بار کل مورد مطالعه، روابط رسوبی میر-پیتر و مولر (۱۹۷۳)، ایگرز-وایت (۱۹۷۳) و انگلوند و هانسن (۱۹۶۷) به ترتیب با نسبت ناجوری ۶۶/۶۷، ۴۱/۶۷ و ۱۶/۶۷ بهترین نتایج را در حالت یک بعدی ارائه نمودند که دقت هر سه روش مذکور نیز در حالت دوبعدی بهتر از حالت یک بعدی بوده است. نهایتاً مشخص شد که دقت مدل‌سازی بار معلق و بار کل در حالت شبه‌دوبعدی از یک‌بعدی بیشتر است که نشان دهنده تاثیر بالای مدل شیونو و نایت در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روابط تجربی بار معلق، بار کل، مدل‌سازی شبه‌دوبعدی، مدل شیونو و نایت، رودخانه زارمرود

^۱ دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیکی: nabizade49@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیکی: zahiri@gau.ac.ir

^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیکی: dehghani@gau.ac.ir

^۴ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیکی: meftah@gau.ac.ir



مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت مبانی مهندسی علم هیدرولیک رودخانه‌ها و نیز ارتقاء جنبه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری رایانه‌ها، مدل‌های ریاضی با تحول زیادی همراه شده‌اند. هم‌اکنون مدل‌های ریاضی دوبعدی و سه‌بعدی فراوانی در زمینه هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه‌ها (مثل FLUENT، FLOW3D، CCHE2D، MIKE3) توسعه داده شده و کاربردهای زیادی نیز در حل مسائل مهندسی رودخانه پیدا کرده‌اند (Gessler et al., 1999; Singh and Ghosh, 2000; Chonwattana et al., 2007; Khosronejad et al., 2007; Eslami, 2010; Aybar, 2012; Montaseri and Asiaei, 2014; Lai and Wu, 2019; Omara et al., 2019). تاکنون این مدل‌ها اغلب برای مطالعات آزمایشگاهی و نیز برای بررسی‌های موضعی در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و کاربرد آنها برای رودخانه‌های واقعی با طول زیاد، بسیار محدود بوده است. زمان بسیار طولانی اجرای مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی برای رودخانه‌های عریض و طولانی مهم‌ترین دلیل این محدودیت است. از طرف دیگر، مدل‌های ریاضی یک‌بعدی مثل HEC-RAS، MIKE-11، ISIS و ... رودخانه‌ها را مشابه یک رشته خط فرض نموده و از تغییرات عرضی یا عمقی پارامترهای مهمی مثل سرعت جریان، غلظت رسوب، تنش برشی و ... صرف‌نظر می‌کنند (Nabizadeh et al. 2021). برای برطرف کردن این محدودیت‌ها، محققین مختلفی اقدام به توسعه مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی نموده‌اند. این مدل‌ها تغییرات عمقی پارامترهای هیدرولیکی مثل سرعت، تنش و ... را فقط با یک مقدار متوسط در عمق شبیه‌سازی می‌کنند ولی تغییرات این پارامترها در عرض رودخانه را به صورت کامل در نظر می‌گیرند که با شرایط رودخانه‌های سیلابی کاملاً همخوانی دارد.

از میان مدل‌های شبه‌دوبعدی مختلف، مدل Shiono and Knight (1991) به دلیل دارا بودن دقت قابل قبول در مدل‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب کانال‌ها و رودخانه‌های طبیعی، کاربرد گسترده‌ای داشته است (Unal et al., 2010; Fernandes et al., 2014; Kordi et al., 2015). در این مقاله، از این مدل ریاضی برای شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان و غلظت رسوب معلق و نیز بار کل

رسوب رودخانه زارم‌رود واقع در استان مازندران استفاده شده است.

مطالعات زیادی برای محاسبه نرخ انتقال رسوب رودخانه‌ها (شامل بار معلق، بار بستر و بار کل) صورت گرفته است که حاصل این تلاش‌ها، ارائه معادلات تجربی انتقال رسوب است. این معادلات عموماً دارای فرم رگرسیونی بوده و کاربرد گسترده‌ای در مباحث انتقال رسوب داشته‌اند. با توجه به اینکه این معادلات، یک‌بعدی می‌باشند در هر مقطع عرضی رودخانه فقط یک مقدار برای بار معلق یا بار کل محاسبه می‌کنند در حالی که در رودخانه‌های عریض و یا دارای دشت-های سیلابی، تغییرات بار رسوبی در عرض رودخانه نیز مهم است. (Ackers, 1992; Ayyoubzadeh, 1997). از دلایل این موضوع می‌توان به تغییر شرایط هیدرولیکی و رسوبی رودخانه (مثل عمق جریان، دانه‌بندی رسوب و تنش برشی بستر) در عرض رودخانه اشاره نمود. برای بهبود نتایج محاسبات، می‌توان از تلفیق مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی (مثل مدل شیونو و نایت) و روابط تجربی انتقال بار رسوب معلق و کل استفاده نمود. به این منظور، ابتدا عرض رودخانه به چند زیربازه (مثلاً ۱۰ یا ۲۰) تقسیم شده و با حل مدل ریاضی شبه‌دوبعدی، سرعت جریان و یا تنش برشی بستر در هر زیربازه محاسبه می‌شود. سپس برای هر زیربازه با عمق، سرعت و تنش برشی مشخص، معادله تجربی رسوبی (بار معلق، بار بستر یا بار کل) مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از مجموع دبی‌های رسوب در این زیربازه‌ها، بار رسوب کل رودخانه بدست می‌آید.

تاکنون کاربرد مدل‌های شبه‌دوبعدی برای محاسبه دبی رسوب معلق رودخانه‌ها گزارش نشده است و از این مدل‌ها به صورت محدود برای تخمین بار بستر و بار کل استفاده شده است. چو و لی (۲۰۱۴) به کمک مدل شیونو و نایت، ظرفیت انتقال رسوب کل رودخانه کورنا را برآورد نمودند. Zahiri (2018) از این مدل ریاضی برای برآورد دبی بار کل رسوب رودخانه کارون در چند بازه پیچان‌رودی استفاده نمود. Zahiri et al. (2019) نیز با استفاده از این مدل شبه‌دوبعدی، بار کل رسوب رودخانه قره‌سو را مدل‌سازی نمودند. در تمامی مطالعات فوق، روش تفاضل‌های محدود برای حل عددی مدل شیونو و نایت انتخاب شده است. همچنین دقت نتایج بار کل رسوب در حالت‌های یک‌بعدی و

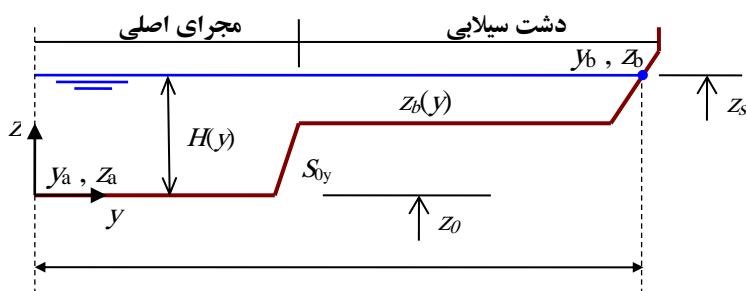
مواد و روش‌ها

مدل ریاضی شیونو و نایت

با انتگرال‌گیری عمقی از معادله ناویر-استوکس در شرایط جریان ماندگار و یکنواخت، معادله دیفرانسیلی زیر برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه‌های مستقیم ارائه شده است (Shiono and Knight, 1991):

$$\rho g H S_{0x} - \rho \frac{f}{8} u_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s_{0y}^2}} + \frac{d}{dy} \left\{ \rho \lambda H^2 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} u_d \frac{du_d}{dy} \right\} = \beta_s \rho g H S_{0x} \quad (1)$$

که در آن چگالی آب، ρ شتاب ثقل، g عمق جریان در هر نقطه از عرض رودخانه، S_{0x} شیب طولی بستر آبراهه، f ضریب اصطکاک دارسی-وئیسباخ، u_d سرعت متوسط در عمق جریان در جهت طول آبراهه، s_{0y} شیب جانبی رودخانه (افقی به قائم)، λ ضریب بدون بعد لزجت تلاطمی و β_s ضریب جریان ثانویه است (شکل ۱). جریان‌های ثانویه عموماً در قوس رودخانه‌ها دارای اهمیت بوده (Ervine et al., 2000) و در رودخانه‌های مستقیم از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشند (Shiono and Knight, 1991; Da Silva, 2006).



شکل (۱): تغییرات عرضی عمق جریان در یک رودخانه سیلابی

حل معادله شیونو و نایت به روش اجزاء محدود

برای استفاده از روش اجزاء محدود، ابتدا مطابق شکل ۲، عرض فوقانی سطح آب به چند بازه یا برش تقسیم شده و هر بازه به عنوان یک گره محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. سپس فرض می‌شود که تمامی ضرایب معادله دیفرانسیل (۱) فقط به فاصله عرضی y وابسته هستند. در

شبه‌دوبعدی مقایسه نشده است. در این مقاله، برای حل عددی این مدل از روش اجزاء محدود استفاده شده و نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی بار بستر، معلق و کل رودخانه زارم‌رود (یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه تجن واقع در شهرستان ساری) مورد مقایسه قرار گرفته است. قبلاً Roshun et al. (2017) بار رسوب این رودخانه را به کمک روش‌های مختلف هیدرولوژیکی برآورد نمودند. همچنین این محققین چند نمونه از بار بستر این رودخانه را به کمک نمونه‌بردار چاله‌ای اندازه‌گیری نمودند (Roshun et al., 2018). در این مقاله برای اولین بار شبیه‌سازی توزیع عرضی بار معلق در رودخانه با مدل شبه‌دوبعدی شیونو و نایت مورد ارزیابی قرار گرفته است.

معادله دیفرانسیل (۱) دارای ۳ ضریب واسنجی (β_s, λ, f) است که باید به کمک داده‌های پروفیل عرضی سرعت مشاهداتی برای رودخانه خاص مورد مطالعه بدست آیند. برای حل عددی این معادله، از روش اجزاء محدود استفاده و برنامه این روش حل در محیط MATLAB 7.6 کدنویسی شد.



سورت، چاله سرگاه، بادله، دراشه و گچچال در محل روستای گرمرود وارد رودخانه تجن می‌شود. حوضه آبریز آن نیز به همین نام می‌باشد. حوضه آبریز زارمروود یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز بزرگ تجن محسوب می‌گردد. طول رودخانه زارمروود حدود ۱۲۰ کیلومتر بوده که منطقه‌ای به وسعت ۸۹۳/۵ هکتار را زهکشی می‌کند. این حوضه در محدوده عرض‌های ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه و ۰۷ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۱ دقیقه شرقی واقع شده است. این حوضه، منطقه‌ای کوهستانی و دارای آب و هوای سردسیر است. رودخانه مزبور دارای جریان دائمی بوده و متوسط دبی سالانه آن حدود ۴/۵ مترمکعب بر ثانیه است. موقعیت این حوضه در استان مازندران در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۳ نیز نمایی از ایستگاه هیدرومتری گرمرود نمایش داده شده است.

این صورت به کمک تغییر متغیر زیر، معادله غیرخطی حاکم به یک معادله خطی تبدیل خواهد شد:

$$U(y) = u_d^2(y) \quad (1)$$

$$-\rho \frac{f}{8} U(y) \sqrt{1 + \left(\frac{dZ_b}{dy}\right)^2} \quad (2)$$

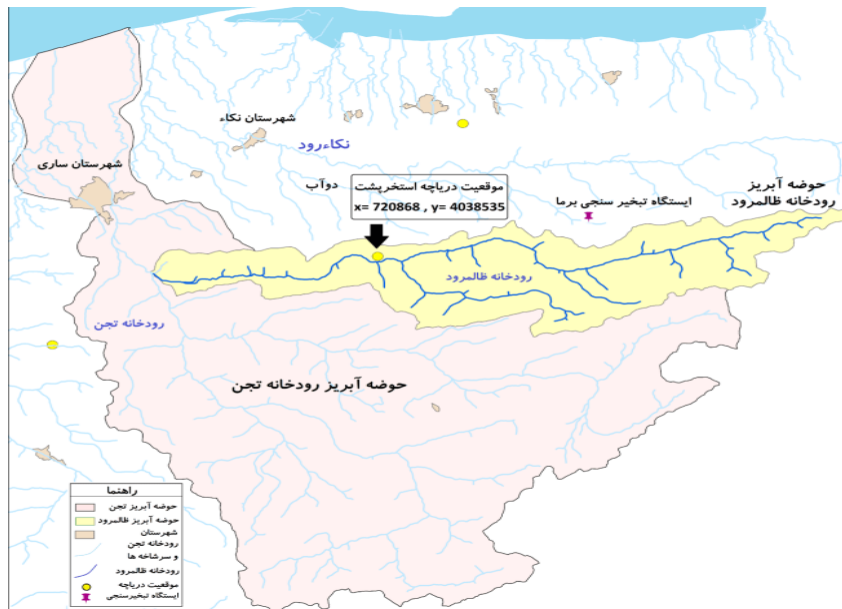
$$+ \frac{d}{dy} \left(\frac{\rho}{2} \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8} \frac{dU(y)}{dy}} \right) = (\beta_s - 1) \rho g H S_{0x}$$

جزئیات کامل شرایط مرزی و نحوه حل عددی معادله فوق در مطالعه (Nabizadeh et al. 2021) ارائه شده است.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه ظالمروود (زارمروود)

رودخانه زارمروود در استان مازندران قرار دارد که از دامنه‌های شمالی سلسه جبال البرز سرچشمه گرفته و پس از عبور از دامنه کوه‌های سردره، کمربست، سیاه‌خانی،



شکل (۲): موقعیت رودخانه زارمروود در استان مازندران



شکل (۳): ایستگاه هیدرومتری گرمرود

داده‌های هیدرولیکی و رسوبی مورد استفاده

در این مقاله از داده‌های توزیع عرضی سرعت و معلق اندازه‌گیری شده در رودخانه زارمرود در ایستگاه هیدرومتری گرمرود استفاده شده است (Sheikhpour, 2014). سرعت جریان توسط دستگاه سرعت‌سنج (مولینه

آلمانی مدل OTT)، غلظت بار معلق به کمک نمونه‌بردار عمقی-تجمعی و بار بستر توسط نمونه‌بردار هلی-اسمیت اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از اطلاعات هیدرولیکی و رسوبی داده‌های اندازه‌گیری نشان داده شده است. این داده‌ها در زمان سیلاب‌های رخ داده در این رودخانه طی سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۱ برداشت شده‌اند.

جدول (۱): خلاصه اطلاعات هیدرولیکی و هندسی داده‌های مورد استفاده

شیب متوسط	قطر d_{90} (mm)	قطر d_{50} (mm)	بار کل (kg/s)	بار بستر (kg/s)	بار معلق (kg/s)	دبی جریان (m^3/s)	سرعت جریان (m/s)	
۰/۰۰۸	۱۹/۷۵	۳/۶	۲۴/۸۹	۰/۱۱۷	۲۴/۷۸	۱۷/۳	۱/۲	حداقل
	۸۹/۷	۳۸/۵	۳۸۰۰/۸	۹/۶۹۳	۳۷۹۵/۲۲	۱۰۴/۲	۲/۲	حداکثر

فرمول‌های تجربی تخمین بار رسوب معلق و کل

در این تحقیق رایج‌ترین فرمول‌های محاسبه رسوب مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت بهترین فرمول برای رودخانه مورد نظر ارائه شده است. در این پژوهش از ۵ فرمول رایج برآورد بار معلق رودخانه شامل راس، بروکس، لین-کالینسک، چانگ-سیمونز-ریچاردسون، و اینشتین، ۱۷ فرمول رایج برآورد بار بستر شامل میر-پیتر و مولر، شاکلیچ، حسن‌زاده، ون‌راین، فرایلینک، دوبوی، شیلدز، پارکر، انیشتین-براون، چین، ونگ-پارکر، ویلسون، آشیدا-میشیو، نیلسون، انگلوند-فردسو، انگلوند-هانسن و ایگرز-وایت، و ۵

فرمول رایج برآورد بار کل رودخانه شامل ایگرز-وایت، انگلوند-هانسن، یانگ، لارسن، و میر-پیتر و مولر استفاده شد که نمونه‌ای از این فرمول‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): نمونه‌ای از فرمول‌های رایج محاسبه بار معلق، بار بستر و بار کل

نوع رابطه	نام رابطه	رابطه رسوبی
بار معلق	بروکس (ماسه‌ای، آزمایشگاهی)	$\frac{q_s}{\gamma_w q C_{md}} = F(K \frac{V}{U_*}, Z_1)$
	لین-کالینسک (ماسه‌ای، آزمایشگاهی)	$q_s = \gamma_w q C_a P_L \exp\left(\frac{15wa}{U_* D}\right)$
بار بستر	میر-پیتر و مولر (شنی، آزمایشگاهی)	$q_b = 8\rho_s \sqrt{g(G_s - 1)d_{50}^3} \left(\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} - 0.047 \right)$
	انگلوند-فردسو (شنی، آزمایشگاهی)	$q_b = 11.6\rho_s \sqrt{g(G_s - 1)d_{50}^3} \left(\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} - 0.05 \right) \left(\sqrt{\frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}}} - 0.156 \right)$
بار کل	ایکرز- وایت (شنی-ماسه‌ای، آزمایشگاهی)	$Q_t = Q C \frac{d_{50}}{R} \left(\frac{V}{u_*} \right)^n \left(\frac{F_g}{A} - 1 \right)^m$
	انگلوند- هانسن (ماسه‌ای، آزمایشگاهی)	$Q_t = 0.05Q \frac{G_s}{G_s - 1} \frac{VS_0}{\sqrt{(G_s - 1)gd_{50}}} \frac{RS_0}{(G_s - 1)d_{50}}$

که در این روابط، N تعداد نمونه‌ها است. علاوه بر شاخص - های فوق، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا نیز به صورت زیر استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_c - Q_m)^2}{N}} \quad (7)$$

نتایج و بحث

مدل سازی یک بعدی بار معلق، بار بستر و بار کل

تمامی روابط رسوب معلق، بار بستر و بار کل در نرم افزار اکسل برنامه نویسی شد و نتایج آنها به ازاای دبی های جریان در ایستگاه هیدرومتری گرم رود محاسبه شد.

مدل سازی یک بعدی بار معلق

بر اساس نتایج جدول ۳ برای برآورد بار معلق رودخانه زارم رود، روابط اینشتین، راس و بروکس به ترتیب با نسبت ناجوری (در دامنه $0.15 < R < 2$) حدود $0.66/7$ ، $0.58/3$ و 0.25 درصد دارای بهترین دقت می باشند. همچنین رابطه لین و کالینسک با نسبت ناجوری حدود $0.16/7$ درصد ضعیف ترین نتایج را ارائه داده است.

شاخص های تعیین بهترین رابطه برآورد رسوب

نسبت اختلاف یا ناجوری (R)

این شاخص بر اساس نسبت بار رسوب بدست آمده از فرمول های تجربی (Q_c) به بار رسوب اندازه گیری شده در رودخانه (Q_m) بدست می آید. هر چه این نسبت به مقدار واحد نزدیک تر باشد، بیانگر دقت بالاتر فرمول تجربی است.

$$R = \frac{Q_c}{Q_m} \quad (4)$$

میانگین و انحراف معیار نسبت ناجوری

علاوه بر شاخص نسبت ناجوری، شاخص های میانگین (\bar{R}) و انحراف معیار نسبت ناجوری (σ) نیز برای انتخاب بهترین رابطه بار رسوب مورد استفاده قرار می گیرند:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}{N - 1}} \quad (6)$$

جدول (۳): رتبه‌بندی روش‌های برتر برآورد بار معلق بر اساس شاخص‌های آماری ارائه شده

σ	\bar{R}	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	روابط تجربی
۰/۵۶	۰/۸۳	۸۳/۳۳	۶۶/۶۷	اینشتین
۰/۵۲	۰/۷۴	۸۳/۳۳	۵۸/۳۳	راس
۲/۴۷	۳/۵۳	۵۰	۲۵	بروکس
۳/۹۶	۵/۶۶	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	چانگ - سیمونز و ریچاردسون
۴/۷۹	۶/۹۱	۱۶/۶۷	۱۶/۶۷	لین - کالینسک

مدل‌سازی یک‌بعدی بار بستر

این جدول مشخص است که روابط دوبوی، فرایلینک و میر-پیتر و مولر دارای کارایی مناسبی بوده و به عنوان روابط برتر برآورد بار بستر در این رودخانه قابل انتخاب می‌باشند.

نتایج بررسی دقت روابط تجربی انتقال بار بستر بر اساس شاخص‌های رسوبی در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس

جدول (۴): رتبه‌بندی روش‌های برتر برآورد بار بستر بر اساس شاخص‌های رسوبی ارائه شده

σ	\bar{R}	$0.33 < R < 3$	$0.5 < R < 2$	روابط تجربی
۰/۳۴	۰/۴۱	۴۱/۶۷	۳۳/۳۳	دوبوی
۳/۴۶	۳/۶۹	۴۱/۶۷	۳۳/۳۳	فرایلینک
۷/۲۳	۴/۵۵	۴۱/۶۷	۴۱/۶۷	میر-پیتر و مولر
۲۵/۹۵	۳۸/۱۴	.	.	انگلوند-هانسن
۴۳/۴۱	۴۶/۹۷	.	.	ون‌راین
۴۴/۳۴	۵۵/۰۳	.	.	شوکلچ
۱۱۹/۶۹	۱۴۱/۰۷	.	.	انگلوند-فردسو
۱۶۵/۷۳	۱۹۷/۶۵	.	.	ونگ-پارکر
۱۸۶/۳۴	۲۰۵/۶۴	.	.	اینشتین-براون
۲۴۶/۶۰	۲۷۹/۰۷	.	.	شیلدز
۳۱۷/۶۵	۳۵۰/۴۸	.	.	ایکرز-وایت
۳۳۴/۶۵	۳۸۸/۸۹	.	.	پارکر
۳۶۰/۷۷	۴۱۰/۸۴	.	.	آشیدا-میشیو
۳۴۴/۴۸	۴۱۱/۷۷	.	.	چین
۳۸۱/۱۸	۴۴۹/۳۲	.	.	حسن‌زاده
۴۶۷/۶۴	۵۵۳/۸۰	.	.	ویلسون
۵۹۳/۷۷	۷۱۳/۵۵	.	.	نیلسون

مدل‌سازی یک‌بعدی بار کل رسوب

بر اساس نتایج جدول ۵ برای برآورد بار کل رودخانه زارم‌رود، روش‌های میر-پیتر و مولر، ایکرز-وایت و انگلوند-هانسن به ترتیب با نسبت ناجوری (در دامنه $0.5 < R < 2$) حدود ۶۶/۷، ۴۱/۷ و ۱۶/۶۷ درصد دارای بهترین دقت می‌باشند. ضعیف‌ترین نتایج نیز مربوط به روش‌های یانگ و لارسن می‌باشد.

جدول (۵): رتبه‌بندی روش‌های برتر برآورد بار کل بر اساس شاخص‌های آماری ارائه شده

σ	\bar{R}	$0.33 < R < 3$	$0.15 < R < 2$	روابط تجربی
۱/۱	۱/۵۴	۸۳/۳۳	۶۶/۶۷	میر- پیتر و مولر
۰/۲۸	۰/۵	۷۵	۴۱/۶۷	ایکرز- وایت
۰/۲۴	۰/۴۱	۵۸/۳۳	۱۶/۶۷	انگلوند - هانسن
.	.	.	.	یانگ
.	.	.	.	لارسن

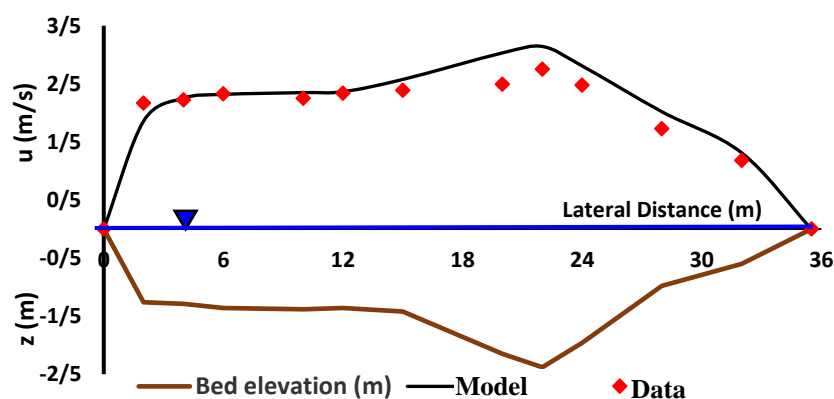
از نتایج این مرحله برای تراز سطح آب ۱۲۸ سانتیمتر (سیلاب مورخ ۹۱/۷/۲۲) در شکل ۴ نشان داده شده است. بهترین ضریب زبری مانینگ به ازاء این دبی سیلابی حدود ۰/۴۵ بدست آمد با توجه به درشت‌دانه بودن مصالح کف رودخانه زارم‌رود منطقی است. دبی‌های جریان مشاهداتی و محاسباتی رودخانه به ازاء این تراز سطح آب، به ترتیب ۱۰۴/۲۵ و ۱۱۴/۰۶ مترمکعب بر ثانیه است که خطایی حدود ۹/۴ درصد را نشان می‌دهد. برای اطمینان از برآورد صحیح ضریب زبری مانینگ، شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت برای سیلاب دیگری با همین ضریب زبری انجام شد (شکل ۵). تراز سطح آب در این جریان سیلابی حدود ۹۸ سانتیمتر (سیل مورخ ۹۳/۱/۱۲) ثبت شده است. دبی‌های جریان مشاهداتی و محاسباتی در این مرحله به ترتیب حدود ۱۷/۵۹ و ۱۸/۱۵ مترمکعب بر ثانیه بدست آمدند که خطایی حدود ۳/۲ درصد را برای مدل ریاضی نشان می‌دهد.

مدل‌سازی شبه‌دو بعدی

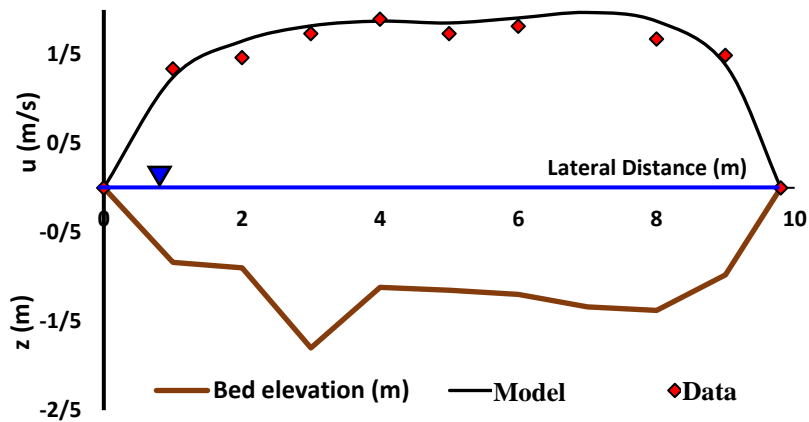
شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان

الف- واسنجی مدل ریاضی بر اساس توزیع عرضی سرعت

اولین گام برای استفاده از مدل‌های ریاضی شبه‌دو بعدی برای تخمین بار رسوب رودخانه‌ها، واسنجی هیدرولیکی مدل ریاضی است. بهترین روش برای انجام این کار، بهینه‌سازی ضریب زبری مانینگ رودخانه بر اساس مقادیر مشاهداتی توریع عرضی سرعت جریان است. به این منظور، در این مقاله با اندازه‌گیری مقادیر سرعت‌های نقطه‌ای رودخانه زارم‌رود در ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود به کمک دستگاه سرعت‌سنج (مولینه) در عرض و عمق رودخانه، مقدار نسبتاً دقیق ضریب زبری مانینگ طوری تعیین شد که مقادیر سرعت‌های محاسبه شده به کمک مدل ریاضی بهترین مطابقت را با مقادیر مشاهداتی داشته باشند. بخشی



شکل (۴): مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در مرحله واسنجی (سیلاب با اشل ۱۲۸)



شکل (۵): مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در مرحله صحت‌سنجی (سیلاب با اشل ۹۸)

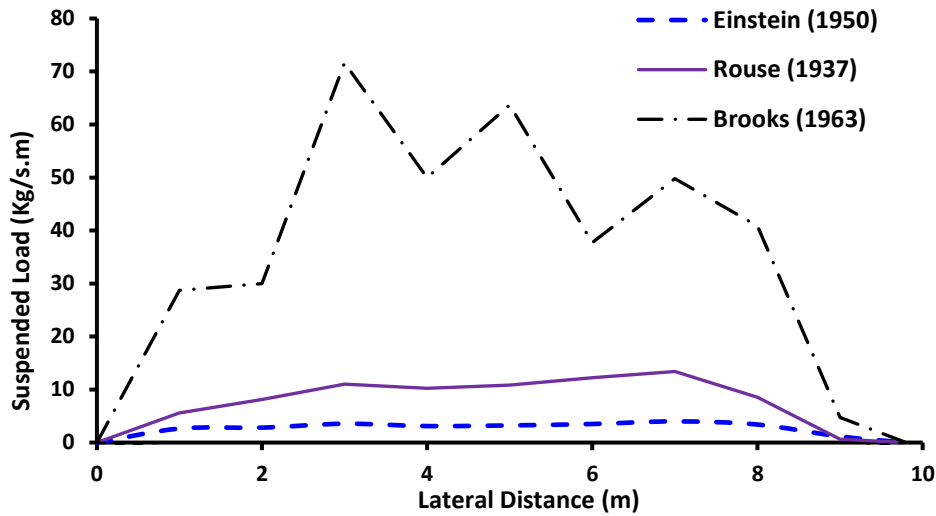
نتایج برای سه روش تجربی منتخب برآورد بار معلق (اینشتین، راس و بروکس) به ازاء ترازهای سطح آب ۹۸ و ۱۲۸ سانتیمتر در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در هر دو تراز سطح آب، رابطه اینشتین دارای کمترین بار رسوبی و رابطه بروکس تقریباً دارای بیشترین بار رسوب معلق است. با انتگرال‌گیری عرضی از توزیع‌های عرضی بار معلق، بار کل رسوب معلق رودخانه محاسبه شده است. بر اساس نتایج جدول ۶ و برای تراز سطح آب ۹۸ سانتیمتر، مقادیر برآورد شده بار معلق به کمک روش اینشتین در دو حالت یک‌بعدی و شبه‌دو بعدی به ترتیب برابر ۵۳ و ۲۷/۳ گرم بر ثانیه است که نسبت به بار معلق اندازه‌گیری شده (۲۴/۸ گرم بر ثانیه) به ترتیب دارای خطایی حدود ۱۱۳ و ۱۰ درصد دارند. برای تراز سطح آب ۱۲۸ سانتیمتر هم مدل شبه‌دو بعدی نتیجه بهتری نسبت به حالت یک‌بعدی داشته است. خطای مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دو بعدی در تخمین بار کل معلق رودخانه به ترتیب ۴۷ و ۲۸ درصد است.

شبیه‌سازی توزیع عرضی رسوب بار معلق، بار بستر و بار کل رودخانه زارم‌رود

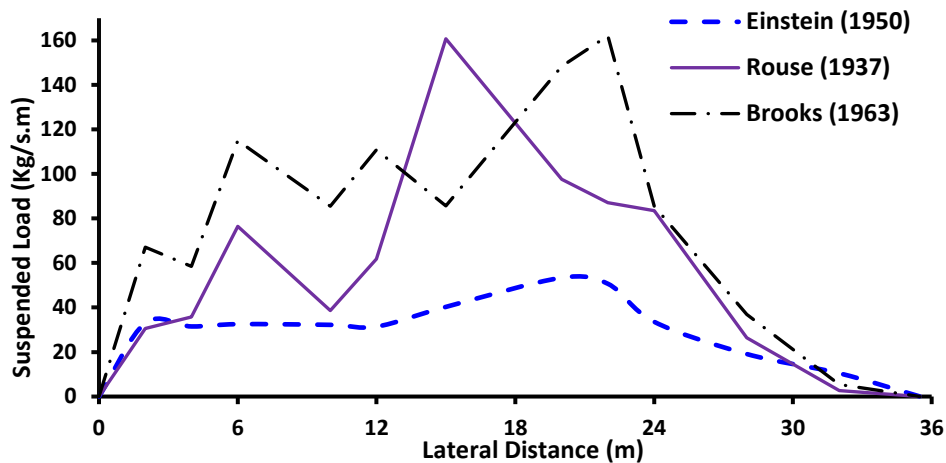
پس از شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان، شبیه‌سازی توزیع عرضی رسوب بار معلق، بار بستر و بار کل بر اساس نتایج توزیع سرعت قابل انجام است. این محاسبات برای همه روابط تجربی منتخب انجام شد. در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نتایج توزیع عرضی رسوب معلق و کل بدست آمده از مدل ریاضی شیونو و نایت (بر حسب گرم بر ثانیه در واحد عرض رودخانه) فقط برای سه روش منتخب برآورد بار معلق و بار کل رودخانه زارم‌رود برای ترازهای سطح آب ۱۲۸ و ۹۸ سانتیمتر در ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود نشان داده شده است. در این شکل‌ها، مقادیر اندازه‌گیری شده نیز ارائه شده است.

شبیه‌سازی توزیع عرضی بار معلق رودخانه زارم‌رود

بر اساس توزیع عرضی سرعت و جاگذاری مقادیر سرعت‌ها در فرمول‌های رسوبی برای هر بازه در عرض رودخانه، توزیع عرضی بار معلق قابل محاسبه است. این



شکل (۶): مقایسه توزیع عرضی بار معلق محاسباتی از ۳ رابطه تجربی رسوبی (اشل ۹۸ سانتیمتر)



شکل (۷): مقایسه توزیع عرضی بار معلق محاسباتی از ۳ رابطه تجربی رسوبی (اشل ۱۲۸ سانتیمتر)

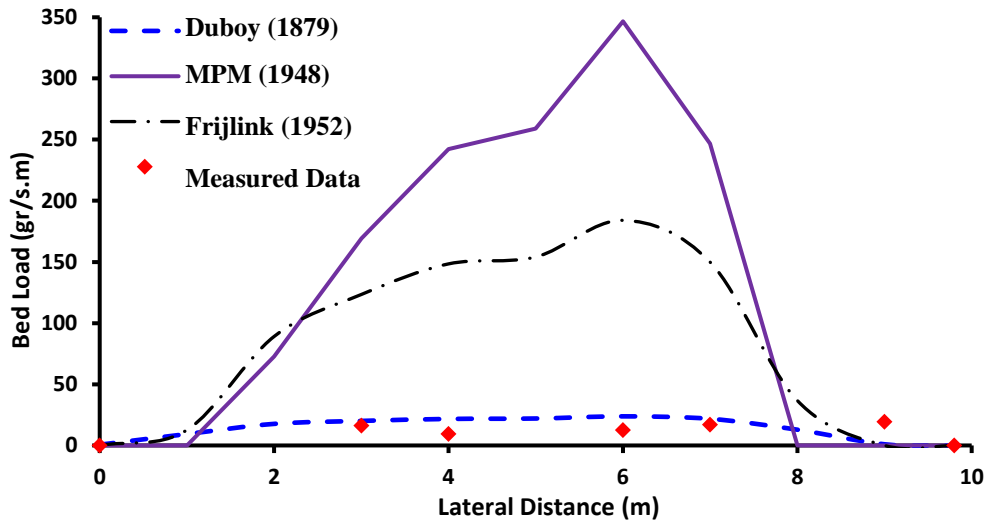
جدول (۶): مقایسه نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی تخمین بار معلق رودخانه زارمرود به کمک رابطه منتخب اینشتین

بار معلق (Kg/s)			دبی جریان (m ³ /s)
شبه‌دوبعدی	یک‌بعدی	اندازه‌گیری	
۲۷/۳	۵۳	۲۴/۸	۱۷/۵۹
۲۷۴۰/۸	۲۰۲۶/۴	۳۷۹۵/۲	۱۰۴/۲۵

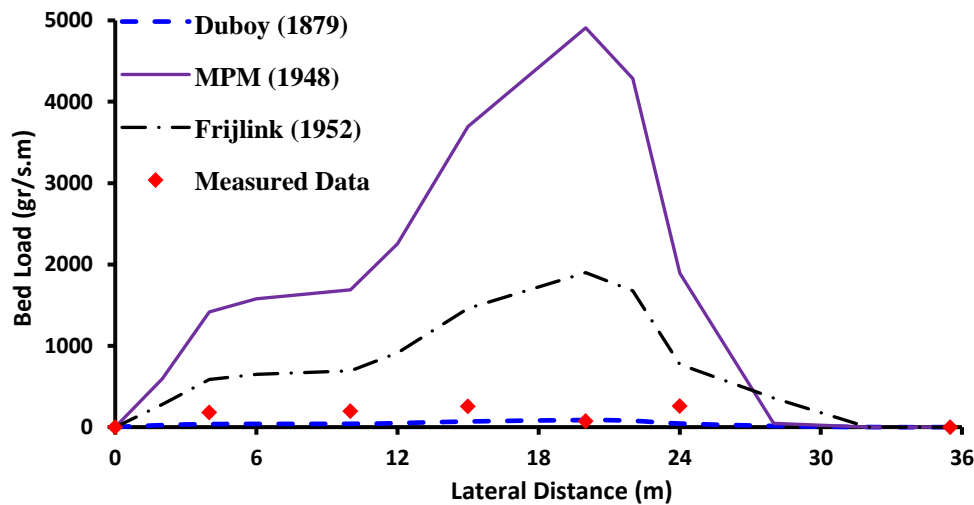
پیتر و مولر) برای ترازهای سطح آب ۹۸ و ۱۲۸ سانتیمتر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. مشخص است که از میان این ۳ فرمول رسوبی، رابطه دوبوی انطباق بسیار بهتری با مقادیر واقعی رسوب بار بستر در عرض رودخانه دارد. روابط میر-پیتر و

شبیه‌سازی توزیع عرضی بار بستر رودخانه زارمرود مشابه محاسبه توزیع عرضی بار معلق، توزیع بار بستر در عرض رودخانه نیز به کمک توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر قابل انجام است. نتایج توزیع عرضی بار بستر حاصل از ۳ رابطه رسوبی منتخب (دوبوی، فرایلینک و میر-

مولر و نیز فرایلینک دارای برآوردهایی بزرگتر از مقادیر واقعی می‌باشند.



شکل (۸): مقایسه توزیع عرضی بار بستر اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (اشل ۹۸ سانتیمتر)



شکل (۹): مقایسه توزیع عرضی بار بستر اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (اشل ۱۲۸ سانتیمتر)

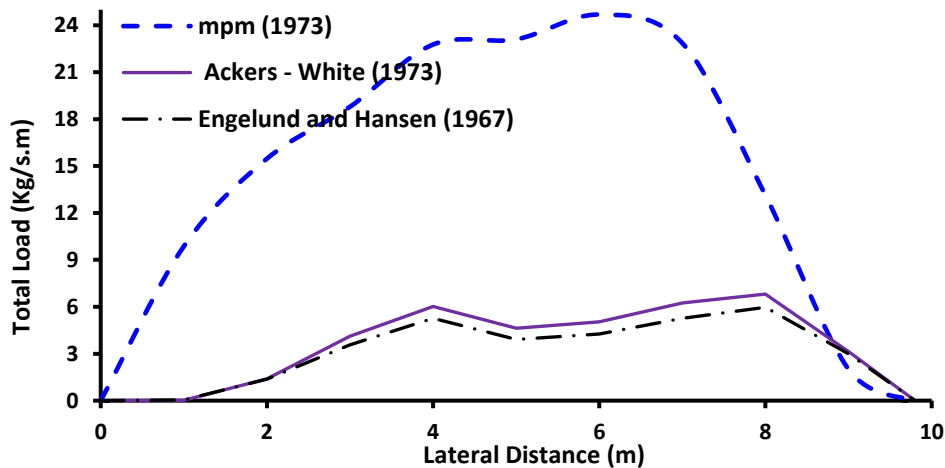
جدول (۷): مقایسه نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی و شبه‌دو‌بعدی تخمین بار بستر رودخانه زارم رود به کمک رابطه منتخب دوبوی

بار بستر (gr/s)			دبی جریان (m ³ /s)
شبه‌دو‌بعدی	یک‌بعدی	اندازه‌گیری	
۱۱۸/۱	۱۸۶/۶	۱۱۷/۸	۱۷/۵۹
۱۵۹/۰۸	۱۴۰/۸	۱۹۰	۱۷/۷۸
۱۳۶/۰۸	۱۲۰	۲۱۸/۲	۱۸/۸۶
۲۷۸/۳	۳۳۰/۹	۷۲۹/۳۹	۳۸/۴۴
۵۶۴/۱۳	۶۲۲	۵۳۰/۴۱	۶۰/۸
۱۵۳۸	۳۷۵۳۰	۵۵۸۵	۱۰۴/۲۵

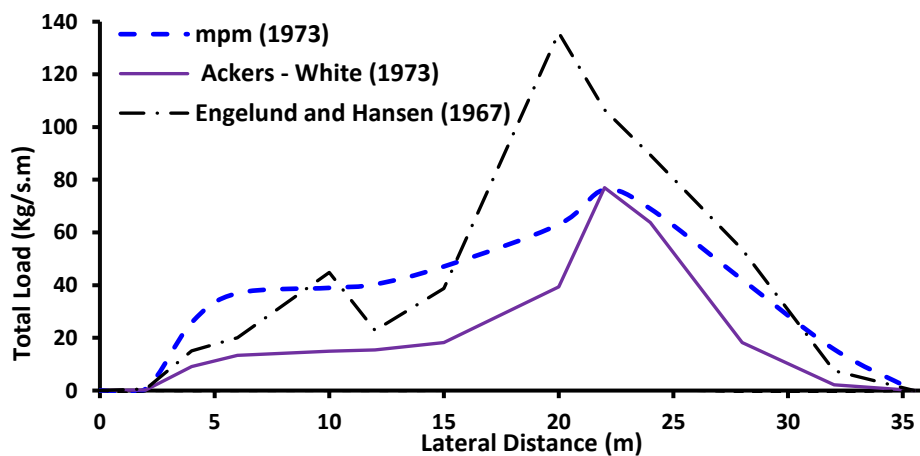


وقوع سیل با تراز سطح آب ۱۲۸ سانتیمتر، دبی جریان ۱۰۴/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و بار کل رسوب عبوری از مقطع رودخانه حدود ۳۸۰۰ کیلوگرم بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. این در حالی است که بار کل برآورد شده توسط رابطه تجربی منتخب انگلوند-هانسن در حالت یک‌بعدی ۳۲۹ کیلوگرم بر ثانیه و در حالت شبه‌دو‌بعدی حدود ۱۶۳۷ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمده است که بیانگر افزایش قابل ملاحظه دقت محاسبات در مدل ریاضی شبه‌دو‌بعدی است. با توجه به لزوم ارتقاء دقت محاسبات رسوبی در رودخانه‌ها به ویژه در شرایط سیلاب، کاربرد مدل‌های شبه‌دو‌بعدی در این زمینه به خوبی قابل توصیه است.

شبیه‌سازی توزیع عرضی بار کل رودخانه زارم‌رود با جاگذاری مقادیر سرعت‌ها در فرمول‌های بار کل رسوب برای هر بازه محاسباتی در عرض رودخانه، توزیع عرضی بار کل رسوب بدست آمده است. این نتایج برای سه روش تجربی منتخب برآورد بار کل رسوب (میر-پیتر و مولر، ایگرز-وایت، و انگلوند-هانسن) به ازاء ترازهای سطح آب ۹۸ و ۱۲۸ سانتیمتر در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با انتگرال‌گیری عرضی از بار رسوب در عرض رودخانه، بار کل رسوب بدست آمده است. این نتایج در جدول آرایه شده است. نکته مهم در این جدول این است که در زمان



شکل (۱۰): مقایسه توزیع عرضی بار کل محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (اشل ۹۸ سانتیمتر)



شکل (۱۱): مقایسه توزیع عرضی بار کل محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (اشل ۱۲۸ سانتیمتر)

جدول (۸): مقایسه نتایج مدل سازی یک بعدی و دوبعدی تخمین بار کل رودخانه زارم رود به کمک رابطه رسوبی منتخب انگلوند-هانسن

بار کل (Kg/s)		دبی جریان	
شبه دوبعدی	یک بعدی	اندازه گیری	(m ³ /s)
۳۲/۳۳	۱۵/۹	۲۴/۹	۱۷/۵۹
۱۶۳۷/۴	۳۲۹/۴	۳۸۰۰/۸	۱۰۴/۲۵

نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا با استفاده از روابط تجربی رسوبی محققین مختلف، بار بستر، بار معلق و بار کل رودخانه زارم-رود در محل ایستگاه هیدرومتری گرم رود محاسبه شد (حالت یک بعدی). نتایج نشان داد که در برآورد بار معلق رودخانه، روابط اینشتین، راس و بروکس دارای دقت بیشتری بوده و به عنوان روابط برتر انتخاب شدند. در برآورد بار بستر، رابطه دوبوی دارای بهترین دقت نسبت به مقادیر اندازه گیری شده بود. روابط تجربی فرایلینک و میر-پیتر و مولر نیز دومین و سومین روابط برتر برآورد بار بستر اعلام شدند. به همین ترتیب در برآورد بار کل رسوب نیز روابط میر-پیتر و مولر، ایگرز-وایت، و انگلوند-هانسن به عنوان برترین روابط انتخاب شدند. در مرحله دوم و برای ارتقاء دقت محاسبات رسوبی در هر سه نوع انتقال رسوب (بار معلق، بار بستر و بار کل)، شبیه سازی و مدل سازی شبه-دوبعدی انتقال رسوب در رودخانه زارم رود مدنظر قرار گرفت. به این منظور ابتدا عرض رودخانه به حدود ۱۰ تا ۲۰ بازه کوچک تر تقسیم شد و سپس به کمک مدل ریاضی-هیدرولیکی شبه دوبعدی شیونو و نایت، مقادیر سرعت جریان در هر بازه محاسبه شد. با جاگذاری مقادیر سرعت-های جریان در هر بازه از عرض رودخانه، بار معلق، بار بستر و بار کل رودخانه در هر بازه محاسبه شده و سپس با انتگرال گیری عرضی از مقادیر غلظت رسوب، بار کل معلق، بستر و مجموع بار کل رسوب عبوری از مقطع رودخانه برآورد شد. نکته جالب در خصوص نتایج این مرحله این است که تقریباً در هر سه نوع انتقال رسوبات، دقت محاسبات در حالت شبه دوبعدی به میزان قابل توجهی از حالت یک بعدی بیشتر بوده است. به طور مثال، در سیلاب مورخ ۹۱/۷/۲۲ (با تراز سطح آب ۱۲۸ سانتیمتر، دبی جریان ۱۰۴/۲۵ مترمکعب بر ثانیه و بار کل رسوب عبوری

از رودخانه در حدود ۳۸۰۰ کیلوگرم بر ثانیه)، بار کل برآورد شده توسط رابطه تجربی منتخب انگلوند-هانسن در حالت یک بعدی ۳۲۹ کیلوگرم بر ثانیه و در حالت شبه دوبعدی حدود ۱۶۳۷ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمده است که بیانگر افزایش قابل ملاحظه دقت محاسبات در حالت شبه دوبعدی است. این افزایش دقت از این نظر مهم و قابل توجه است که عموماً بیشترین میزان رسوب عبوری از رودخانه ها در زمان سیلاب بوده و ارتقاء دقت محاسبات رسوب رودخانه ها در این شرایط، کمک شایانی به طراحی و اجرای دقیق تر طرح های مهندسی و ساماندهی رودخانه خواهد نمود. نکته مهم دیگر این است که مدل های شبه دوبعدی علاوه بر افزایش دقت محاسبات رسوبی، این امکان را نیز به مهندسی می دهد که تغییرات غلظت رسوب در عرض رودخانه را برآورد کنند در حالی که مدل های یک بعدی فاقد این توانایی می باشند. با آگاهی از توزیع عرضی رسوبات در رودخانه می توان بازه های فرسایشی یا رسوبگذار در عرض رودخانه را مشخص نمود و برای هر کدام، راه حل های مخصوص را پیشنهاد داد. همچنین با استفاده از این قابلیت، می توان محل مناسب برای طراحی و اجرای سازه های آبی را پیشنهاد نمود. به طور کلی تاکنون ایده استفاده از مدل های شبه دوبعدی در مدیریت جریان و رسوب رودخانه-ها به طور کامل کاربردی نشده و این تحقیق می تواند به عنوان اولین گام در این خصوص باشد.

قدردانی

این مطالعه بخشی از پروژه تحقیقاتی با عنوان مدیریت مطالعات هیدرولیک رودخانه ها با استفاده از بسته جدید نرم افزاری به شماره قرارداد ۰۰۳/س/۱۴۰۰ با حمایت مالی دفتر تحقیقات کاربردی شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع



آب وزارت نیرو انجام شده است. نویسندگان مقاله از این عزیزان تشکر می‌کنند.

منابع

- روشان، س.ح.، وهاب‌زاده کبریا، ق.، سلیمانی، ک. و خالدی درویشان، ع. ۱۳۹۶. تعیین مناسبترین مدل برآورد رسوب معلق در رودخانه زارم رود استان مازندران. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۲۷(۳): ۵۴-۳۹.
- روشان، س.ح.، وهاب‌زاده کبریا، ق.، سلیمانی، ک. و خالدی درویشان، ع. ۱۳۹۶. بررسی اثرات برداشت شن و ماسه بر ویژگی‌های ریخت‌سنجی رسوبات بستر (مطالعه موردی: رودخانه زارم رود، استان مازندران). نشریه علوم آب و خاک، ۲۱(۳): ۲۱۹-۲۲۹.
- شیخ‌پور، ح. ۱۳۹۵. اندازه‌گیری بار بستر و معلق رودخانه زارم رود در ایستگاه هیدرومتری گرمورد و تعیین نسبت آنها. طرح تحقیقاتی شرکت آب منطقه‌ای مازندران.
- ظهیری، ع.، ایوب‌زاده، س.ع. و دهان‌زاده، ب. ۱۳۸۹. حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری ملاثانی، رودخانه کارون). نشریه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۶(۲): ۲۸۳-۲۷۳.
- ظهیری، ع.، قلی‌نژاد، ج. و دهقانی، ا.ا. ۱۳۹۷. محاسبه توزیع عرضی انتقال رسوب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل ریاضی شبه دوبعدی (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو). مجله مهندسی منابع آب، ۱۱(۳۸): ۹۴-۸۳.
- ظهیری، ع. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب معلق در قوس رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کارون). نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۱(۲): ۱۷-۱.
- نبی‌زاده ولوکلایی، م.، ظهیری، ع.، دهقانی، ا.ا.، مفتاح هلقی، م. ۱۴۰۰. مدل‌سازی شبه دوبعدی هیدرولیک جریان و بار بستر رودخانه زارم‌رود. تحقیقات آب و خاک ایران، ۷(۵۲): ۱۸۶۸-۱۸۵۴.
- Ackers, P. (1992). Hydraulic design of two-stage channels. *Engrs. Wat. Marit. And Energy*, 96: 247-257.
- Aybar, A. (2012). Computational modeling of free surface flow in intake structures using FLOW-3D software. MSc. Thesis, Civil Engineering, Middle East Technical University, Turkey.
- Ayyoubzadeh, S. A. (1997). Hydraulic aspects of straight-compound channel flow and bed load sediment transport. PhD Dissertation, University of Birmingham, U.K.
- Bousmar, D. (2002). Flow modelling in compound channels. Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains. Ph.D. dissertation, Univ. Cath. de Louvain, Belgium.
- Chonwattana, S., Weesakul, S., and Vongvisessomjai, S. (2007). 3D numerical modeling of morphological change between fishtail groins. *Proceedings of the 30th Int. Conf. on Coastal Engineering*, San Diego, California, USA, 3178-3183.
- Da Silva, A.M. (2006). On why and how do rivers meander. *Journal of Hydraulic Researches, IAHR*, 44(5), 579-590.
- Darby, E.S. (1998). Modelling width adjustment in straight alluvial channels. *Journal of Hydrological Processes*, 12(8), 1299-1321.
- Ervine, D. A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R. H. J. (2000). Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 126(9), 653-669.
- Eslami, S., Van Rijn, L.C., Walstra, D.J., Luijendijk, A.J., and Stive, M.J.F. (2010). A numerical study on design of coastal groins. In: Burns, S.E., Bhatia, S.K., Avila, C.M.C., and Hunt, B.E. (Hg.): *Proceedings of 5th Int. Conf. on Scour and Erosion (ICSE-5)*, San Francisco, USA. 501-510.
- Fernandes, J.N., Leal, J.B., and Cardoso, A.H. (2014). Improvement of the lateral distribution method based on the mixing layer theory. *Advances in Water Resources*, 69, 159-167.



- Gessler, D., Hall, B., Spasojevic, M. and Holly, F. (1999). Application of 3D mobile bed, Hydrodynamic Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(7),
- Haddadchi, A., Omid, M.H., and Dehghani, A.A. (2013). Bedload equation analysis using bed load-material grain size. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(3), 241-249.
- Khosronejad, A., Rennie, C., Salehi Neyshabouri, S.A.A., and Townsend, R.D. (2007). 3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 133(10), 11-23.
- Knight, D.W. (2003). Reducing uncertainty in river flood conveyance. Interim Report 2: Review of Methods for Estimating Conveyance, Environment Agency, UK, 73p.
- Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. (1989). Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. *Int. Con. on Hydraulics and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters*, England, 419-428.
- Kordi, H., Amini, R., Zahiri, A., and Kordi, E. (2015). Improved Shiono and Knight method for overflow modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 20(12), 1-10.
- Lai, Y., and Wu, K. (2019). Three-dimensional flow and sediment transport model for free-surface open channel flows on unstructured flexible meshes. *Fluids*, 4(18), 1-19.
- Lambert, M.F., and Sellin, R.H.J. (1996). Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 34: 381-394.
- Montaseri, H. and Asiaei, H. (2014). Validating of SSIIM 3D Model for flow field simulation in a U shape channel bend with intake. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(4), 29-53.
- Omara, H., Elsayed, S.M., Abdealaal, G.M., Abd-Elhamid, H.F., and Tawfik, A. (2019). Hydromorphological numerical model of the local scour process around bridge piers. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 4183-4199.
- Shiono, K. and Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 222: 617-646.
- Singh, C.B., and Ghosh, L.K. (2000). Application of 3D mobile bed, hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 858-860.
- Unal, B., Mamak, M., Seckin, G., and Cobaner, M. (2010). Comparison of an ANN approach with 1-D and 2-D methods for estimating discharge capacity of straight compound channels. *Advances in Engineering Software*, 41: 120-129.
- Wark, J.B., Samuels, P.G. and Ervine, D.A. (1990). A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels. *Int. Conf. on River Flood Hydraulics*, London, 163-172.



Calibration of Hydraulic Flow and Sediment of Quasi-Two-Dimensional Model of Shiono and Knight in Zaremrood River

Morteza Nabizadeh Valukulaei¹, Abdolreza Zahiri^{2*}, Amir Ahmad Dehghani³, Mahdi Meftah⁴

Abstract

In this study, the calculation of hydraulic flow and sediment (suspended load and total load) of Zaremrood river located in Mazandaran province has been investigated using Shiono and Knight quasi-two-dimensional model. This model is based on the Navier-Stokes continuity and momentum equations and is simplified by depth averaged concept. For this purpose, using the finite element method, this model was solved numerically and the lateral velocity distribution were calibrated at the Garmrood hydrometric station. Comparison of obtained results by Shiono and Knight model in different flow discharges against measured data indicates the high accuracy of the model for lateral velocity distribution. Afterward, by using the computed lateral velocity distribution, the distribution of suspended load and total load across the river was simulated. The results showed that among the 5 empirical suspended load equations selected in this study, the Einstein formula (1950) has the best accuracy in both one and quasi-two-dimensional modeling cases. This relationship in one-dimensional state with standard deviation of discrepancy ratio of 0.56% has a higher accuracy than the Rouse (1937) and Brooks (1963) sedimentary relations with a standard deviation of 0.52% and 2.47%, respectively. Finally, among the 5 experimental relationships of the total load studied, Meyer-Peter-Muller (1973), Ackers-White (1973) and Engelund-Hansen (1967) sedimentary relationships with discrepancy ratios of 66.67, 41.67 and 16.67, respectively presented the best results in one-dimensional mode, and the accuracy of all three methods was better in two-dimensional mode than in one-dimensional mode. Finally, it was found that the accuracy of suspended load and total load modeling in quasi-two-dimensional mode is more than one-dimensional, which shows the high impact of Shiono and Knight model in simulation of hydraulic flow and sediment.

Keywords: Suspended Load Empirical Relationships, Total load, Quasi two-dimensional Modeling, Shiono and Knight Model, Zaremrood river

¹Former PhD Student of Water Structures, Department of Water Engineering., Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Email: nabizade49@gmail.com

² Associated Professor, Department of Water Engineering., Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Phone: 09166512751, Email:zahiri@gau.ac.ir

³ Professor, Department of Water Engineering., Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Email:dehghani@gau.ac.ir

⁴ Associated Professor, Department of Water Engineering., Faculty of Soil and Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, Email:meftah@gau.ac.ir