

Quasi Two-Dimensional Modeling of Flow Hydraulics and Bed Load Transport in Zaremrood River

MORTEZA NABIZADEH VALUKOLAEI¹, ABDOLREZA ZAHIRI^{1*}, AMIR AHMAD DEHGHANI¹, MEHDI MEFTAH HALAGHI¹

1. Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

(Received: Apr. 29, 2021- Revised: June. 9, 2021- Accepted: June. 19, 2021)

ABSTRACT

Determining the amount of sediment carried by rivers is important in several ways. This parameter is effective in design of dimensions and geometric characteristics of flow regulation and diversion structures, reservoir dams as well as pumping stations. In this study, the calculation of flow discharge and bed 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 has been simplified by depth averaged concept. For this purpose, using the finite element method, this model was solved numerically and the lateral velocity distribution was 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. Then, by using the computed lateral velocity distribution, the distribution of bed load across the river was simulated. The results showed that among the 17 empirical bed load equations selected in this study, the Duboy formula (1879) has the best accuracy in both one and quasi-two-dimensional modeling cases. In 1D modeling case, this formula with standard deviation of the discrepancy ratio of 0.34 percent had better agreement with the measured bed load in comparison to the Frijlink (1952) and Meyer-Peter and Mueller (1948) equations with the standard deviation of 3.46 and 7.32 percent, respectively. In 2D modeling bed load transport, the root mean square error (RMSE) was obtained 7.45, 98.8 and 172.9 for three equations of Duboy, Frijlink and Meyer-Peter and Mueller, respectively which indicates that only Duboy formula has an acceptable accuracy while Frijlink and Meyer-Peter and Mueller equations have large errors. The results also showed that the bed load transport in quasi-two-dimensional model using Duboy equation is more accurate than one-dimensional case.

Keywords: Bed Load Experimental Relationships, Quasi Two-Dimensional Modeling, Shiono and Knight Model, Zaremrood River.

* Corresponding Author's Email: zahiri.arez@gmail.com

مدل سازی شبه دوبعدی هیدرولیک جریان و بار بستر رودخانه زارم رود

مرتضی نبی زاده ولوکلانی^۱، عبدالرضا ظهیری^{۱*}، امیراحمد دهقانی^۱، مهدی مفتاح هلقی^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۳/۲۹)

چکیده

تعیین مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها از جنبه‌های متعددی حائز اهمیت است. این پارامتر در تعیین ابعاد و مشخصات هندسی سازه‌های تنظیم و انحراف جریان، سدهای مخزنی و نیز ایستگاه‌های پمپاژ موثر است. در این تحقیق محاسبه دبی جریان و بار بستر رودخانه زارم رود (در استان مازندران) به کمک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل بر مبنای معادلات پیوستگی و مومنوم 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 زارم رود 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 بستر شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که از میان ۱۷ رابطه تجربی بار بستر مورد مطالعه، رابطه رسوبی دوبوی (۱۸۷۹) در هر دو حالت مدل‌سازی یک‌بعدی و شبه‌دوبعدی دارای بهترین دقت است. این رابطه در حالت یک‌بعدی با انحراف معیار نسبت ناجوری ۰/۳۴ درصد مطابقت بهتری با مقادیر بار بستر اندازه‌گیری شده داشته و نسبت به روابط رسوبی فرایلینک (۱۹۵۲) و میر-پیتر و مولر (۱۹۴۸) به ترتیب با انحراف معیار ۳/۴۶ و ۷/۳۳ درصد از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. نتایج مدل‌سازی شبه‌دوبعدی بار بستر نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سه رابطه دوبوی، فرایلینک و میر-پیتر و مولر به ترتیب حدود ۷/۴۵، ۹۸/۸ و ۱۷۳/۹ است که فقط رابطه دوبوی دقت قابل قبولی داشته و دو رابطه فرایلینک و میر-پیتر و مولر دارای خطای زیادی می‌باشند. همچنین مشخص شد که دقت مدل‌سازی بار بستر حاصل از رابطه دوبوی در حالت شبه‌دوبعدی از یک‌بعدی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: روابط تجربی بار بستر، مدل‌سازی شبه‌دوبعدی، مدل شیونو و نایت، رودخانه زارم‌رود.

نمودند (Fenton, 2016).

مقدمه

امروزه با توجه به پیشرفت مبانی مهندسی علم هیدرولیک رودخانه‌ها و نیز ارتقاء جنبه‌های ساخت‌افزاری 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، MIKE3، CCHE2D) توسعه داده شده و کاربردهای زیادی نیز در حل مسائل مهندسی رودخانه پیدا کرده‌اند (Lai and Wu, 1999; Singh and Ghosh, 2000; Gessler et al., 2019). با این حال، به نظر می‌رسد برای کاربردی شدن همه‌جانبه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در رودخانه‌های واقعی راه زیادی باقی مانده است (Knight, 2003). تاکنون این مدل‌ها اغلب برای مطالعات آزمایشگاهی و نیز برای بررسی‌های موضعی در رودخانه مثل مدل‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب در قوس رودخانه‌ها و کانال‌ها (Khosronejad et al., 2007; Montaseri and Asiaei, 2016).

دانشمند ایتالیایی بنام دومینیکو گولیومینی از اولین کسانی بود که در زمینه انتقال رسوبات رودخانه‌ای و علم مهندسی رودخانه مطالعه کرده و نتیجه بررسی‌های خود را در سال ۱۶۹۷ در کتابی با عنوان طبیعت رودخانه‌ها منتشر نمود. به همین دلیل، برخی وی را پدر علم مهندسی رودخانه می‌نامند. از ابتکارات او احداث دیواره‌های ساحلی و آبی‌ها در بعضی از رودخانه‌های ایتالیا است. همچنین در سال ۱۷۷۰، فریزی با انتشار دو کتاب، مسائل مختلفی از قبیل اصلاح رودخانه و انتقال مواد رسوبی توسط جریان آب را مطرح نمود. او اولین کسی بود که مطالعات آزمایشگاهی را نیز در این زمینه انجام داد. بعدها در اواخر قرن هجدهم و اوایل قرن نوزدهم دانشمندان مطرحی مثل ناویر، استوکس، سنت ونانت، فرود، مانینگ، بازن، رینولدز و بوزینیسک به پیشرفت دانش هیدرولیک و انتقال رسوبات کمک شایانی

میان مهمترین مدل‌ها در این خصوص، مدل‌های Wark et al. (1990)، Lambert and Sellin (1991)، Shiono and Knight (1996)، Ervine et al. (2000) و Kordi et al. (2015) قابل اشاره است. با بررسی همه‌جانبه مزایا و محدودیت‌های این مدل‌ها، مدل شبه‌دو بعدی Shiono and Knight (1991) به عنوان یک مدل بهینه و متمایز تشخیص داده شده و کاربرد بسیار گسترده‌ای در حل مسائل هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها داشته است (Unal et al., 2010; Fernandes et al., 2014; Kordi et al., 2015). دقت قابل قبول نتایج، سادگی فرم معادله حاکم، سادگی حل عددی مدل (به هر دو روش تفاضل‌های محدود و اجزاء محدود) در رودخانه‌های نامنظم، برآورد توام سرعت جریان و تنش برشی بستر در عرض رودخانه، قابلیت در نظر گرفتن اثر جریان‌های ثانویه، قابلیت استفاده در رودخانه‌های مستقیم و پیچانرود، قابلیت کاربرد در حل مسائل انتقال رسوبات معلق و بستر، و قابلیت دخالت مقاومت جریان ناشی از وجود پوشش گیاهی در مجرای اصلی یا دشت‌های سیلابی رودخانه از جمله مزایای مدل Shiono and Knight (1991) است. در این مقاله از همین مدل ریاضی برای شبیه‌سازی توزیع عرضی بار بستر رودخانه زارم رود استفاده شده است.

رسوبات معلق و بستر رودخانه‌ها جزء لاینفک سامانه‌های آبی بوده و نقش و اهمیت زیادی در شکل‌گیری و توسعه رودخانه‌ها دارند. تلاش‌های بسیار زیادی برای محاسبه نرخ انتقال رسوب معلق و بستر رودخانه‌ها صورت گرفته است که حاصل این تلاش‌ها، ارائه معادلات تجربی انتقال رسوب معلق و بار بستر رودخانه‌ها است. این معادلات دارای کاربرد گسترده‌ای در مباحث انتقال رسوب بوده‌اند اما با توجه به اینکه این معادلات، یک‌بعدی می‌باشند احتمالاً در رودخانه‌های عریض دارای محدودیت می‌باشند. این محدودیت به ویژه برای رودخانه‌های دارای دشت‌های سیلابی، بسیار مشخص‌تر است (Ackers, 1992; Ayyoubzadeh, 1997). در این حالت به دلیل اختلاف قابل توجه سرعت و تنش برشی بستر در مجرای اصلی رودخانه نسبت به دشت‌های سیلابی، فرض یک‌بعدی بودن جریان بسیار ساده‌انگارانه بوده و نتایج محاسبات پارامترهای رسوبی توام با خطا خواهد بود. محدودیت فوق برای محاسبه نرخ انتقال بار بستر در رودخانه‌ها آشکارتر است. پارامترهای زیادی از قبیل عمق جریان، دانه‌بندی رسوب، و تنش برشی بستر بر نرخ انتقال بار بستر موثر می‌باشند. در عرض رودخانه‌ها، عمق جریان و تنش برشی بستر ممکن است با تغییرات زیادی همراه باشد که در این صورت استفاده از معادلات تجربی انتقال بار بستر با محدودیت مواجه خواهد بود. برای کاهش

جریان در اطراف سازه‌ها مثل پایه پل‌ها (Omara et al., 2014)، دهانه‌های آبگیرها (Aybar, 2012)، آبشکن‌ها (Eslami, 2019; Chonwattana et al., 2007) و ... به فراوانی و با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کاربرد این مدل‌ها برای رودخانه‌های واقعی با طول زیاد نیز به صورت محدود گزارش شده است. از دلایل مهم این محدودیت، پیچیدگی‌های محاسباتی، زمان بسیار طولانی اجرای مدل‌های سه‌بعدی برای رودخانه‌های عریض و طولانی، صعوبت تعیین شرایط مرزی و نیز موارد مرتبط با واسنجی این مدل‌ها در بازه‌های طولانی رودخانه‌ها را می‌توان ذکر نمود. از طرف دیگر، مدل‌های ریاضی یک‌بعدی متداول در مباحث هیدرولیک جریان و رسوب مثل HEC-RAS، MIKE-11، و ISIS و ... طبیعت غیریکنواخت و نامنظم رودخانه‌ها را به فرم یک‌بعدی تحلیل نموده و از تغییرات عرضی یا عمقی پارامترهای مهمی مثل سرعت جریان، غلظت رسوب، تنش برشی و ... صرف نظر می‌کنند. این محدودیت در بعضی از شرایط برای رودخانه‌ها قابل قبول نیست. مثلاً در زمان وقوع سیلاب که جریان از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود، پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در عرض رودخانه دارای تغییرات قابل توجهی بوده و تحلیل آنها بر اساس مدل‌های یک‌بعدی، با عدم قطعیت زیادی همراه است. به همین دلیل، در مدل رسوبی GSTARS که بر اساس مبانی و معادلات حاکم بر جریان‌های یک‌بعدی مثل معادله انرژی توسعه داده شده است، قابلیت‌ها به نام لوله‌های جریان اضافه شده است. به کمک لوله‌های جریان، تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی در عرض رودخانه قابل شبیه‌سازی است.

با توجه به محدودیت‌های مدل‌های ریاضی یک‌بعدی و چندبعدی (دو بعدی و سه بعدی)، محققان مدل‌های ریاضی شبه-دو بعدی (مدل‌های حدوسط یا میانبر) زیادی را برای رفع این محدودیت‌ها ارائه نموده‌اند. پایه و اساس مدل‌های شبه‌دو بعدی بر مبنای معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس است و این یک مزیت مهم نسبت به مدل به ظاهر شبه‌دو بعدی GSTARS است. بر اساس طبیعت رودخانه‌ها که جریان عموماً آشفتنه بوده و ذرات آب در عمق جریان دائماً در حال تبادل انرژی و مومنوم می‌باشند، از مفهوم مهمی بنام متوسط عمقی استفاده شده و تغییرات عمقی پارامترهای هیدرولیکی مثل سرعت، تنش و ... را فقط با یک مقدار متوسط در عمق شبیه‌سازی می‌کنند. در عین حال، تغییرات این پارامترها در عرض رودخانه را به صورت کامل در نظر می‌گیرند که با شرایط رودخانه‌های سیلابی کاملاً همخوانی دارد. تاکنون مدل‌های متوسط در عمق زیادی در زمینه مباحث مهندسی رودخانه و سیلاب توسط محققین ارائه شده است. از

دشوار و زمان بر بوده و عموماً از فرم‌های ساده شده آنها استفاده می‌شود. در رودخانه‌های طبیعی شرایط جریان عموماً آشفته بوده و بنابراین توزیع عمقی سرعت جریان نسبت به توزیع عرضی سرعت (به ویژه در رودخانه‌های عریض و همراه با دشت‌های سیلابی)، از یکنواختی بیشتری برخوردار است. در این شرایط می‌توان از فرم متوسط در عمق یا شبه‌دوبعدی معادلات ناویر-استوکس استفاده نمود. با ترکیب معادلات پیوستگی و مومنوم ناویر-استوکس در جهت جریان برای یک آبراهه مستقیم یا پیچانرود، معادله زیر حاصل می‌شود (Darby, 1998; Bousmar, 2002):

$$\rho g S_{0x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho u' u') + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho u' v') + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho u' w') = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) \right)$$

که در آن u ، v و w به ترتیب سرعت‌های متوسط زمانی در جهت طولی، عرضی و قائم، u' ، v' و w' نوسانات سرعت (مازاد بر سرعت متوسط جریان) به علت تلاطم و آشفتگی جریان به ترتیب در جهت طولی، عرضی و قائم، P فشار هیدرواستاتیک، t زمان، x جهت طولی، y جهت عرضی، z جهت قائم، ρ چگالی سیال، S_{0x} شیب طولی بستر آبراهه و g شتاب ثقل می‌باشند. Shiono and Knight (1991) با فرض جریان ماندگار و یکنواخت، معادله دیفرانسیلی زیر را برای حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها ارائه نمودند:

$$\rho g S_{0x} + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho u' v') + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho u' w') = \rho \left(\frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) \right)$$

با انتگرال‌گیری از معادله دیفرانسیلی فوق در عمق جریان و نیز صرفنظر کردن از سرعت‌های w ، رابطه زیر که به معادله متوسط در عمق تنش برشی موسوم است ظاهر خواهد شد:

$$\rho g H S_{0x} + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yx}) - \tau_b \sqrt{1 + \frac{1}{S_{0y}^2}} = \frac{\partial}{\partial y} \{ H (\rho uv)_d \}$$

که در معادله دیفرانسیل فوق، H عمق جریان در هر نقطه از عرض رودخانه (شکل ۱)، s_{0y} شیب جانبی رودخانه (افقی به قائم) و زیرنویس d در جمله جریان‌های ثانویه بیانگر متوسط عمقی است. جملات اول تا سوم در معادله فوق به ترتیب بیانگر مولفه وزن سیال در جهت جریان، تنش برشی رینولدزی ناشی از

عدم قطعیت‌ها و بهبود نتایج محاسبات، می‌توان از تلفیق مدل‌های ریاضی شبه‌دوبعدی (مثل مدل شیونو و نایت) و روابط تجربی انتقال بار بستر استفاده نمود. در این صورت ابتدا عرض رودخانه به چند زیربازه (مثلاً ۱۰ یا ۲۰) تقسیم شده و با حل مدل ریاضی شبه‌دوبعدی، سرعت جریان و تنش برشی بستر در هر زیربازه محاسبه می‌شود. سپس برای هر زیربازه با عمق، سرعت و تنش برشی بستر مشخص، معادله تجربی انتقال بار بستر مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از مجموع دبی‌های بار بستر این زیربازه‌ها، بار کل بستر رودخانه بدست می‌آید.

تاکنون از مدل‌های شبه‌دوبعدی برای محاسبه دبی رسوب معلق و بار بستر رودخانه‌ها به صورت محدود 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. Gholinejad et al. (2018) به کمک این مدل، دبی بار معلق رودخانه قره‌سو در استان گلستان را محاسبه نمودند. Zahiri et al. (2019) نیز با استفاده از این مدل شبه‌دوبعدی، بار کل رسوب رودخانه قره‌سو را مدل‌سازی نمودند. نکته مهم در خصوص مطالعات فوق این است که در تمامی موارد فوق، روش تفاضل‌های محدود برای حل عددی مدل شیونو و نایت انتخاب شده است. همچنین دقت نتایج بار رسوب در حالت‌های یک‌بعدی و 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 رودخانه مورد مقایسه قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق، تحلیل هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه زارم‌رود (یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه تجن واقع در شهرستان ساری) است. به این منظور، برای محاسبه پارامترهای هیدرولیک جریان از یک مدل ریاضی شبه‌دوبعدی موسوم به Shiono and Knight (1991) استفاده و سپس نتایج این مدل با روابط رسوبی معتبر سایر محققین تلفیق شده است.

مواد و روش‌ها

مدل ریاضی شیونو و نایت

هیدرولیک جریان در رودخانه‌های طبیعی و به ویژه در شرایط سیلاب دارای ساختار پیچیده‌ای بوده و با معادلات معمول یک-بعدی (از قبیل روابط مانینگ و شزی) با دقت مناسبی قابل بیان نیست. به همین دلیل، اغلب از معادلات ناویر-استوکس برای تحلیل هیدرولیک جریان در رودخانه‌های سیلابی استفاده می‌شود. حل کامل این معادلات برای رودخانه‌های طبیعی بسیار

(Knight et al., 1989; Wark et al., 1990; Abril and Knight, 2004) برآورد شده است.

با جاگذاری روابط (۴) و (۵) در معادله دیفرانسیلی (۳) و نیز با فرض اثر جریان‌های ثانویه به صورت ضریبی از مولفه وزن سیال، رابطه مهم زیر بدست می‌آید (Shiono and Knight, 1991):

(رابطه ۶)

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

در معادله فوق، β_s ضریب جریان ثانویه است. جریان‌های ثانویه در قوس رودخانه‌ها دارای اهمیت بوده و حتماً باید در نظر گرفته شوند (Ervin et al., 2000). در رودخانه‌های طبیعی مستقیم، جریان‌های ثانویه دارای اهمیت کمتری هستند (Shiono and Knight, 1991; Da Silva, 2006). مقدار این ضریب در رودخانه‌ها حدود ۰/۱۵ است (Shiono and Knight, 1991).

معادله دیفرانسیلی فوق که به مدل متوسط در عمق شیونو و نایت معروف است، قابلیت حل پروفیل سرعت جریان در عرض رودخانه را دارد که از نظر مهندسی رودخانه، اقدام مهمی برای محاسبه دبی جریان، تنش برشی بستر، دبی انتقال رسوب و ... است.

اختلاف یا گرادیان سرعت‌ها در جهت عرضی (τ_{yx})، و تنش برشی بستر (τ_b) می‌باشند. جمله سمت راست تساوی نیز اثرات جریان‌های ثانویه (ناشی از سرعت v) را نشان می‌دهد.

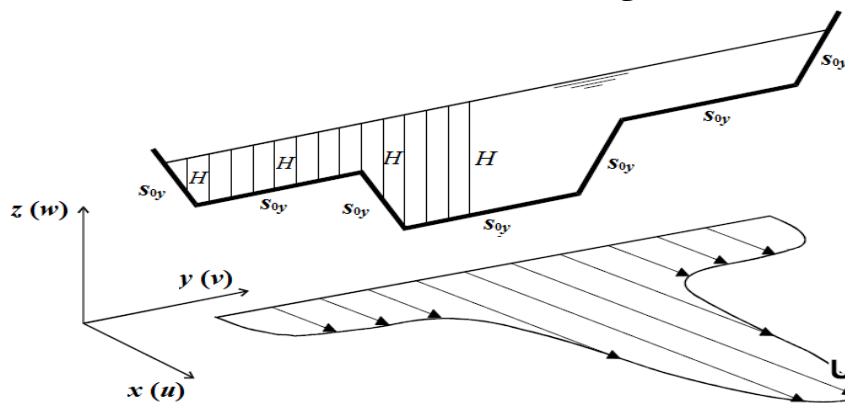
معادله دیفرانسیل فوق با وجود سادگی دارای دشواری‌های زیادی برای کاربرد در مسائل مهندسی رودخانه، رسوب و سیلاب است. بهترین راه برای حل این مشکل، تبدیل جملات تنش برشی به پارامتر اصلی جریان یعنی سرعت است. برای این منظور از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\tau_b = \gamma R S_f = \rho \frac{f}{8} u_d^2; \quad \tau_{yx} = \rho u_t \frac{du_d}{dy} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که γ وزن مخصوص سیال، R شعاع هیدرولیکی جریان، S_f شیب انرژی، f ضریب اصطکاک داری-ویسباخ و u_t لزجت گردابه‌ای یا دیفیوژن تلاطمی جریان است که به منظور دخالت اثر تبادل مومنوم ناشی از نوسانات سرعت (u' و v') بکار رفته است. لزجت گردابه‌ای در جریان‌های کم‌عمق مثل رودخانه‌ها و سواحل، طبق قانون بوسینسک از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$u_t = \lambda H u^* = \lambda H \left(\sqrt{\frac{f}{8}} u_d \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که u^* سرعت برشی یا اصطکاک‌کی و λ ضریب بدون بعد لزجت تلاطمی است. این ضریب برای کانال‌های عریض حدود ۰/۱۳۵ (رودی، ۱۹۸۰)، برای کانال‌های آزمایشگاهی حدود ۰/۱۶ (Bousmar, 2004) و برای رودخانه‌های طبیعی حدود ۰/۰۷-۰/۰۳ است.



شکل ۱- توزیع عرضی سرعت در جهت جریان در یک رودخانه سیلابی

(Knight, 1991; Knight et al., 1989) و روش تفاضل‌های محدود (Kordi et al., 2015; Zahiri et al., 2019) ارائه شده است. با توجه به قابلیت مناسب روش اجزاء محدود در حل مسایل پیچیده هیدرولیک جریان، در این مقاله از روش اجزاء محدود برای حل عددی این معادله و محاسبه پروفیل عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها استفاده شده است. همچنین روش اجزاء محدود نسبت

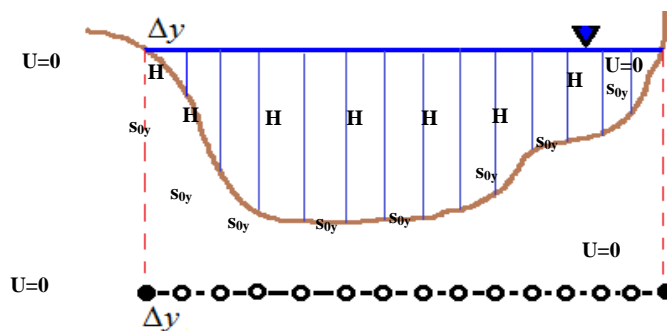
معادله دیفرانسیل (۶) دارای ۳ ضریب واسنجی (β_s, λ, f) است که باید به کمک داده‌های پروفیل عرضی سرعت مشاهداتی در رودخانه‌ها و بر اساس یک روش بهینه‌سازی بدست آیند. این معادله از نوع معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی مرتبه دوم با شرایط مرزی است. برای حل این معادله در کانال‌ها و رودخانه‌های طبیعی، روش‌های متفاوتی از قبیل روش تحلیلی (Shiono and

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

شرایط مرزی برای حل عددی معادله دیفرانسیل فوق با توجه به شکل (۲)، به این صورت است که سرعت جریان در اولین و آخرین گره محاسباتی (لبه سطح آب در دیواره‌های سمت چپ و راست رودخانه) برابر صفر است:

$$U(y_0) = U(y_N) = 0 \quad (\text{رابطه ۹})$$

گام دوم در حل اجزاء محدود، تقسیم‌بندی محدوده یا میدان حل (عرض رودخانه) به بازه‌هایی است که در نقاطی به نام گره به هم متصل می‌باشند. در شکل (۲)، نحوه این تقسیم‌بندی ارائه شده است. برای هر بازه e ، گره‌های i و j گره‌های تشکیل‌دهنده بازه می‌باشند. با توجه به اینکه مدل شیونو و نایت یک مدل متوسط در عمق است، گسسته‌سازی بازه حل در تراز سطح آب انجام می‌شود.



شکل ۲- تقسیم‌بندی عرض مقطع رودخانه به گره‌های محاسباتی برای محاسبه توزیع عرضی سرعت

در گام سوم، باید یک حل تقریبی برای معادله دیفرانسیل (۱۳) در نظر گرفت. در این تحقیق، حل تقریبی به صورت معادله- (۱۴) در نظر گرفته شده است:

$$U^{(e)}(y) = \sum_{j=0}^n h_j N_j^{(e)} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در این معادله، تابع $N_j^{(e)}$ شکل و h پارامتر مجهول واقع در هر گره شبکه می‌باشند. با استفاده از روش باقی‌مانده وزن‌دار گالرکین، به منظور کمینه کردن خطای حل تقریبی، حل معادله- (۱۴) منجر به تشکیل سیستم معادلاتی به فرم $[K]\{a\}=\{F\}$ می‌شود که:

$$K_{i,j}^{(e)} = \int_{(e)} \frac{\partial N_i^{(e)}}{\partial y} \alpha \frac{\partial N_j^{(e)}}{\partial y} dy - \int_{(e)} N_i^{(e)} \beta N_j^{(e)} dy$$

به روش تفاضل‌های محدود دارای کارایی بیشتری است و انعطاف- پذیری شبکه‌بندی میدان حل را افزایش می‌دهد. در این روش برای محاسبه مقادیر سرعت جریان در هر نقطه از عرض رودخانه، نیازی به درونیابی از مقادیر سرعت محاسباتی نیست و مقدار سرعت در هر نقطه دلخواه به کمک توابع موجود قابل محاسبه است.

روش اجزاء محدود برای حل عددی معادله شیونو و نایت

برای استفاده از روش اجزاء محدود، ابتدا فرض می‌شود که تمامی ضرایب معادله دیفرانسیل (۶) فقط به فاصله عرضی y وابسته هستند. در این صورت به کمک تغییر متغیر زیر، معادله حاکم به یک معادله خطی تبدیل خواهد شد:

$$U(y) = u_d^2(y) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$(\text{رابطه ۸})$$

با توجه به این که در مقاطع رودخانه‌ای مقادیر H ، f و s_{0y} برای هر بازه متفاوت می‌باشند، این مقادیر برای هر بازه e به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{H}^{(e)} = \frac{H_i + H_j}{2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$\bar{f}^{(e)} = \frac{f_i + f_j}{2} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\frac{1}{s_{0y}^{(e)}} = \left| \frac{y_j - y_i}{H_j - H_i} \right| \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

با توجه به معادلات (۱۰) تا (۱۲)، معادله دیفرانسیل (۸) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$(\text{رابطه ۱۳})$$

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

$$F_i^{(e)} = - \int_{(e)} N_i^{(e)} q dy \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

در این معادلات مقادیر α ، β و q به ترتیب از معادلات (۱۷) تا (۱۹) بدست می‌آیند:

$$\alpha = \frac{\rho}{2} \lambda (\bar{H}^{(e)})^2 \sqrt{\frac{\bar{f}^{(e)}}{8}} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$\beta = -\rho \frac{\bar{f}^{(e)}}{8} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{s_{0y}^{(e)}}\right)^2} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$q = \frac{\partial}{\partial y} \left[\bar{H}^{(e)} (\rho \overline{UV})_d \right] - \rho g \bar{H}^{(e)} S_{0x} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

در نهایت شرایط مرزی (معادله ۹) اعمال شده و سپس سیستم ماتریسی معادلات بسته خواهد شد. در این صورت ماتریس مجهولات a (سرعت‌های جریان در عرض رودخانه) به صورت همزمان محاسبه خواهند شد.

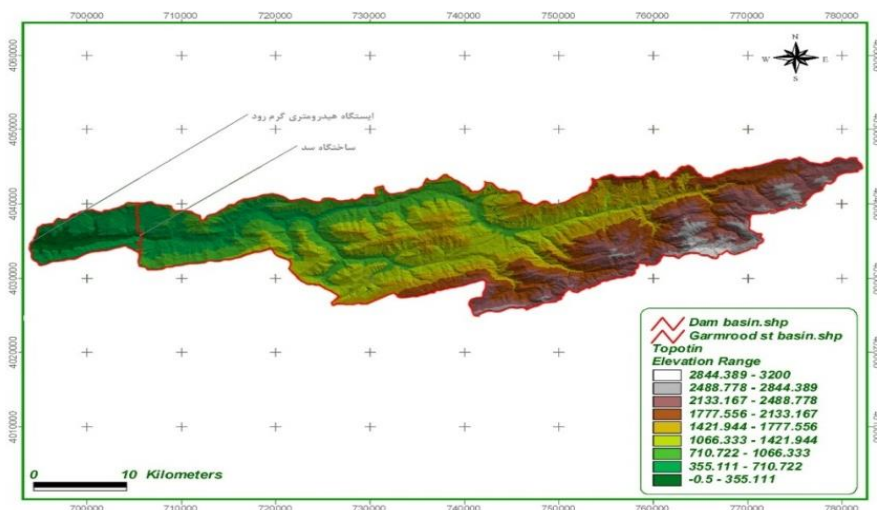
منطقه مورد مطالعه

رودخانه ظالم‌رود (زارم‌رود)

رودخانه زارم‌رود با طول ۱۲۰ کیلومتر از ارتفاعات ۲۵۰۰ متری کوه‌های گل‌دین و سیاه‌خانی در شمال شهرستان دامغان سرچشمه می‌گیرد و نهایتاً در محلی به نام گرم‌رود به رودخانه تاجن ملحق شده و به دریای خزر راه می‌یابد. حوضه رودخانه زارم‌رود با مساحت ۸۹۳/۵ کیلومترمربع، 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 برثانیه است. موقعیت این حوضه در استان مازندران و نیز نقشه توپوگرافی (ارتفاعی) آن در شکل‌های (۳ و ۴) نشان داده شده است. در شکل (۵) نیز نمایی از ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود نمایش داده شده است.



شکل ۳- موقعیت رودخانه زارم‌رود در استان مازندران



شکل ۴- نقشه DEM حوضه رودخانه مورد مطالعه



شکل ۵- ایستگاه هیدرومتری گرمرود

داده‌های هیدرولیکی و رسوبی مورد استفاده

در این مقاله از داده‌های توزیع عرضی سرعت و بار بستر اندازه-گیری شده در رودخانه زارم رود در ایستگاه هیدرومتری گرمرود استفاده شده است (Sheikhpour, 2014). سرعت جریان توسط دستگاه سرعت‌سنج (مولینه آلمانی مدل OTT) و دبی بار بستر

توسط نمونه‌بردار هلی-اسمیت اندازه‌گیری شده است. در جدول (۱) خلاصه‌ای از اطلاعات هیدرولیکی و رسوبی داده‌های اندازه-گیری نشان داده شده است. این داده‌ها در زمان سیلاب‌های رخ داده در این رودخانه طی سال‌های ۱۳۹۳-۱۳۹۱ و نیز یکی از سیل‌های ۱۳۹۸ برداشت شده‌اند.

جدول ۱- خلاصه اطلاعات هیدرولیکی و هندسی داده‌های مورد استفاده

شیب متوسط	قطر d_{90} (mm)	قطر d_{50} (mm)	دبی بار بستر (gr/s)	عرض سطح آزاد آب (m)	دبی جریان (m^3/s)	شعاع هیدرولیکی (m)	سرعت جریان (m/s)	
۰/۰۰۸	۱۹/۷۵	۳/۶	۱۱۷/۸	۹/۸	۱۷/۳	۰/۵	۱/۲	حداقل
	۸۹/۷	۳۸/۵	۹۶۹۳/۳	۳۶	۱۰۴/۲	۱/۳	۲/۲	حداکثر

فرمول‌های تجربی تخمین بار بستر رودخانه‌ها

یکی از رایج‌ترین روش‌های برآورد بار بستر در رودخانه‌ها، استفاده از فرمول‌های تجربی-هیدرولیکی می‌باشد که در طول سال‌های گذشته توسط محققین توسعه داده شده است. در این تحقیق علاوه بر نمونه‌برداری‌هایی که انجام شد، رایج‌ترین فرمول‌های محاسبه باربستر مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت بهترین

فرمول برای رودخانه مورد نظر ارائه شده است. در این پژوهش از ۱۷ فرمول رایج برآورد بار بستر رودخانه 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 ایکرز-وایت استفاده شد که نمونه‌ای از این فرمول‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- نمونه‌ای از فرمول‌های رایج محاسبه باربستر

فرمول	محققین
$q_b = 0.053d_{50}^{1.2} \sqrt{(G_s - 1)g} \frac{\left[\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right]}{\left[\frac{(G_s - 1)g}{v^2} \right]^{0.1}}$	ون‌راین
$q_b = 8 \left[(G_s - 1)g \right]^{0.5} \cdot d_{50}^{1.5} (\theta \tau_* - 0.047)^{1.5}$	میر-پیتر و مولر
$q_b = 0.18d_{50}^{-0.75} \tau_b (\tau_b - \tau_c)$	دوبوی
$q_b = 2500S_o^{1.5} \left(q - \frac{0.6d^{1.5}}{S_o^{1.17}} \right)$	شاکلیچ
$q_b = 11.2\rho_s \sqrt{g(G_s - 1)d_{50}^3} \left(\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} - 0.03 \right)^{4.5} \left/ \left(\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} \right)^3 \right.$	پارکر
$q_b = 11.6\rho_s \sqrt{g(G_s - 1)d_{50}^3} \left(\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}} - 0.05 \right) \left(\sqrt{\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma)d_{50}}} - 0.156 \right)$	انگلووند-فردسو

که q_b دبی بار بستر در واحد عرض رودخانه، d_{50} قطر میانه رسوبات بار بستر، G_s چگالی ویژه رسوبات رودخانه، τ_c تنش برشی بحرانی (از دیاگرام شیلدز و بر اساس مقادیر عدد رینولدز ذره و عدد بدون بعد شیلدز بدست می‌آید)، θ ضریب لزجت سینماتیک آب، γ_s وزن مخصوص رسوب و ρ_s جرم حجمی رسوب می‌باشد.

ریشه میانگین مربعات خطا نیز به صورت زیر استفاده شده است:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_c - Q_m)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۲۳})$$

نتایج و بحث

مدل‌سازی یک‌بعدی بار بستر

تمامی ۱۷ رابطه بار بستر مورد استفاده در این مقاله در نرم‌افزار اکسل برنامه‌نویسی شد و نتایج آنها به ازاء دبی‌های جریان در ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود محاسبه شد. در شکل (۶) این نتایج در مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان داده شده است.

در شکل فوق مشخص است که روابط دوبوی، فرایلینک و میر-پیتر و مولر نسبت به بقیه روابط رسوبی دارای مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهداتی بوده و این مطابقت بهتر در تمام محدوده دبی جریان قابل مشاهده است که مزیت مهمی بشمار می‌رود. نتایج بررسی دقت روابط تجربی انتقال بار بستر بر اساس شاخص‌های رسوبی در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس 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. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای این ۳ رابطه به ترتیب حدود ۵/۲۵، ۹/۵۹ و ۲۱/۵۷ بدست آمد. علت همخوانی بهتر داده‌های

شاخص‌های تعیین بهترین رابطه برآورد بار بستر

برای مقایسه نتایج محاسبات بار بستر بدست آمده از فرمول‌های مختلف و انتخاب بهترین روش محاسبه بار بستر رودخانه از شاخص‌های ذیل استفاده می‌شود:

نسبت اختلاف یا ناجوری (R)

این شاخص بر اساس نسبت بار بستر بدست آمده از فرمول‌های تجربی (Q_c) به بار بستر اندازه‌گیری شده در رودخانه (Q_m) بدست می‌آید. هر چه این نسبت به مقدار واحد نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقت بالاتر فرمول تجربی است.

$$R = \frac{Q_c}{Q_m} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

میانگین و انحراف معیار نسبت ناجوری

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

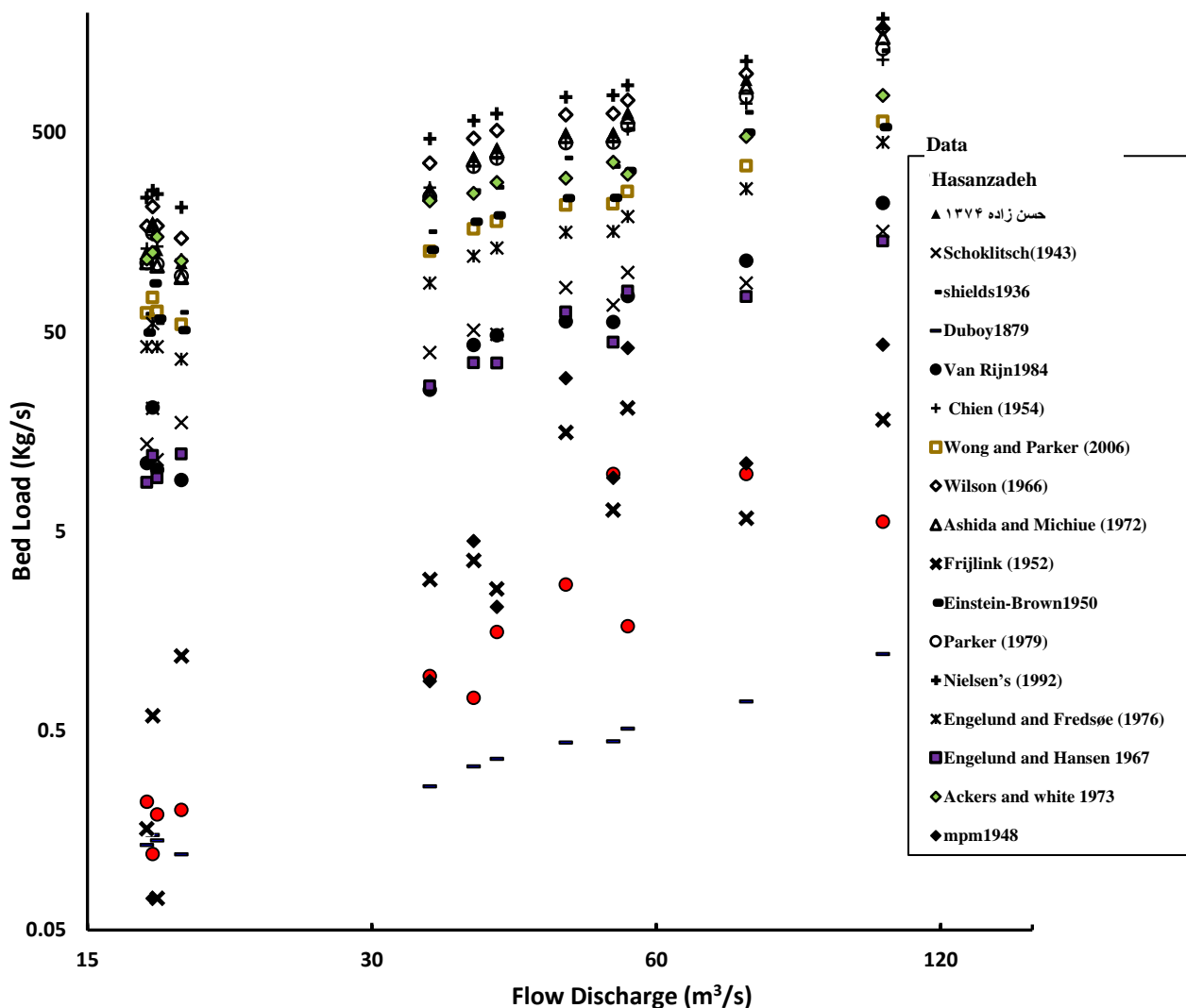
$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}{N - 1}} \quad (\text{رابطه ۲۲})$$

که در این روابط، i و N به ترتیب بیانگر هر یک از نمونه‌ها و کل نمونه‌ها است. علاوه بر شاخص‌های فوق، از شاخص آماری

اغلب روابطی که در این مقاله دارای نتایج نامناسبی بوده‌اند، در محدوده دانه‌بندی ریزتری نسبت به دانه‌بندی بار بستر رودخانه زارم رود توصیه شده‌اند. مثلاً رابطه ایکرز-وایت برای دانه‌بندی ۴/۹۴-۴/۰۴ میلی‌متر توصیه شده است در حالی که قطر میانه دانه-بندی بار بستر رودخانه زارم رود در محدوده ۳۸/۵-۳/۶ میلی‌متر متغیر است. این در حالی است که دانه‌بندی توصیه شده برای رابطه میر-پیتر و مولر در محدوده ۲۸/۶۵-۰/۴ میلی‌متر است که به دانه‌بندی رودخانه زارم رود بسیار نزدیک‌تر است. (ج) رابطه فرایلینگ که در این مقاله دارای نتایج مناسبی بود، از برآش ساده داده‌های مشاهداتی با نتایج محاسباتی رابطه میر-پیتر و مولر استخراج شده است و با توجه به نتایج مناسب رابطه مذکور، احتمالاً به همین دلیل رابطه فرایلینگ نیز کارایی مناسبی در رودخانه زارم رود داشته است.

مشاهداتی بار بستر رودخانه زارم رود با روابط فوق را می‌توان در ۳ عامل جستجو نمود: الف) در روابط تجربی بار بستر، ۲ نوع دانه‌بندی رسوبات قابل استفاده است (دانه‌بندی بار بستر و دانه-بندی مصالح بستر رودخانه) که روابط مختلف نسبت به این مساله حساسیت دارند (Haddadchi et al., 2013) در این مقاله از دانه‌بندی بار بستر برای محاسبات روابط تجربی انتقال رسوب استفاده شد. روابط تجربی دوبوی، میر-پیتر و مولر، و فرایلینگ که در این مطالعه بهترین مطابقت را با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند، همگی برای حالتی که از دانه‌بندی بار بستر در روابط تجربی استفاده شود، نتایج بهتری نسبت به مقادیر مشاهداتی ارائه می‌دهند، در حالی که روابطی مثل اینشتین-براون که در این مقاله دارای نتایج مناسبی نبوده است، در حالت استفاده از دانه‌بندی مصالح کف رودخانه نتایج بهتری ارائه می‌کند. ب) با بررسی شرایط و دامنه کارکرد روابط تجربی بار بستر مشخص شد که



شکل ۶- نتایج برآورد بار بستر رودخانه زارم رود در ایستگاه گرمود با استفاده از روابط تجربی بار بستر

جدول ۳- رتبه‌بندی روش‌های برتر برآورد بار بستر بر اساس شاخص‌های رسوبی ارائه شده

روابط تجربی	$0.5 < R < 2$	$0.23 < R < 3$	\bar{R}	σ
دوبوی	۳۳/۳۳	۴۱/۶۷	۰/۴۱	۰/۳۴
فراپلینک	۳۳/۳۳	۴۱/۶۷	۳/۶۹	۳/۴۶
میر-پیتر و مولر	۴۱/۶۷	۴۱/۶۷	۴/۵۵	۷/۲۳
انگلوند- هانسن	.	.	۳۸/۱۴	۲۵/۹۵
ون‌راین	.	.	۴۶/۹۷	۴۳/۴۱
شوکلچ	.	.	۵۵/۰۳	۴۴/۲۴
انگلوند- فردسو	.	.	۱۴۱/۰۷	۱۱۹/۶۹
ونگ- پارکر	.	.	۱۹۷/۶۵	۱۶۵/۷۳
انیشتین- براون	.	.	۲۰۵/۶۴	۱۸۶/۳۴
شیلدز	.	.	۲۷۹/۰۷	۲۴۶/۶۰
ایکرز- وایت	.	.	۳۵۰/۴۸	۳۱۷/۶۵
پارکر	.	.	۳۸۸/۸۹	۳۳۴/۶۵
آشیدا- میشیو	.	.	۴۱۰/۸۴	۳۶۰/۷۷
چین	.	.	۴۱۱/۷۷	۳۴۴/۴۸
حسن‌زاده	.	.	۴۴۹/۳۲	۳۸۱/۱۸
ویلسون	.	.	۵۵۳/۸۰	۴۶۷/۶۴
نیلسون	.	.	۷۱۳/۵۵	۵۹۳/۷۷

مدل‌سازی شبه دوبعدی

شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان

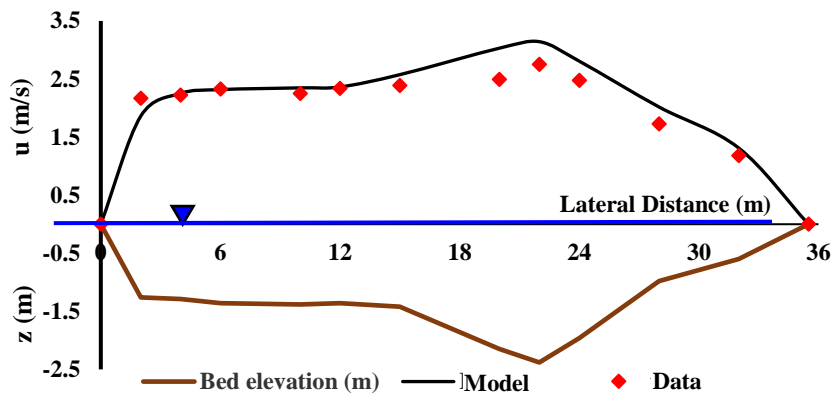
همانطور که قبلاً اشاره شد، برای حل عددی مدل ریاضی شیونو و نایت از روش اجزاء محدود استفاده شد. به این منظور، در محیط نرم‌افزار متلب (نسخه ۷/۶) برنامه‌نویسی انجام شد.

الف- واسنجی مدل ریاضی بر اساس توزیع عرضی سرعت

برای شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان، اطلاعات هیدرولیکی رودخانه زارم‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود شامل هندسه مقطع عرضی، تراز یا اشل سطح آب رودخانه و شیب آبراهه به مدل ریاضی معرفی شد. نکته حائز اهمیت در این مرحله، واسنجی ضریب زبری مانینگ است. مقدار این ضریب در رودخانه‌ها برای مدل‌های ریاضی یک‌بعدی معمولاً بر اساس قضاوت کارشناسی و یا با استناد به منابع و مراجع علمی مختلف و به صورت تقریبی تعیین می‌گردد. این در حالی است که مقدار این ضریب برای مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی دارای اهمیت زیادی بوده و برآورد آن صرفاً با راهکارهای فوق نتیجه-بخش نخواهد بود. به همین منظور، در این شرایط مقدار این ضریب باید به کمک مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت جریان در رودخانه واسنجی شود. در این تحقیق با اندازه‌گیری مقادیر سرعت‌های نقطه‌ای به کمک دستگاه سرعت‌سنج (مولینه)، مقدار نسبتاً دقیق ضریب زبری مانینگ در رودخانه برای دو عمق مختلف جریان (تراز سطح آب ۱۲۸ و ۹۸) واسنجی شد. برای افزایش دقت نتایج و سرعت محاسبات، از روش بهینه‌سازی

گرادیان کاهشی تعمیم یافته غیرخطی^۱ استفاده شد.

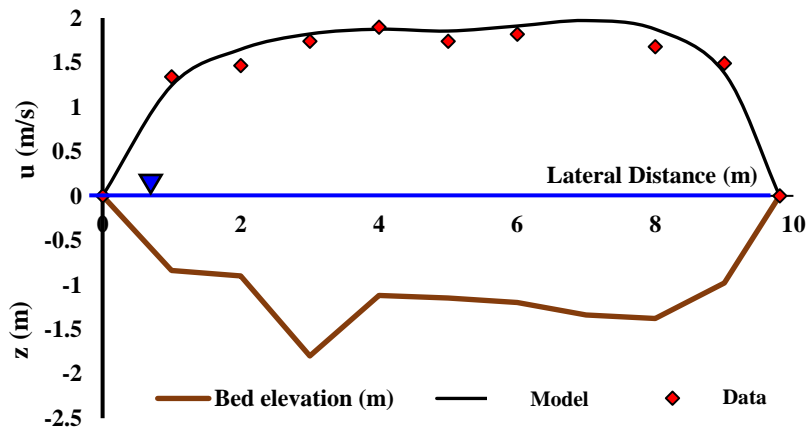
بخشی از نتایج بدست آمده از محاسبات مرحله واسنجی برای تراز سطح آب ۱۲۸ (سیلاب مورخ ۹۱/۷/۲۲) در شکل (۷) و در مقایسه با توزیع واقعی سرعت جریان ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع عرضی سرعت جریان حاصل از مدل ریاضی در کل عرض رودخانه مطابقت نسبتاً خوبی با مقادیر سرعت-های اندازه‌گیری شده دارد. خطای مطلق میانگین سرعت‌های بدست آمده از مدل ریاضی حدود ۷/۹ درصد می‌باشد. مسئله مهم این است که این انطباق فقط با تنظیم ضریب زبری مانینگ رودخانه ایجاد شده 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. همچنین در این مرحله، محاسبات مربوط به تراز سطح آب ۹۸ سانتیمتر (سیل مورخ ۹۳/۱/۱۲) نیز انجام شد. خطای مطلق میانگین سرعت‌ها برای این تراز سطح آب، حدود ۵/۶ درصد بدست آمد. 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. در مرحله واسنجی مدل ریاضی، ضریب زبری مانینگ بهینه در هر دو واقعه سیلابی فوق‌الذکر حدود ۰/۰۴۵ بدست آمد که این مقدار با توجه به درشت‌دانه بودن مصالح کف این رودخانه منطقی است.



شکل ۷- مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در مرحله واسنجی (سیلاب با اشل ۱۲۸)

مشاهده می‌شود در این مرحله نیز دقت مدل ریاضی در تمام عرض رودخانه نسبتاً مناسب است. حداکثر و میانگین خطای مطلق برآورد سرعت‌های جریان در این مرحله به ترتیب حدود ۱۳ و ۴/۵ درصد محاسبه شده است. دبی‌های جریان مشاهداتی و محاسباتی نیز به ترتیب ۳۸/۴۴ و ۳۹/۶۴ مترمکعب بر ثانیه بدست آمده است که بیانگر خطایی حدود ۳/۱۲ درصد می‌باشد.

ب- صحت‌سنجی مدل ریاضی بر اساس توزیع عرضی سرعت برای اطمینان از صحت نتایج واسنجی، معمولاً آزمونی به نام صحت‌سنجی نیز استفاده می‌شود. در این مرحله، از همان ضریب زبری بهینه در مرحله واسنجی مدل ریاضی استفاده شده و مدل برای تراز سطح آب متفاوتی اجرا می‌شود. نتایج این مرحله در شکل (۸) به ازاء تراز سطح آب ۹۸ سانتیمتر نشان داده شده است.



شکل ۸- مقایسه نتایج مدل ریاضی و مقادیر واقعی توزیع عرضی سرعت در مرحله صحت‌سنجی (سیلاب با اشل ۹۸)

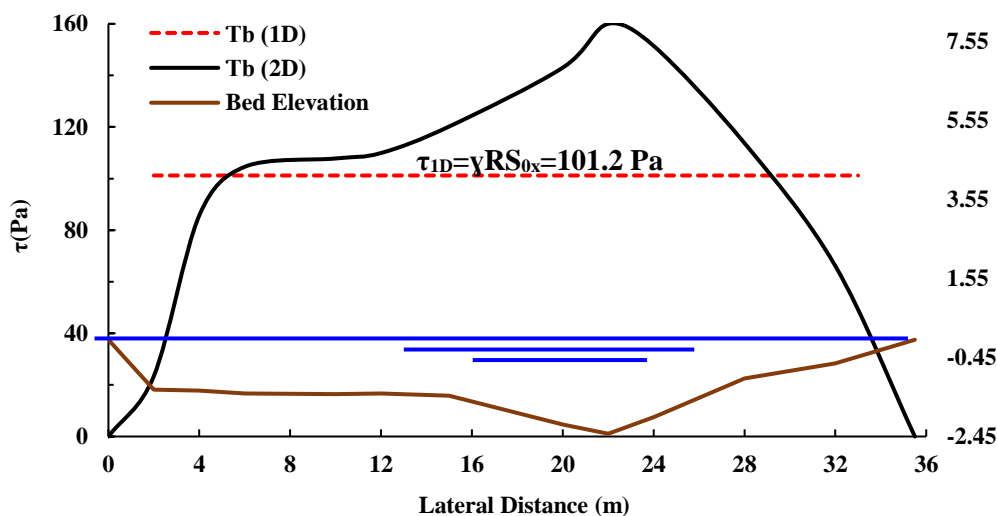
برای رودخانه مورد مطالعه و به ازاء شرایط جریان نشان داده شده در شکل‌های (۷ و ۸)، توزیع عرضی تنش برشی بستر (رابطه ۲۰) محاسبه شده و در شکل‌های (۹ تا ۱۰) ارائه شده است. در این شکل‌ها، تنش برشی متوسط (یک‌بعدی) رودخانه نیز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش برشی متوسط با توزیع عرضی تنش برشی نسبتاً زیادی دارد که این اختلاف تقریباً در محدوده میانی جریان بیشتر است. همان‌طور که در شکل (۹) قابل مشاهده است، تنش برشی متوسط بستر بدست آمده از روش معمول (رابطه $\tau_{ID} = \gamma R S_{0x}$) حدود ۱۰۱ پاسکال است در صورتی‌که تنش برشی دوبعدی بدست آمده از مدل شیونو و نایت در عرض رودخانه متفاوت بوده و در محدوده

شبیه‌سازی توزیع عرضی تنش برشی بستر همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فرمول‌های تخمین بار بستر، پارامتر تنش برشی بستر دارای اهمیت بسزایی است. این در حالی است که عموماً تخمین دقیق این پارامتر در رودخانه‌ها غیرممکن بوده و اندازه‌گیری آن نیز مشکل و با محدودیت‌های زیادی مواجه است. به همین دلیل ارائه راهکاری ساده برای تخمین مناسب این پارامتر ارزشمند است. در این پژوهش، بر مبنای سرعت‌های بدست آمده از حل معادله دیفرانسیلی (۹) در عرض رودخانه، تنش برشی بستر در هر نقطه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

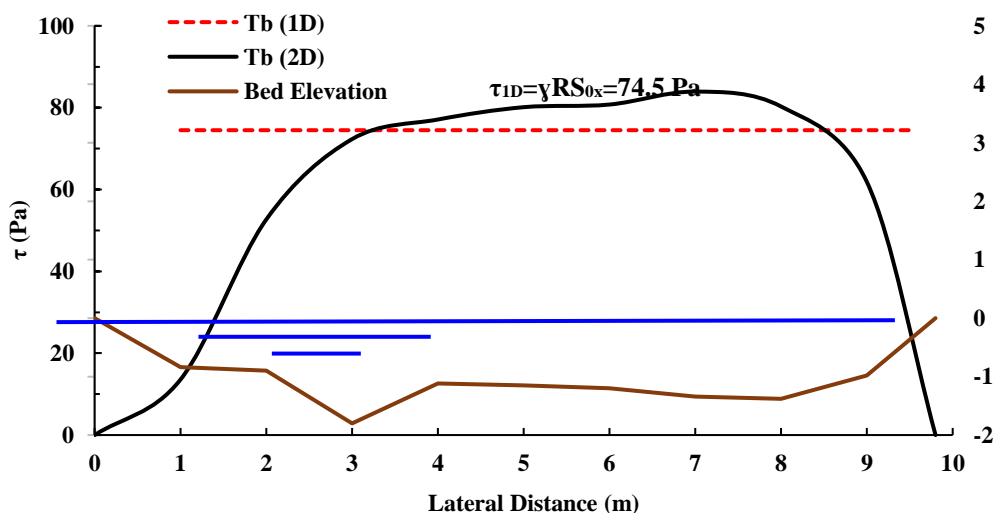
$$\tau_b = \rho \frac{f}{8} u_d^2 \quad (\text{رابطه } 20)$$

در شکل (۱۰)، تنش برشی حاصل از رابطه یک‌بعدی حدود ۷۴/۵ پاسکال و تنش‌های برشی حاصل از مدل شیونو و نایت هم حدود ۸۵-۰ پاسکال می‌باشند. جالب است که بخشی قابل توجهی از رودخانه دارای تنش برشی در محدوده ۸۵-۸۰ پاسکال است که با تنش برشی یک‌بعدی اختلاف کمی دارد. این مساله به وضوح تاثیر هندسه مقطع عرضی بر مقادیر تنش برشی حاصل از مدل دوبعدی را نشان می‌دهد به این صورت که در مقطعی از رودخانه که تغییرات هندسه مقطع عرض رودخانه کم است، مقادیر تنش‌های برشی بدست آمده از مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی تقریباً نزدیک به هم می‌باشد.

۱۶۰-۰ پاسکال متغیر است. این مساله نشان می‌دهد که برای مطالعه و بررسی دقیقتر رودخانه‌ها، اکتفا نمودن به رابطه یک-بعدی تنش برشی نمی‌تواند راه‌حل مناسبی باشد زیرا در عرض رودخانه، تنش‌های برشی بسیار کمتر و بسیار بیشتری از رابطه یک‌بعدی نیز اتفاق می‌افتند که تحلیل هیدرولیکی، رسوبی و مورفولوژیکی مناسب‌تری را برای رودخانه فراهم می‌کنند. مثلاً با استفاده از مقایسه مقادیر تنش‌های برشی بدست آمده از مدل شیونو و نایت با تنش برشی آستانه حرکت مصالح کف رودخانه، می‌توان بخشی از عرض رودخانه که در شرایط سیلابی احتمالاً دچار فرسایش می‌شود را شناسایی نمود.



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی و شبه دوبعدی تنش برشی بستر در سیلاب با اشل ۱۲۸ سانتیمتر



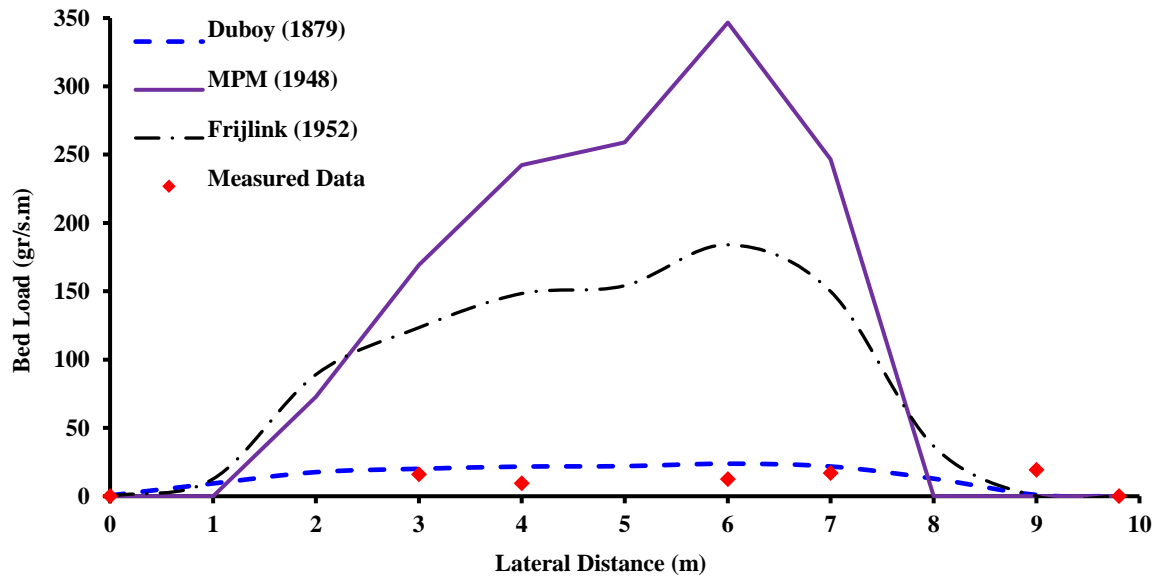
شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی و شبه دوبعدی تنش برشی بستر در سیلاب با اشل ۹۸ سانتیمتر

توزیع سرعت و تنش برشی قابل انجام است. این محاسبات برای همه روابط تجربی بار بستر انجام شد. در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نتایج توزیع عرضی رسوب بار بستر بدست آمده از مدل ریاضی

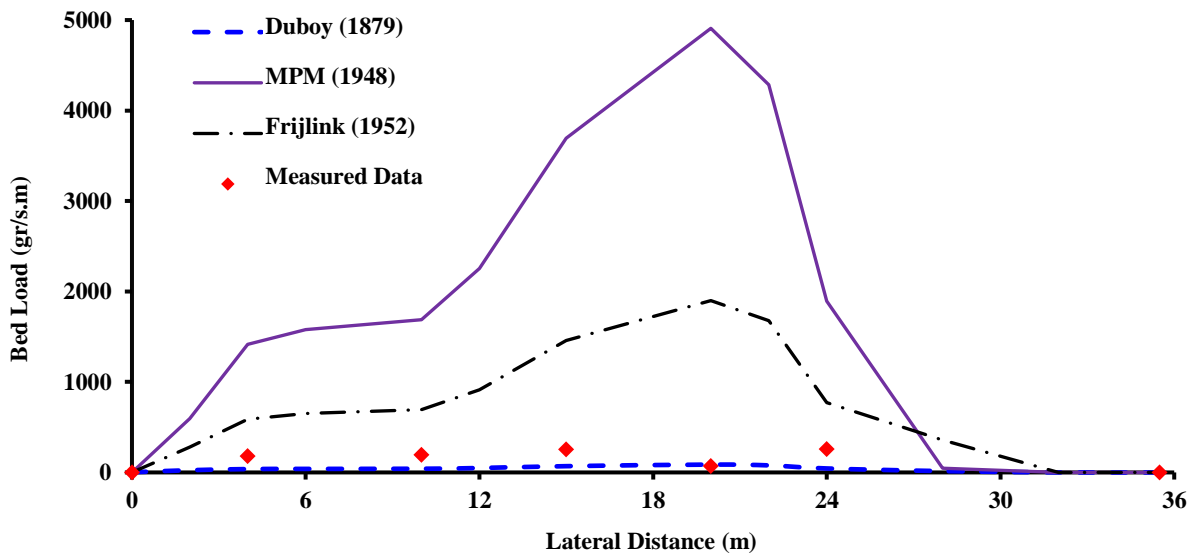
شبیه‌سازی توزیع عرضی رسوب بار بستر پس از شبیه‌سازی توزیع عرضی سرعت جریان و تنش برشی بستر، شبیه‌سازی توزیع عرضی رسوب بار بستر بر اساس نتایج

خوبی با مقادیر واقعی رسوب بار بستر در عرض رودخانه دارد. روش‌های میر-پیتر و مولر و فرایلینک دارای برآوردهایی بزرگتر از مقادیر واقعی می‌باشند. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای نتایج توزیع بار بستر بدست آمده از سه رابطه دوبوی، فرایلینک و میر-پیتر و مولر (شکل ۱۱) به ترتیب حدود ۷/۴۵، ۹۸/۸ و ۱۷۳/۹ بدست آمد. بر اساس این نتایج، فقط رابطه دوبوی قابل قبول بوده و نتایج بقیه روابط تجربی رضایت‌بخش نیست.

شیونو و نایت (بر حسب گرم بر ثانیه در واحد عرض) فقط برای سه روش منتخب برآورد بار بستر میر-پیتر و مولر، دوبوی و فرایلینک برای اشل‌های ۹۸ و ۱۲۸ سانتیمتر در ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود نشان داده شده است. در این شکل‌ها، مقادیر اندازه‌گیری شده نیز ارائه شده است. با مقایسه نتایج محاسباتی و مقادیر اندازه‌گیری شده مشخص می‌شود که از میان سه روش تجربی منتخب برآورد بار بستر مورد استفاده، رابطه دوبوی انطباق



شکل ۱۱- مقایسه توزیع عرضی بار بستر اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (اشل ۹۸ سانتی‌متر)



شکل ۱۲- مقایسه توزیع عرضی بار بستر اندازه‌گیری شده و محاسباتی از ۳ رابطه تجربی (اشل ۱۲۸ سانتی‌متر)

رابطه تجربی دوبوی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تقریباً به ازاء تمامی دبی‌های جریان در این رودخانه، نتایج مدل دوبعدی شیونو و نایت مقادیر بهتری نسبت به روش یک-بعدي ارائه نموده است که مزیت و کارایی مناسب این مدل را نشان می‌دهد. با توجه به پیچیدگی محاسبات بار بستر در

مدل شبه‌دوبعدی شیونو و نایت ضمن اینکه قابلیت برآورد دبی جریان (به کمک توزیع عرضی سرعت) را دارد، بار بستر را نیز برآورد می‌کند. در جدول (۴)، نتایج برآورد دبی بار بستر رودخانه زارم‌رود به کمک مدل‌های یک‌بعدي و شبه‌دوبعدی برای

رودخانه، ایده محاسبه بار بستر به صورت شبه‌دو بعدی مطرح شد، به این صورت که به جای استفاده از مقادیر متوسط سرعت و تنش برشی (یک مقدار در مقطع عرضی) در فرمول‌های تجربی انتقال بار بستر، از توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر در این فرمول‌ها استفاده می‌شود. به این منظور یک مدل ریاضی-هیدرولیکی شبه‌دو بعدی مدنظر قرار گرفت. این مدل ریاضی ابتدا به کمک سرعت‌های اندازه‌گیری شده جریان در عرض رودخانه واسنجی شده و سپس برای اطمینان از صحت نتایج آن به ازنه دبی‌های مختلف جریان، صحت‌سنجی شد. دبی‌های جریان مشاهداتی و محاسباتی رودخانه در این مرحله (با تراز سطح آب ۹۸ سانتیمتر) به ترتیب ۳۸/۴۴ و ۳۹/۶۴ مترمکعب بر ثانیه بدست آمدند که بیانگر خطایی حدود ۳/۱۲ درصد است. همچنین حداکثر و میانگین خطای مطلق برآورد سرعت‌های جریان در این مرحله به ترتیب حدود ۱۳ و ۴/۵ درصد محاسبه شده است. دبی‌های جریان مشاهداتی و محاسباتی نیز به ترتیب ۳۸/۴۴ و ۳۹/۶۴ مترمکعب بر ثانیه بدست آمده است که بیانگر خطایی حدود ۳/۱۲ درصد است. بعد از حصول اطمینان از دقت نتایج این مدل، توزیع تنش برشی بستر در عرض رودخانه محاسبه شده و از این توزیع برای محاسبه بار بستر در عرض رودخانه استفاده شد. نتایج مدل‌سازی رابطه دویوی نشان داد که با استفاده از ایده پیشنهادی این تحقیق، ضمن اینکه بار بستر رودخانه در عرض مقطع قابل محاسبه است، بار کل بستر رودخانه نیز با دقت بهتری نسبت به مقادیر مشاهداتی قابل تخمین است. شاخص نسبت ناجوری برای نتایج مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دو بعدی برآورد بار بستر رودخانه زارم‌رود به کمک رابطه دویوی به ترتیب حدود ۱/۹ و ۰/۷ بدست آمد که بیانگر برتری مدل شبه‌دو بعدی می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- 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*. Ph. D. 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*

رودخانه‌ها و دقت پایین بسیاری از محاسبات معمول برآورد بار بستر، دقت مناسب مدل شیونو و نایت در این خصوص امیدوارکننده می‌باشد. شاخص نسبت ناجوری برای نتایج مدل‌های یک‌بعدی و شبه‌دو بعدی فوق به ترتیب حدود ۱/۹ و ۰/۷ بدست آمده است که بیانگر برتری مدل شبه‌دو بعدی است.

جدول ۴- مقایسه نتایج مدل‌سازی یک‌بعدی و دو بعدی تخمین بار بستر رودخانه زارم‌رود به کمک رابطه دویوی

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

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا با استفاده از ۱۷ رابطه تجربی رسوبی محققین مختلف، بار بستر رودخانه زارم‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری گرم‌رود محاسبه شد. نتایج نشان داد که رابطه دویوی با $RMSE=5/25$ دارای بهترین دقت نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. این شاخص آماری برای روابط تجربی فرایلینک و میر-پیتر و مولر که دومین و سومین روابط برتر برآورد بار بستر هستند به ترتیب حدود ۹/۵۹ و ۲۱/۵۷ بدست آمد. این در حالی است که بقیه روابط پراکندگی بسیار زیادی نشان دادند که در مطالعات رسوب و به ویژه بار بستر رودخانه‌ها امری کاملاً قابل پذیرش بوده و در بسیاری از مطالعات محققین قبلی نیز مورد اشاره قرار گرفته است. در گام دوم برای بهبود دقت محاسبات بار بستر این

- (ICSE-5), San Francisco, USA. 501-510.
- Fenton, J. (2016). Hydraulics: science, knowledge, and culture. *Journal of Hydraulic Researches*, 54 (5), 485-501.
- 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),
- Gholinejad, J., Zahiri, A., and Dehghani, A. (2018). Simulation of lateral distribution of total load sediment transport in rivers using a quasi two-dimensional mathematical model (Case Study: Gharehsoo river). *Journal of Water Resources Engineering*, 11(38), 83-93.
- 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 Researches*, 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., Abdeelaal, 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.
- Sheikhpour, H., (2014). Measuring the bed load and suspended load of Zalemard river in Garmrud station and determining their ratio during the water year, *Research project of Mazandaran Regional Water Company*. (In Farsi)
- 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.
- Zahiri, A., Ayyoubzadeh, S. A. and Dahanzadeh, B. (2010). Numerical solution of velocity lateral distribution in rivers (Case study: Karoun river at Molasani station), *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 16 (2), 273-283. (In Farsi)
- 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)
- Zahiri, A., Gholinejad, J., and Dehghani, A. (2019). Prediction of sediment transport capacity in rivers using quasi two-dimensional mathematical model. *Journal of Watershed Management Research*, 10(19), 142-153. (In Farsi)