

مقاله علمی- پژوهشی

بررسی عددی عوامل مؤثر بر توزیع غلظت رسوب معلق نامتعادل در رودخانه‌های طبیعی (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو، کرمانشاه)

رسول قبادیان^{۱*} - حامد شکری^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴

چکیده

چگونگی تغییرات غلظت رسوب معلق در طول مسیر رودخانه و بررسی عوامل تأثیرگذار بر آن همواره مورد توجه مهندسين علم هیدرولیک و محیط زیست می‌باشد. عدم وجود ایستگاه‌های اندازه‌گیری کافی و مشکلات نمونه‌برداری رسوب معلق، تهیه مدل‌هایی که به درستی رسوب معلق را در طول مسیر رودخانه روندیابی نمایند ضروری می‌نماید. در طبیعت رسوب بصورت نامتعادل انتقال می‌یابد در حالی که خیلی مدل‌های تجاری حالت ظرفیت حمل یا متعادل را در نظر می‌گیرند. از این رو در تحقیق حاضر مدلی عددی تهیه شده با حل عددی معادله تک‌بعدی انتقال و پخش غیرماندگار روندیابی رسوب معلق در یک بازه رودخانه‌ای را در شرایط عدم تعادل انجام می‌دهد. پس از صحت‌سنجی مدل، تأثیر ده روش عددی منفصل‌سازی، پنج معادله انتقال رسوب، هشت رابطه ضریب پخشیدگی و هشت رابطه سرعت سقوط ذره بر تغییرات بار رسوب معلق در طول بازه مورد مطالعه بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد استفاده از رابطه تجربی وایف مقدار رسوب معلق بیشتری را نسبت به سایر روابط دیگر برآورد می‌کند. در میان روابط سرعت سقوط ذره رابطه استوکس سرعت سقوط بیشتری را برآورد می‌کند که باعث می‌شود احتمال معلق شدن ذرات رسوب کمتر و در نتیجه غلظت آن نسبت به سایر روش‌ها کمتر باشد. همچنین در بین روش‌های منفصل‌سازی روش وان لیبر خطای کمتری را دارا است. از طرفی رابطه الدر کمترین و رابطه کاشفی پور- فالكونر بیشترین مقدار پخشیدگی را در هیدروگراف غلظت از خود بجا می‌گذارند. علاوه بر این نتایج تحقیق حاضر نشان داد غلظت رسوب برآورد شده در حالت عدم تعادل حدود ۱۱/۷ درصد بیشتر از ظرفیت حمل بار معلق محاسبه شده توسط روابط تجربی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روندیابی رسوب معلق، سرعت سقوط، شبیه‌سازی عددی، ضریب پخشیدگی، معادله انتقال و پخش

مقدمه

حمل رسوب به صورت بار معلق را برآورد می‌نمایند. ژانگ و همکاران (۱۳) اعلام داشتند بسیاری از روابط انتقال رسوب برای شرایط تعادلی توسعه داده شده‌اند که در این حالت فرض بر این است که ظرفیت حمل رسوب با مقدار انتقال رسوب برابر است. با این وجود، وقتی که بستر کانال در حال فرسایش و رسوب‌گذاری باشد، میزان انتقال رسوب ممکن است کمتر یا بیشتر از ظرفیت حمل رسوب گردد. به منظور برآورد رسوب معلق در شرایط عدم تعادل که در آن تبادل ذرات رسوب بین بستر و ستون آب با تأخیر مکانی و زمانی اتفاق می‌افتد و به صورت آنی نیست، لازم است در معادله انتقال-پخش^۳ که در رابطه زیر ارائه شده مقدار C یا همان غلظت میانگین مقطع همراه با ترم منبع به صورت عددی حل شود.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S_c \quad (1)$$

امروزه یکی از مهمترین نگرانی‌ها در مسائل موجود در رودخانه‌ها انتقال رسوب و تأثیر منفی آن روی زندگی منطقه می‌باشد. یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان رسوب ورودی به مخازن سدها و دریاچه‌ها بارمعلق ورودی می‌باشد. برآورد دقیق میزان بار رسوب معلق از جنبه‌های گوناگون اجتماعی و اقتصادی حائز اهمیت است.

با توجه به اهمیت موضوع تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه بار رسوب معلق ارائه شده است. این روش‌ها می‌توانند مبنای تجربی و نیمه تئوری داشته باشند. (وایف، لین و کالینسکی (۵)، توفالتی (۱۰) و وان‌راین (۱۱)). این معادلات ارائه شده عموماً ظرفیت

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(Email:rsghobadian@gmail.com

*- نویسنده مسئول

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.76326

اندازه‌گیری شده و اجرای روش تحلیل مسیر در رودخانه ارمند پرداختند. در نهایت با بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که فرمول بگنولد دارای برآورد نزدیکتری نسبت به فرمول لین و کالینسکی است. صدائی و سلیمانی (۹) به ارزیابی فرمول‌های برآورد بار رسوب معلق (توفالتی، چانگ-سایمونز-ریچاردسون و بگنولد) بر مبنای داده‌های سه رودخانه بازفت، سولگان و ارمند با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ پرداختند. فرمول چانگ-سایمونز-ریچاردسون در رودخانه‌های ذکر شده به عنوان فرمول مناسب جهت برآورد بار رسوب معلق پیشنهاد گردید. همچنین حبیبی (۳) بر اساس مفاهیم اصلی هیدرولیک، انتقال انرژی و حرکت ذرات در جریان آب و رسوب و با فرض اینکه غلظت رسوبات در هر عمق مشخص از کف کانال متناسب با انرژی جنبشی آشفته ایجاد شده در همان عمق می‌باشد یک رابطه نیمه تجربی ارائه داد.

لازم به ذکر است در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی مبنی بر هوش محاسباتی غلظت بار معلق در مجاری روباز از جمله پژوهش رجایی و میر باقری (۶) که با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی غلظت بار معلق پرداختند انجام گرفته است. پس از مقایسه با روش منحنی سنج رسوب، نتایج نشان‌دهنده برتری مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بود.

مطالعات قبلی عمدتاً بر روی تعیین نسبی مقدار بار معلق و مقایسه آن با روابط ارائه شده مبنی بر ظرفیت حمل در محل یک یا چند ایستگاه هیدرومتری در یک رودخانه اعلام شده است. بررسی تغییرات غلظت بار معلق و عوامل موثر بر آن در طول یک بازه‌ای از رودخانه به ویژه در شرایط عدم تعادل که به واقعیت نزدیک‌تر است در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. از این رو در تحقیق حاضر بازه ورودی رودخانه قره‌سو به شهر کرمانشاه که از نقطه‌نظر محیط زیستی بسیار حائز اهمیت است، مورد توجه قرار گرفت. با این وجود به علت نبود ایستگاه اندازه‌گیری رسوب و جریان در محدوده مذکور و همچنین مشکلات و هزینه بسیار زیاد اندازه‌گیری بار رسوب معلق از طرف دیگر، لزوم تحقیقی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر توزیع غلظت بار معلق در طول بازه مورد نظر و تعیین محدوده‌های بحرانی از نقطه نظر آلودگی رسوب معلق را دو چندان می‌نماید.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

برای مدل‌سازی رسوب معلق در این مقاله، رودخانه قره‌سو به طول ۱۸۴۸۰ متر و تعداد ۶۰ مقطع عرضی برداشت شده مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است جهت

در این رابطه u سرعت جریان، D ضریب پخشیدگی طولی و بسته به شبیه‌سازی نوع آلودگی، ترم منبع (S_c) از روابط مختلفی محاسبه می‌شود. که برای رسوب معلق می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$S_c = \gamma \omega_s T_w \left(\frac{q_s}{q_w} - C \right) \quad (2)$$

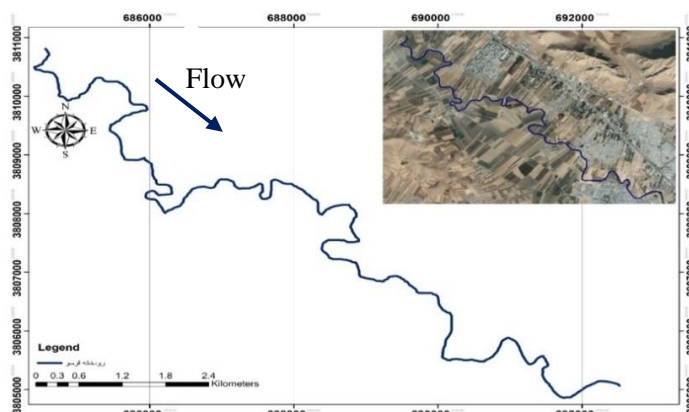
$$\gamma = 3.25 + 0.55 \ln \left(\frac{\omega_s}{k \times U^*} \right) \quad (3)$$

که در آن C غلظت رسوب معلق، ω_s سرعت سقوط ذرات رسوب، T_w عرض سطح آب، q_s ظرفیت حمل رسوب معلق در واحد پهنای کانال، q_w دبی جریان در واحد عرض کانال k ضریب وان کارمن که معمولاً برابر ۰/۴۱ در نظر گرفته می‌شود و U^* سرعت برشی می‌باشد. حل معادله ۱ تحقیقات زیادی را به خود معطوف داشته است از جمله آپادو (۱) که با استفاده از سه روش لکس و ندرروف به صورت صریح و کرنک نیکلسون به صورت ضمنی و روش تفاضل محدود غیر استاندارد به حل معادله یک بعدی جابجایی و پخش با ضرایب ثابت پرداخت. نتایج ایشان نشان داد روش‌های لکس و ندرروف و روش تفاضل محدود روش‌های مناسبی برای حل معادله یک‌بعدی جابجایی و پخش است.

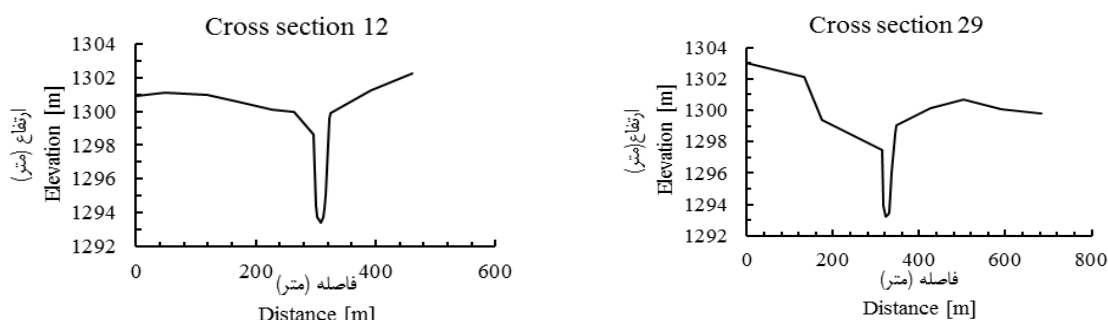
کاشفی‌پور و توکل‌زاده (۴) به معرفی مدل یک بعدی هیدرودینامیکی و کیفی فستر^۱ و همچنین استفاده از روش کرنک نیکلسون به شکل تفاضل مرکزی پرداختند. پس از اجرای مدل برای یک مثال خاص تحت عنوان انتقال خالص با عدد کورانت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ و مقایسه با مقادیر تحلیلی بدست آمده، مدل فستر را مدلی دقیق اعلام کردند. باغبان‌زاده و کاشفی‌پور (۲) به کمک مدل عددی و استفاده از معادلات سنت-ونانت و هم چنین معادله انتقال-پخش برای مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب معلق به مطالعه انتقال رسوب معلق غیرچسبنده در رودخانه کرخه پرداختند. پس از اجرای برنامه با ۵ معادله رسوب معلق و ۶ معادله برای تعیین ضریب پخش و مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده، ترکیب معادله رسوب معلق وان‌راین و معادله ضریب پخش فیشتر نتایج مناسبی را ارائه کرد. صدائی و همکاران (۷) به بررسی میزان دقت شش فرمول بگنولد، لین و کالینسکی، انیشتین، چانگ-سایمونز-ریچاردسون، بروکس، توفالتی در برآورد بار معلق رسوب نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده در رودخانه سولگان پرداختند. با انجام این تحقیق مشخص شد که از بین فرمول‌های بررسی شده فرمول بروکس برای سولگان دارای برآورد با دقت بالایی بود. صدائی و سلیمانی (۸) به بررسی دو فرمول لین و کالینسکی و بگنولد برای محاسبه بار معلق در رودخانه ارمند با مقادیر

برای مقاطع عرضی ۲۷ تا ۴۲ (کیلومتر ۶۵۰۵ تا ۱۲۱۲۶) و نهایتاً دانه‌بندی تیپ چهار برای مقاطع ۴۳ تا ۶۰ (کیلومتر ۱۲۱۲۶ تا ۱۸۴۰۵) استفاده شده است. از دانه‌بندی و مقاطع عرضی به عنوان شرایط اولیه ورودی مدل جریان و رسوب استفاده شد. همچنین تغییرات ضریب زبری در طول بازه، مطابق با جدول ۱ برای ساحل چپ، کانال اصلی و ساحل راست رودخانه برای مدل در نظر گرفته شده است.

کلی جریان در سیستم رودخانه‌ای مذکور از شمال غرب به سمت جنوب شرق می‌باشد. برخی مقاطع عرضی برداشت شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در رودخانه قره‌سو چهار دانه‌بندی مواد بستر برای بازه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ منحنی دانه‌بندی مواد بستر ارائه شده است. در این شکل دانه‌بندی تیپ ۱ برای مقطع عرضی ۱ تا ۱۰ (کیلومتر صفر تا ۲۷۵۴)، دانه‌بندی تیپ ۲ برای مقاطع ۱۱ تا ۲۶ (کیلومتر ۲۷۵۴ تا ۶۵۰۵)، دانه‌بندی تیپ ۳



شکل ۱- پلان رودخانه قره‌سو
Figure 1- Schematic of Gharasoo river plan

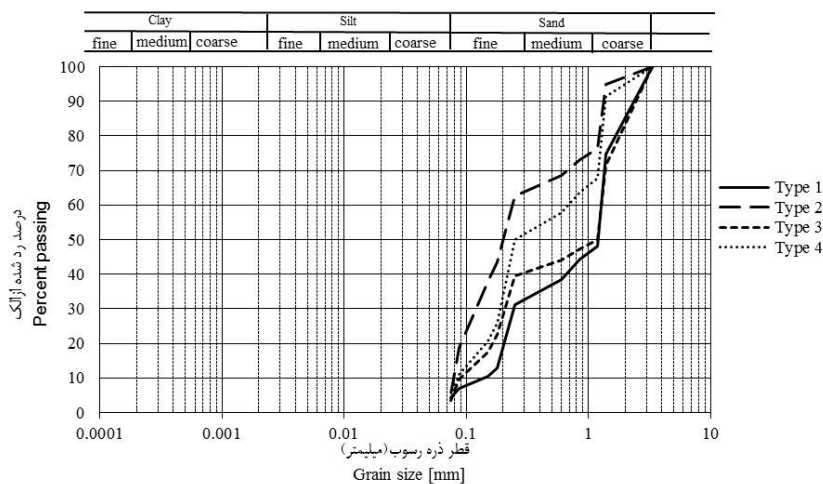


شکل ۲- پروفیل عرضی برخی از مقاطع رودخانه قره‌سو
Figure 2- Some cross sections of Gharasoo river

جدول ۱- مقادیر مربوط به ضریب زبری مانینگ رودخانه قره‌سو در بازه مورد مطالعه

Table 1- Manning roughness coefficient for Gharasoo river in the studied area

ضریب ساحل راست	ضریب کانال میانی	ضریب ساحل چپ	فاصله از پایین‌دست (متر)
n Right canal	n Main canal	n Left canal	Distance from downstream [m]
0.045	0.036	0.045	3396.639 to .000
0.045	0.030	0.045	3396.639 to 6374.857
0.050	0.028	0.050	6374.857 to 10520.43
0.040	0.025	0.040	10520.43 to 11714.28
0.048	0.030	0.048	11714.28 to 13600.91
0.045	0.025	0.045	13600.91 to 15026.23
0.045	0.030	0.045	15026.23 to 15909.50
0.045	0.025	0.045	15909.50 to 18409.03



شکل ۳- دانه‌بندی مواد بستر در طول رودخانه قره‌سو
Figure 3- Grain size distribution curve along Gharasoo river

در این روابط k_i ضریب انتقال در زیر مقطع i ام از مقطع مورد نظر می‌باشد. پس از تغییر رابطه ۴ به شکل رابطه ۱۰ با معلوم بودن مشخصات جریان در مقطع کنترل (مثلاً مقطع شماره ۱) و همچنین وارد کردن مقاطع عرضی به مدل با استفاده از روش نصف کردن فاصله و حل رابطه غیرخطی زیر، بر حسب Y_2 مقادیر عمق جریان و در نهایت سرعت و نیمرخ طولی سطح آب در طول بازه محاسبه می‌شود.

$$f(Y_2) = Y_1 + \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + Z_1 \quad (10)$$

$$Y_2 + \alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + Z_2 + \overline{sf} \times L = 0$$

معادلات رسوب

با استفاده از روش احجام محدود منفصل‌سازی معادله ۱ به روش کاملاً ضمنی انجام شد و رابطه جبری زیر بدست آمد:

$$A_p(C_i^{n+1} - C_i^n) + (A_e u_e C_e^{n+1} - A_w u_w C_w^{n+1}) \frac{dt}{dx} \quad (11)$$

$$A_e D_e \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{dx_e} \frac{dt}{dx} + A_w D_w \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{dx_w} \frac{dt}{dx} = S_c dt$$

به منظور تقریب زدن مقادیر غلظت بر روی سطوح حجم کنترل (C_e^{n+1}, C_w^{n+1}) در رابطه ۱۱ طرح‌های مختلفی وجود دارد. در این تحقیق از روش‌های توان-پیرو، کوپیک، اختلاف مرکزی و طرح کاهش اختلاف مجموع^۱ استفاده شده است.

معادلات جریان

اولین مرحله در محاسبات بار معلق تعیین خصوصیات هیدرولیکی جریان در مقاطع مختلف می‌باشد. از آنجائی که در این تحقیق شرایط جریان ماندگار و شبه ماندگار تک‌بعدی در نظر گرفته شده است برای محاسبه نیمرخ سطح آب در این رابط از روش گام به گام استاندارد و حل رابطه انرژی برای مقاطع نامنظم به عنوان معادله حاکم استفاده شد:

$$y_1 + \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + Z_1 = y_2 + \alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + Z_2 + \overline{sf} \times L \quad (4)$$

A سطح مقطع، Q دبی جریان، Z رقوم کف، y عمق جریان و \overline{sf} میانگین شیب خط انرژی است که برابر:

$$\overline{sf} = \frac{sf_1 + sf_2}{2} \quad (5)$$

$$sf = \frac{n^2 Q^2}{R^{\frac{4}{3}} A^2} \quad (6)$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ و R شعاع هیدرولیکی می‌باشد. زیرنویس‌های ۱ و ۲ اشاره به مقاطع شماره ۱ در بالادست و مقطع شماره ۲ در پایین دست با فاصله L از یکدیگر دارد. در تحلیل مسائل در کانال‌های با سطح مقطع منظم $\alpha = 1$ فرض می‌گردد و برای مقاطع نامنظم در این تحقیق با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\alpha = \frac{\sum \frac{k_i^3}{A_i^2} (\sum A_i)^2}{(\sum A_i)^3} \quad (7)$$

$$k_i = \frac{Q_i}{\sqrt{sf_i}} \quad (8)$$

$$k_i = \frac{1}{n_i} A_i R^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

جدول ۲- روش‌های منفصل‌سازی، معادلات سرعت سقوط، ضریب پخشیدگی و رسوب معلق

Table 2- Discretization methods, fall velocity relations, Diffusion coefficient and suspended sediment equation

روش‌های منفصل‌سازی	ضریب پخشیدگی	فرمول‌های سرعت سقوط	فرمول‌های بار معلق
Difference method	Dispersion coefficient	os Formula	qs Formula
Power Low	McQuivey and Keefer (1974)	Stocks (1851)	Lane kalinske (1941)
Quick	Fischer (1966)	Rouby (1993)	Tofaletti (1963)
Central	Elder (1959)	Zank (1977)	Van rijn (1984)
Van Leer	Kashefipour and Falconer(2002)	Chang (1984)	Wife et al.(1966)
Van Albada	Rajeev and Dutta(2009)	Van rijn (1989)	Habibi (1984)
Min Mode	Li et al. (1998)	Julian (1995)	
TVD	Seo and Cheong (1998)	Soulsbey (1999)	
Superbee	Liu (1967)	Zhang (1989)	
Sweby			
Quick			
Umist			

مانینگ ساخته می‌شود به عنوان شرط مرزی پایین‌دست به مدل حاضر و نرم‌افزار هکرس وارد شد.

به منظور بررسی عملکرد مدل، هر دو مدل به ازای ضریب زبری مانینگ یکسان $0/03$ اجرا شدند و نیمرخ طولی سطح آب در بازه محاسبه شد. همانطور که در شکل ۴ مشخص است نیمرخ طولی سطح آب محاسبه شده در دو مدل بر هم منطبق شده است به طوری که ماکزیمم خطای مطلق رقوم سطح آب محاسبه شده با مدل حاضر از مدل هکرس حدود $5/3$ سانتی‌متر در مقطع شماره ۱۱ و میانگین خطای مطلق $1/52$ سانتی‌متر در طول بازه می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل رسوب

به منظور بررسی دقت مدل شبیه‌ساز رسوب از نقطه‌نظر برنامه‌نویسی، با حفظ همان شرایط جریان اشاره شده در قبل، هیدروگراف غلظت نشان داده شده در شکل ۵ به عنوان ورودی به مدل معرفی شد. قله اول هیدروگراف مذکور شبیه تزریق پیوسته و قله آخر شبیه تزریق لحظه‌ای غلظت در رودخانه است علاوه بر این قله وسط شبیه تزریق به مدت محدود است. حجم زیر این هیدروگراف نمودار غلظت-زمان $182/475$ می‌باشد. با حذف ترم منبع در رابطه ۱ مدل به ازای روش‌های مختلف منفصل‌سازی اجرا شد. حجم زیر هیدروگراف‌ها در یک مقطع میانی بازه (مقطع ۱۵) و انتهای بازه (مقطع ۵۹) با ورودی مقایسه شد. به منظور مقایسه دقیق‌تر مدل مقادیر حجم زیر هیدروگراف‌ها به ازای روش‌های مختلف منفصل‌سازی در جدول ۳ ارائه شده است. ماکزیمم انحراف حجم زیر هیدروگراف مقاطع میانی و خروجی بازه از هیدروگراف ورودی $0/029$ درصد است. این مقدار کم خطا نشان از دقت بالای مدل و اطمینان به نتایج آن برای ادامه تحقیق دارد.

علاوه بر روش‌های منفصل‌سازی معادله انتقال و پخشیدگی، روابطی که برای تخمین سرعت سقوط ذرات رسوب، ضریب پخشیدگی و روابط تخمین رسوب معلق مورد استفاده شده در این تحقیق به اختصار در جدول ۲ آورده شده است.

شرایط مرزی

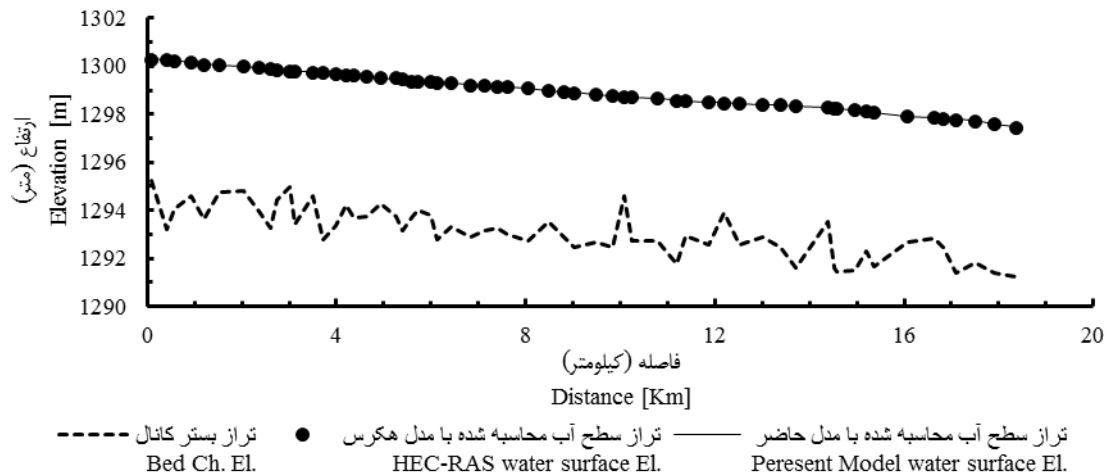
مقاطع هندسی بازه مورد نظر و منحنی دانه‌بندی رسوبات به عنوان شرایط اولیه به مدل وارد می‌شود. شرط مرزی بالادست برای مدل جریان، مقدار دبی مشخص و شرط مرزی پایین‌دست رابطه دبی-اشل است که برای مقطع آخر رودخانه قره‌سو با توجه به شیب عمومی رودخانه از رابطه مانینگ ساخته می‌شود.

در مدل انتقال-پخش شرط مرزی بالادست مقدار غلظت معلوم است این غلظت می‌تواند بصورت پیوسته، آنی یا مدت محدود از بالادست وارد رودخانه مذکور شود. شرط مرزی گرادیان صفر به عنوان شرط مرزی پایین‌دست برای مقطع آخر رودخانه قره‌سو تعریف شده است. مدل مورد توجه این تحقیق در محیط ویژوال بیسیک نوشته شده است. کلیه معادلات رسوب، ضریب طولی، سرعت سقوط و روش‌های منفصل‌سازی مختلف در زیر برنامه‌های این مدل تعریف شده که در هنگام اجرای برنامه بر حسب مورد فراخوانی می‌شوند.

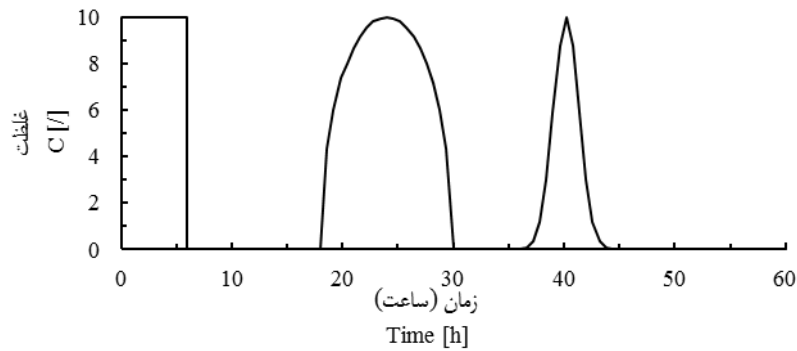
نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی

به منظور بررسی دقت مدل هیدرولیکی از نقطه‌نظر برنامه‌نویسی، از محدوده مورد مطالعه این تحقیق یعنی رودخانه قره‌سو با طول 18480 متر و تعداد 60 مقطع عرضی استفاده شد. بدین منظور مشخصات رودخانه به همراه دبی متوسط ورودی 2 ساله m^3/s $180/4$ به عنوان شرط مرزی بالادست و رقوم سطح آب که از رابطه



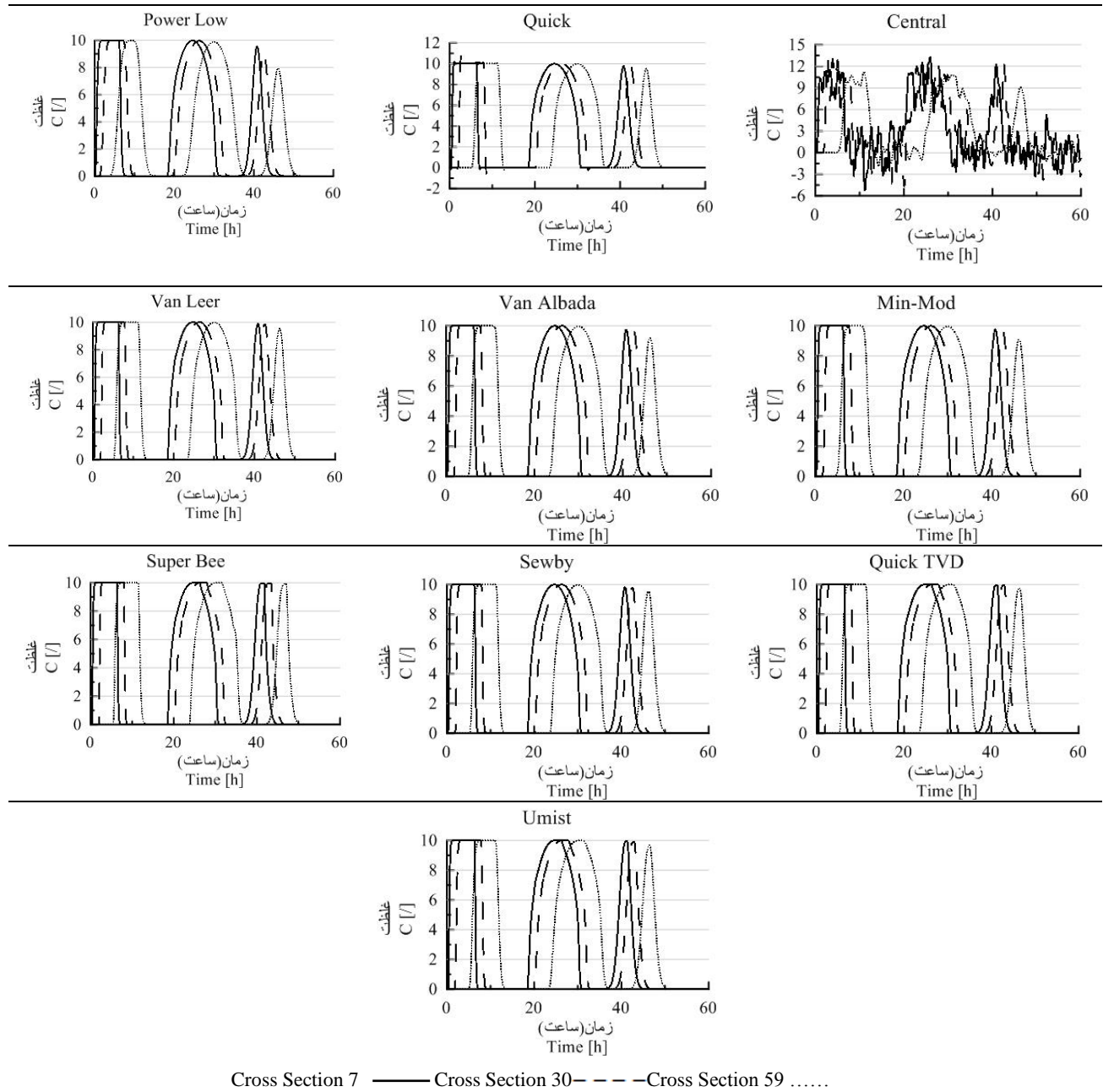
شکل ۴- مقایسه پروفیل سطح آب محاسبه شده با مدل هکرس و مدل حاضر
Figure 4- Comparison of water surface elevation in HEC-RAS and present model



شکل ۵- هیدروگراف غلظت ورودی به بازه مورد مطالعه
Figure 5- Input concentration hydrograph to the studied area

جدول ۳- حجم زیر نمودار غلظت-زمان برای روش‌های مختلف در مقاطع ۱۵ و ۵۹
Table 3- The volume below the concentration hydrograph for different methods in sections 15 and 59

روش منفصل‌سازی	مقطع ۱۵ Section 15		مقطع ۵۹ Section 59	
	حجم زیر نمودار Volume under concentration hydrograph	میزان خطا % Error	حجم زیر نمودار Volume under concentration hydrograph	میزان خطا % Error
Power Low	182.49	0.018	182.49	0.018
Quick	182.49	0.018	182.49	0.018
Central	182.49	0.018	182.49	0.018
Van Leer	182.51	0.029	182.51	0.029
Van Albada	182.50	0.024	182.49	0.018
Min-Mode	182.51	0.029	182.49	0.018
Super Bee	182.50	0.024	182.50	0.024
Sewby	182.48	0.013	182.49	0.018
Quick Tvd	182.49	0.018	182.49	0.018
Umist	182.50	0.024	182.49	0.018



شکل ۶- هیدروگراف غلظت محاسبه شده به روش‌های مختلف منفصل‌سازی
 Figure 6- Calculated concentration hydrograph by different discretization methods

داده شده در شکل ۵ (که به عنوان ورودی در این حالت نیز در نظر گرفته می‌شود) تنها در جهت محور زمانی جایجا نماید و هیچگونه پخشیدگی و پایین افتادگی در قله‌های هیدروگراف رخ ندهد. به منظور بررسی دقیقتر برای روش‌های مختلف منفصل‌سازی اشاره شده در جدول ۲ مدل اجرا گردید. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود همه روش‌های منفصل‌سازی به جز طرح اختلاف مرکزی، برای

تعیین مناسبترین روش منفصل‌سازی برای تعیین بهترین روش منفصل‌سازی، با حذف ترم منبع و ترم پخشیدگی، رابطه ۱ به رابطه انتقال خالص^۱ تبدیل می‌شود. بهترین روش منفصل‌سازی روشی است که در آن هیدروگراف غلظت نشان

1- pure advection

شده است، در این مرحله برخی از معروف‌ترین روابط ارائه شده جمع‌آوری و تأثیر آنها بر غلظت رسوب رودخانه قره‌سو مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از روش منفصل‌سازی وان لیبر به عنوان روش برتر، رابطه مک کوئیری و کیفیر برای ضریب پخش طولی و همچنین استفاده از رابطه بار معلق وان‌راین برای محاسبه ظرفیت حمل رسوب معلق استفاده شد. در شکل ۸ توزیع غلظت رسوب بار معلق در طول بازه به ازای روابط مختلف محاسبه سرعت سقوط نشان داده شده است. لازم به ذکر است با توجه به غیریکنواختی دانه‌بندی رسوب در طول بازه غلظت رسوب بار معلق برای هر ذره رسوب جداگانه محاسبه شده و سپس با توجه به درصد وزنی آن ذره در منحنی دانه‌بندی غلظت رسوب کل ذرات (بصورت حجمی و بدون بعد) در هر مقطع محاسبه و در شکل ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل مشخص است کمترین غلظت رسوب بار معلق هنگامی بدست می‌آید که از رابطه استوکس برای محاسبه سرعت سقوط استفاده شده است. استفاده از رابطه استوکس سرعت سقوط بیشتری در مقایسه با سایر روش‌ها ارائه می‌دهد و احتمال معلق شدن ذرات را کمتر نشان می‌دهد. روابط وان‌راین و زانک در مقایسه با سایر روابط غلظت رسوب بیشتری را نشان می‌دهد.

تأثیر معادله رسوب معلق

به منظور بررسی تأثیر معادله رسوب معلق در برآورد غلظت رسوب در طول بازه مورد بررسی، برخی روابط تجربی مشهور به عنوان q_s در رابطه ۲ در نظر گرفته شد. بدین منظور از روش منفصل‌سازی وان لیبر، رابطه مک کوئیری و کیفیر برای ضریب پخش طولی و سرعت سقوط روبی استفاده شد. تغییرات طولی غلظت متوسط رسوب در هر مقطع در شکل ۹ نشان داده شده است.

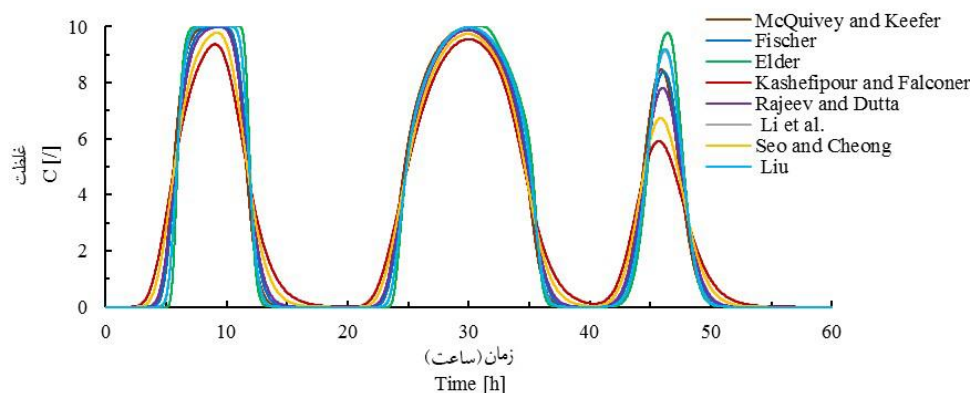
شبهه‌سازی قله اول و دوم هیدروگراف ورودی از دقت مناسبی برخوردار هستند ولی در شبهه‌سازی قله سوم هیدروگراف که شکل نوک تیز دارد و رعایت الگوی هیدروگراف ورودی روش وان لیبر از دقت بیشتری برخوردار است.

تأثیر ضریب پخشیدگی بر غلظت

پس از صحت‌سنجی مدل‌های جریان و رسوب و اطمینان به نتایج آنها تأثیر ضریب پخشیدگی بر توزیع غلظت بررسی شد. بدین منظور مجموعه‌ای از روابط ارائه شده در منابع مختلف برای تعیین ضریب پخشیدگی جمع‌آوری شد و با معرفی هر یک از آنها به مدل، هیدروگراف غلظت در خروجی بازه محاسبه گردید. همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است استفاده از رابطه الدر برای محاسبه ضریب پخشیدگی و جایگزینی در معادله انتقال و پخش (رابطه ۱) باعث شده است که قله اول، دوم و سوم هیدروگراف کمترین اختلاف غلظت و تغییر شکل را با هیدروگراف ورودی به بازه داشته باشند. به عبارتی رفتار معادله انتقال و پخش بیشتر شبیه معادله انتقال خاص شده است و دلیل این امر مقادیر ناچیز ضریب پخش محاسبه شده توسط رابطه الدر می‌باشد. از طرفی رابطه کاشفی‌پور و فالکونر بیشترین مقدار پخشیدگی را در هیدروگراف غلظت از خود بجا گذاشته است. استفاده از این رابطه باعث شده است که هر سه قله هیدروگراف غلظت فروافتادگی داشته باشد و به دلیل حفظ پیوستگی (حجم زیر هیدروگراف‌های غلظت در خروجی با هیدروگراف ورودی برابر است) شکل قله‌های هیدروگراف در مقایسه با سایر روابط بیشتر کشیده شده است.

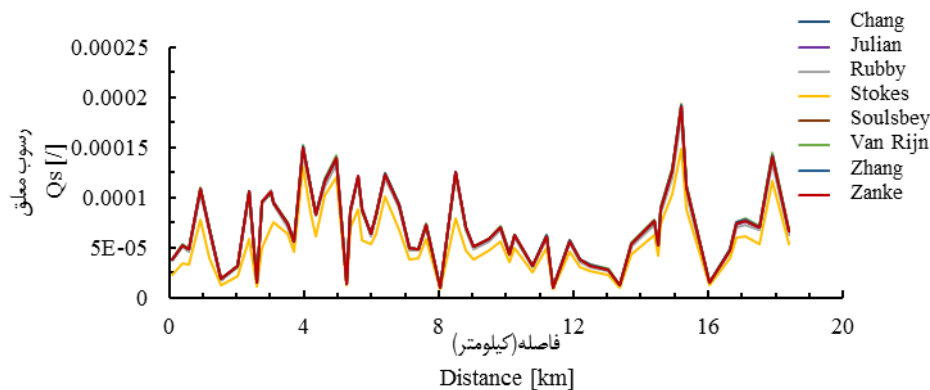
مقایسه روابط سرعت سقوط

سرعت سقوط ذره یکی از پارامترهای تأثیرگذار در انتقال رسوب می‌باشد. از آنجائیکه روابط متعددی برای محاسبه سرعت سقوط ارائه



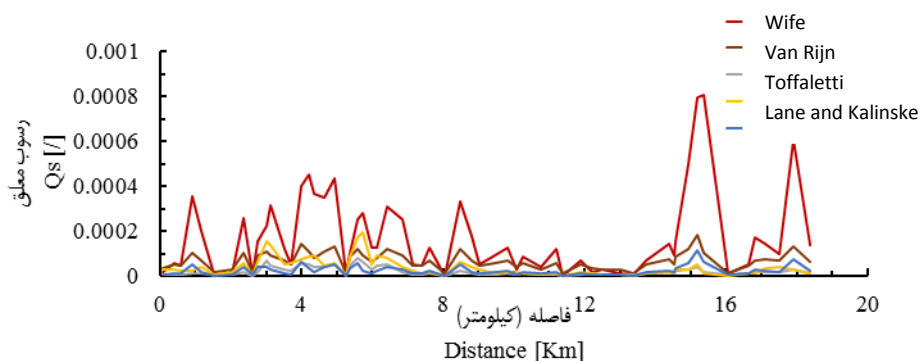
شکل ۷- تأثیر ضرایب مختلف پخشیدگی بر توزیع غلظت رسوب

Figure 7- Effect of different diffusion coefficients on sediment distribution



شکل ۸- تأثیر روابط مختلف سرعت سقوط بر توزیع غلظت

Figure 8- Effect of different velocity formula on sediment distribution



شکل ۹- تأثیر روابط مختلف تجربی برآورد ظرفیت حمل رسوب بر توزیع غلظت

Figure 9- Effect of different empirical relation to predict capacity of suspended sediment on the sediment distribution

همانگونه که ملاحظه می‌شود روش‌های توفالتی، لین-کلینسکی، وان‌راین و حبیبی روند تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند هرچند که روش وان‌راین مقدار بیشتری رسوب معلق را در عمده مسیر بجز حوالی کیلومتر ۳ در مقایسه با این سه روش برآورد می‌کند. علاوه بر این روش وایف بیشترین و تفالتی کمترین مقدار بار معلق رسوب را در بازه مورد مطالعه برآورد می‌کند. از جمله دلایل اختلاف فاحش روش وایف و همکاران با سایر روش‌ها در این است که در این روش ظرفیت حمل رسوب حساسیت بیشتری به سرعت جریان، عمق و شیب رودخانه دارد به گونه‌ای که با توان دوم حاصلضرب این پارامترها در ارتباط است.

معلق نشان داده شده است. غلظت رسوب برآورد شده در حالت نامتعادل در مقایسه با ظرفیت حمل رسوب معلق محاسبه شده توسط روش‌های وایف و همکاران، لین و کالینسکی، وان‌راین، حبیبی، و تفالتی به ترتیب ۱۲/۷، ۱۱/۵، ۱۳/۹، ۱۲/۷ و ۹/۶ درصد بیشتر است. غلظت رسوب برآورد شده در حالت عدم تعادل همانگونه که در شکل ۱۱ نیز نشان داده شده است حدود ۱۱/۷ درصد بیشتر از ظرفیت حمل بار معلق می‌باشد. از آنجایی که در طبیعت، رسوب معلق بر اساس شرایط عدم تعادل منتقل می‌شود، عدم در نظر گرفتن این اختلاف در مسائل مرتبط با مدیریت رسوب از قبیل محاسبه عمر مفید سدها باعث می‌شود عمر مفید غیر واقع بینانه بیشتر برآورد شود.

نتیجه گیری

مقایسه حالت تعادل و عدم تعادل

غلظت رسوب معلق در حالت تعادل با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف برآورد می‌شود. غلظت رسوب در حالت عدم تعادل با استفاده از حل عددی معادله ۱۱ بدست می‌آید که می‌تواند بیشتر یا کمتر از حالت تعادل باشد. در شکل ۱۰ مقدار بار معلق را در حالت تعادل و عدم تعادل به ازای معادله‌های مختلف بار

در این تحقیق مدلی عددی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب معلق با دانه‌بندی غیریکنواخت و در شرایط عدم تعادل توسعه داده شد. صحت‌سنجی مدل در بخش هیدرولیک جریان و رسوب، نتایج دقیق و قابل قبولی را ارائه داد. در این مدل با حل عددی معادله انتقال و پخش غیرماندگار همراه با ترم منبع، توزیع غلظت در طول بازه

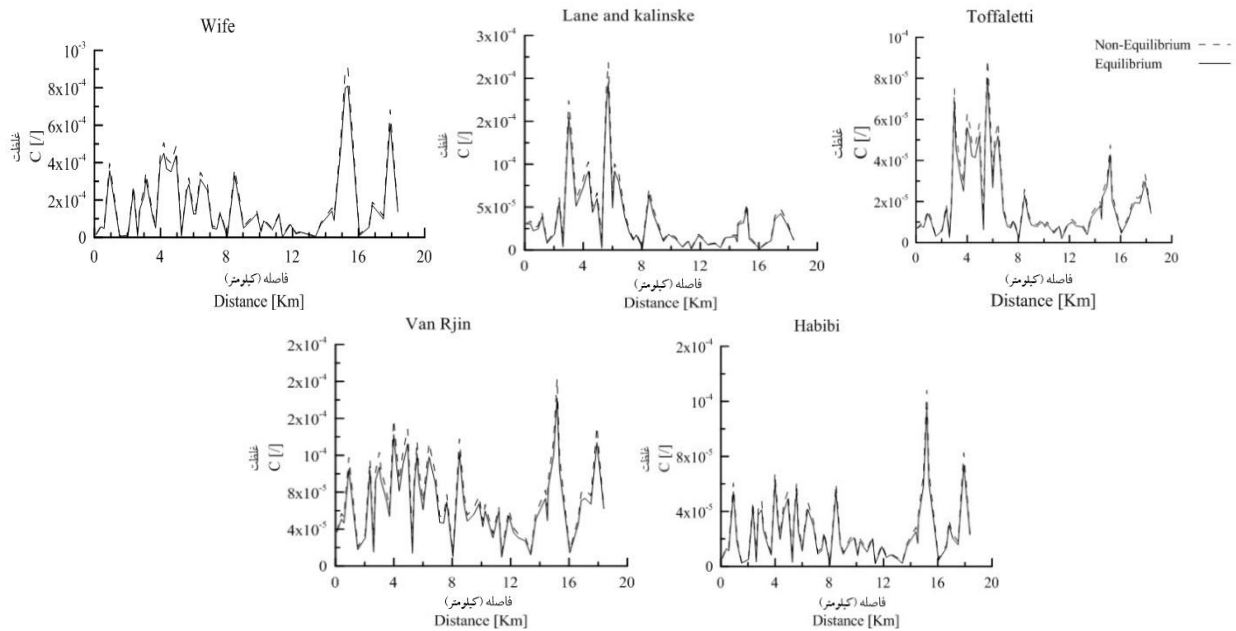
مقایسه حالت تعادل و عدم تعادل

در این تحقیق مدلی عددی برای شبیه‌سازی انتقال رسوب معلق با دانه‌بندی غیریکنواخت و در شرایط عدم تعادل توسعه داده شد. صحت‌سنجی مدل در بخش هیدرولیک جریان و رسوب، نتایج دقیق و قابل قبولی را ارائه داد. در این مدل با حل عددی معادله انتقال و پخش غیرماندگار همراه با ترم منبع، توزیع غلظت در طول بازه

مثال باغبان زاده و کاشفی پور (۲) در شبیه سازی انتقال رسوب معلق غیرچسبیده در رودخانه کرخه مناسبترین رابطه شبیه سازی بار معلق را رابطه وان راین پیشنهاد کردند. صدائی و همکاران (۷) رابطه بروگز را برای شبیه سازی رسوب معلق رودخانه سولگان پیشنهاد کردند. صدائی و سلیمانی (۸) رابطه بگنود را در محاسبه رسوب معلق رودخانه ارمند مناسب تر از رابطه لین و کالینسکی تشخیص دادند. صدائی و سلیمانی (۹) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فرمول برآورد بار رسوب معلق چانگ-سایمونز-ریچاردسون را برای سه رودخانه بازفت، سولگان و ارمند پیشنهاد کردند.

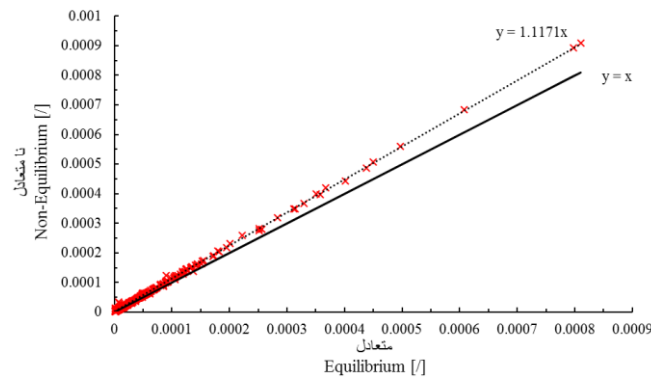
رودخانه قره سو محاسبه شد. در ترم منبع روابط تجربی متعددی برای برآورد ظرفیت حمل بار رسوب معلق در نظر گرفته شده است. نتایج تحقیق نشان داد غلظت بار رسوب معلق در طول بازه هنگام استفاده از روش های توفالتی، لین-کالینسکی، وان راین و حبیبی در ترم منبع تقریباً یکسان است.

با این وجود روش وایف بیشترین و توفالتی مقدار کمترین غلظت رسوب معلق را برآورد می کند. تحقیقات قبلی نشان داده است که روابط انتقال رسوب مختلف با توجه شرایط هیدرولیکی، هندسی و رسوبی رودخانه لزوماً جواب های یکسانی را ارائه نمی دهند. از اینرو برای هر رودخانه رابطه و یا روابط ویژه ای پیشنهاد شده است.



شکل ۱۰- مقایسه حالت تعادل و عدم تعادل با روابط مختلف رسوب معلق

Figure 10- Comparison of equilibrium and non-equilibrium conditions by different q_s equations



شکل ۱۱- مقایسه بار رسوب محاسبه شده در حالت تعادل و عدم تعادل

Figure 11- Comparison of calculate suspended load under equilibrium and non-equilibrium conditions

غلظت ایجاد کردند. باغبان زاده و کاشفی پور (۲) رابطه ضریب پخشیدگی فیشر را در شبیه‌سازی رودخانه کرخه پیشنهاد کردند. بررسی میزان رسوبات در حالت تعادل و عدم تعادل نشان داد که مقدار رسوب برآورد شده در رودخانه قره سود در حالت عدم تعادل ۱۱/۷ درصد بیشتر از مقدار آن در حالت تعادل است.

بدلیل اینکه سرعت سقوط محاسبه شده توسط رابطه استوکس از سایر روابط بیشتر برآورد گردید، غلظت رسوب معلق محاسبه شده در بازه هنگام در نظر گرفتن این رابطه، از سایر روش‌ها کمتر بدست آمد. همچنین در بین روابط ضریب پخشیدگی طولی رابطه الدر کمترین و رابطه کاشفی‌پور- فالكونر بیشترین مقدار پخشیدگی را در هیدروگراف

منابع

- 1- Appadu A.R. 2013. Numerical solution of the 1D advection-diffusion equation using standard and nonstandard finite difference schemes. *Journal of Applied Mathematics*. 2013(ID 734374):1-14
- 2- Baghbanpour S., and Kashefipour S.M. 2012. Numerical modeling of suspended sediment transport in rivers (case study: Karkheh River). *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 16(61): 45-57. (In Persian with English abstract)
- 3- Habibi M. 1998. Proposed semi-experimental formula for calculating the discharge of suspended sediments of rivers. *Journal of The College Engineering* 31(1): 19-25. (In Persian with English abstract)
- 4- Kashefipour S.M., and Tavakoly Zadeh A.A. 2008. Hydrodynamic and water quality FASTER model and its application in river engineering. *Iran Water Resources Research* 3(3): 56-68. (In Persian with English abstract)
- 5- Lane E.W., and Kalinske A.A. 1941. Engineering Calculations of Suspended Sediment. *Trans. Amer. Geophy. Union* 20(3): 603-607.
- 6- Rajaei T., and Mirbagheri S.A. 2010. Suspended sediment model in rivers using artificial neural networks. *Journal of Civil Engineering*, 21(1):27-43. (In Persian with English abstract)
- 7- Sedaei N., Honarbakhsh A., Mousavi F., and Sadatinejad J. 2012. Suspended sediment formulae evaluation, using field evidence from Soolegan River. *World Applied Sciences Journal* 19(4): 486-496.
- 8- Sedaei N., and Solaimani K. 2012. Comparison of two estimation formulae with the measured values and implication of path analyzing method in Armand River. *The Iranian Society of Irrigation and Water* 10:53-64. (In Persian with English abstract)
- 9- Sedaei N., and Solaimani K. 2013. Classification of three formulae Chang- Simons- Richardson, Bagnold, Toffaletti in three rivers using AHP. *Journal of Water and Soil Science* 23(3): 235-247. (In Persian with English abstract)
- 10- Toffaletti F.B. 1968. A Procedure for Computation of the Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface. Committee on Channel Stabilization, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station Technical Report No 5.
- 11- Van Rijn L.C. 1984. Sediment transport, Part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 110(11): 1613-1641.
- 12- Versteeg H.K., and Malalasekera W. 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. the finite volume method*, Second Edition.
- 13- Zhang S., Duan J., and Strelkoff T. 2013. Grain-scale nonequilibrium sedimenttransport model for unsteady flow. *J. Hydraul. Eng.*, 139(1): 22-36.

Numerical Study of Factors Affecting Distribution of None-Equilibrium Suspended Sediment in Natural Rivers (Case Study: Gharasoo River, Kermanshah)

R. Ghobadian^{1*}-H. Shakari²

Received: 10-11-2018

Accepted: 14-03-2020

Introduction: The concentration changes of suspended load along the river reach and the contributing factors are of importance for hydraulic and environmental engineers. The first step to calculate the concentration of suspended sediment load is determining the flow hydraulic characteristics along a river reach. Although most of flow in nature are unsteady, the quasi-steady flow condition was considered to be simple in this study and the water surface profile along the river reach with irregular cross sections was calculated by standard step-by-step method. In order to calculate suspended sediment load under non-equilibrium condition, the advection-diffusion equation with source term was numerically solved. In the present sediment model, ten discretization methods, five relations for calculating capacity of suspended sediment load, eight relations for diffusion coefficients and eight relations to calculate particle fall velocity were used and their effects on suspended sediment distribution along 18480 m of Gharasoo river were investigated.

Results and Discussion: The HEC-RAS model output was used to calibrate the present hydraulic model. The models were run with the conditions as same as Manning roughness coefficient and river geometry conditions. The results showed that the calculated water surface profile along the river reach by two models are completely overlapped each other. In other words, the present model has a very good accuracy to predict the water surface profile in the river reach. As most commercial 1-D models (same as HEC-RAS) only consider the equilibrium condition for sediment transport and the bed or total load sediment, comparing the results of present sediment model with them seems not to be reasonable. Therefore, to validate the present suspended sediment model and finding the best method of discretization, an especial shape concentration hydrograph was introduced to the present model as input hydrograph and the model was run when the source term has been deleted deliberately. The volume below the input concentration hydrograph and calculated hydrographs in different cross sections was compared to each other. Comparing the hydrographs showed that the maximum error in calculating the volume of concentration hydrograph with the input hydrograph was 0.029% implying that the model satisfies the conservation laws as well as reliable programming. Among ten discretization methods, the best method for discretization of the advection-diffusion equation was Van Leer's method with the least error compared to other methods. After validating the model, effect of five relations for calculating capacity of suspended sediment load was investigated. The results showed that using the Wife equation estimated the amount of suspended sediment higher than other equations. The Toffaletti equation also estimated suspended sediment load lower than other equation. Among eight particle fall velocity formulas, Stokes relationship estimated the fall velocity larger than other equations. Hence, the Stokes equation application decreases the possibility of suspending the sediment particles. However, employing Van Rijn and Zanke relationships resulted in a greater suspended sediment load distribution along the river reach. Among eight relationships for diffusion coefficients, Elder and the Kashifipour - Falconer equations exhibited the lowest and the highest amount of diffusion in the concentration hydrograph, respectively. Furthermore, the calculated suspended sediment concentration under non-equilibrium conditions was 11.7 % higher than that under equilibrium conditions along the river reach.

Conclusion: Most 1-D numerical models only simulate the bed and total loads sediment transport under equilibrium condition while sediments are transported under non-equilibrium conditions in nature. Sediment transport under non- equilibrium conditions may be greater or lower than the equilibrium condition known as the capacity of sediment transport. In this research, a numerical model was developed to simulate the suspended sediment transport in a river reach under non-equilibrium conditions. The amount of suspended sediment concentration was calculated for each sediment grain size. The results showed that the distribution of suspended

1 and 2- Associate Professor and M.Sc. Student of Water Structure,, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: rsgbobadian@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.76326

load along the river reach is not significantly sensitive to the fall velocity relations while the type of sediment transport equation affected the suspended sediment transport concentration. The concentration of suspended sediments for non-equilibrium conditions was also 11.7% higher than the concentration of sediments in equilibrium condition.

Keywords: Gharasoo River, Kermanshah, None-equilibrium condition, Numerical simulation, Suspended sediment