

بررسی تاثیر ضرایب غیرتعدالی روی انتقال رسوب در رودخانه‌ها با استفاده از مدل عددی

صبحاح محمدی^{*۱} - رسول قبادیان^۲ - سید محمود کاشفی پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

چکیده

مدل‌های عددی به‌نحو گسترده‌ای در مدیریت و مهندسی منابع آب کاربرد دارند. در این تحقیق، مدل عددی هیدرودینامیکی یک بعدی و غیرماندگار توسعه داده شده است، که برای روندیابی جریان و انتقال رسوب به‌صورت شبه‌کوپل در سیستم‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معادله دینامیکی انتقال - پخش و معادله دیفرانسیلی بار بستر به‌ترتیب برای محاسبه میزان انتقال بار معلق و بار بستر استفاده می‌شود. بعد از محاسبه میزان رسوب، از معادله اکسیر برای محاسبه تغییرات ارتفاع بستر در رودخانه استفاده می‌شود. با توجه به طبیعت غیرتعدالی بودن رسوب در رودخانه‌ها، در این مدل عددی، برعکس بسیاری از مدل‌های شناخته شده موجود از روش غیرتعدالی معادله اکسیر استفاده شده است. استفاده از روش غیرتعدالی به‌علت پیچیدگی حل آن و همچنین وجود پارامترهای غیرتعدالی در آن مانند ضرایب طول انطباق و بازیافت بسیار مشکل است. در تحقیق حاضر آنالیز حساسیت نیز روی این مقادیر با استفاده از مدل عددی انجام شد. نتیجه گرفته شد، که با انتخاب ضریب طول انطباق، معادل با مضربی از ۱ الی ۳ برابر فاصله بین مقاطع عرضی، نتایج واقع بینانه‌تری می‌توان از مدل عددی گرفت. برای ضریب بازیافت بار معلق نیز بهتر است از معادله تجربی Lin (1984) استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: سیستم رودخانه‌ای، شبه‌کوپل، معادله اکسیر، یک بعدی

مقدمه

صورت یک بعدی توسعه داده شده است که توانایی شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب را در سیستم‌های رودخانه‌ای دارد. جوژیانگ و همکاران (۷) براساس معادلات سنت و نانت که جریان در کانال‌ها و مجاری روباز را توصیف می‌کند و با استفاده از طرح ضمنی چهار نقطه‌ای پریسمن، مدلی هیدرودینامیکی همراه با مدل کیفی آب را توسعه دادند. ترمینی (۱۱) در تحقیقی به تخمین انتقال رسوبات غیریکنواخت در حالت غیرتعدالی پرداخت. ایشان برای شبیه‌سازی تغییرات بستر رودخانه و پروفیل‌های بستر از یک مدل شبه‌کوپل استفاده کردند. ترمینی الگوریتمی را طراحی کرد که در هر گام زمانی معادلات حاکم بر جریان و رسوب حل می‌شوند. خیلی از روابط انتقال رسوب برای شرایط تعدالی 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 (۱۹). بی و دوان (۲) مدلی یک بعدی را برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار و انتقال رسوب در کانال‌های با پوشش گیاهی توسعه دادند. آن‌ها از معادلات اصلاح شده سنت و نانت و انتقال بار بستر به‌صورت هم‌زمان استفاده کردند. ایشان از روش منفصل‌سازی حجم محدود گونو برای منفصل کردن معادلات حاکم بهره بردند. هانگمینگ و همکاران (۶) در تحقیقی به بررسی اثرات

برآورد حجم انتقال یافته رسوب توسط جریان بخاطر اهمیت آن در طراحی و مدیریت پروژه‌های منابع آبی، مورد توجه بسیاری از مهندسين هیدرولوژی قرار گرفته است. برای مهندسين بسیار ضروری و مهم است که از چگونگی انتقال رسوب آگاهی داشته و قادر باشند مکان‌هایی را که در آن‌ها فرسایش و رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد پیش‌بینی کنند. مدل‌های ریاضی ابزار با ارزشی را برای پیش‌بینی شرایط جریان و رسوب فراهم نموده‌اند و به‌نحو گسترده‌ای در مدیریت و مهندسی آب کاربرد دارند. به‌همین دلیل محققان مختلفی شبیه‌سازی را برای بررسی جریان‌های با بستر متحرک در کانال‌های آبرفتی و در رودخانه‌های طبیعی مورد توجه قرار داده‌اند. تجزیه و تحلیل میزان فرسایش و رسوب‌گذاری از پیچیده‌ترین مباحث هیدرولیک رسوب و رودخانه می‌باشد. در این تحقیق مدلی عددی به

۱ و ۲- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی

*- نویسنده مسئول: (Email: Sabah.Mohamadi@gmail.com)

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

کردن طول انطباق بار بستر آزمایشاتی را انجام دادند. آن‌ها این طول را به صورت زیر تعریف کردند. فاصله مورد نیاز برای جریان به منظور رسیدن به ظرفیت غلظت بار بستر. ایشان به این نتیجه رسیدند که طول انطباق بار بستر حدود 30 ± 8 برابر قطر ذره در یک تنش برشی نسبتاً کم ($\theta - \theta_c = 0.018$) که θ تنش برشی بدون بعد و $\theta_c = 0.0436$ ، تنش برشی بی‌بعد بحرانی است) و حدود 100 ± 30 برابر قطر ذره در یک سطح میانگین از تنش برشی بی‌بعد است ($\theta - \theta_c = 0.032$). آزمایشات در تنش برشی بالا برای محاسبه ضریب طول انطباق (L_b) منجر به خطا شد. یکی دیگر از روابط برای ضریب طول انطباق فرمول ارائه شده توسط وو و همکاران (۱۵) به صورت زیر می‌باشد:

$$L_b = \frac{Uh}{\alpha w_s} \quad (۱)$$

که در آن U ، سرعت متوسط جریان؛ d ، عمق جریان؛ w_s ، سرعت سقوط ذرات رسوبی و α ضریب انطباق غیر تعادلی بار معلق می‌باشد.

وو (۱۳) پیشنهاد کرد که ضریب طول انطباق با فرم بستر ارتباط نزدیکی دارد و در مدل‌های آزمایشگاهی به صورت ضریبی از عمق جریان می‌تواند لحاظ گردد، که در رودخانه‌های طبیعی این ضریب بسیار بزرگ‌تر از مقدار آزمایشگاهی آن است. ضریب بازیافت بار معلق (α) نسبت غلظت نزدیک بستر به غلظت میانگین رسوب معلق در یک مقطع می‌باشد. این ضریب به‌ندرت شناخته شده است و تعیین آن از نظر تئوریک بسیار مشکل است. معمولاً این ضریب را از طریق توزیع غلظت راس^۵ و یا توزیع‌های دیگر غلظت بار معلق برآورد می‌کنند. روابط زیادی برای محاسبه این پارامتر وجود دارد (۱۶). وو و وانگ (۱۴) و ملکی و خان (۹) ضریب بازیافت بار معلق را به صورت معادله زیر تعریف کردند:

$$\alpha = \min[\alpha_0, (1 - P_m) / C] \quad (۲)$$

که در آن α_0 مقدار ثابت، P_m می‌باشد. لین (۸) رابطه زیر را برای ضریب بازیافت ارائه کرد:

$$\alpha = 3.25 + 0.55 \ln \left(\frac{\omega_s}{kU_*} \right) \quad (۳)$$

U_* سرعت برشی ذرات بستر می‌باشد.

مقدار ضریب طول انطباق و ضریب بازیافت به مورد مطالعاتی بستگی دارد و باید براساس داده‌های اندازه‌گیری کالیبره گردد (۹). پایه و اساس تئوری خاصی برای تعیین دقیق این ضرایب در رودخانه‌های طبیعی وجود ندارد. بنابراین این ضرایب یا به صورت تجربی و یا براساس یک سری شبیه‌سازی‌های عددی به دست می‌آید.

جریان سیل در محل تلاقی روی فرایند روندیابی سیل، مورفولوژی رودخانه و فعالیت‌های بشری براساس یک مدل پیشنهادی سیل، پرداختند. مدل پیشنهادی براساس کوپل کردن معادلات هیدرولیکی، شبکه عصبی و تئوری احتمال بنا نهاده شده است. روندیابی سیل در محل تلاقی با استفاده از موج کینماتیک انجام شده است.

بر اساس حالت انتقال رسوب، مدل‌های انتقال رسوب به صورت تعادلی^۱ و غیر تعادلی^۲ طبقه‌بندی می‌گردند. در بسیاری از مدل‌ها، فرض می‌شود که نرخ انتقال رسوب واقعی با ظرفیت حمل رسوب توسط جریان در شرایط تعادلی در هر نقطه‌ی محاسباتی برابر است. مدل‌ها بر اساس این فرضیه تعادلی موضعی، مدل‌های انتقال رسوب در شرایط تعادل نامیده می‌شوند. حالت تعادلی کامل، به‌ندرت در شرایط طبیعی وجود دارد. فرض تعادل موضعی واقعی نیست، به‌خصوص در شرایطی که فرسایش و انباشتگی شدیدی وجود دارد. مدل‌های انتقال رسوب بر اساس شرایط غیر تعادلی از این فرضیه صرف‌نظر نموده و با استفاده از معادلات انتقال، نرخ واقعی بار کف و بار معلق را تعیین می‌کنند. امروزه مدل‌های انتقال در شرایط غیر تعادلی به‌نحو گسترده‌ای در مهندسی رودخانه به کار برده می‌شوند (۱۳). در رودخانه‌ها معمولاً فرض می‌شود که دبی بار مواد بستر با ظرفیت انتقال رسوب جریان برابر است، به این معنی که بار مواد بستر در حالت تعادلی منتقل می‌شود. با این وجود شرایطی وجود دارد که در آن اثرات تاخیرات زمانی و مکانی بسیار مهم هستند. در حالت تعادلی تبادل ذرات رسوب بین بستر و ستون آب به صورت آبی رخ می‌دهد در حالی که در حالت غیرتعادلی این تبادل با تاخیر مکانی و زمانی اتفاق می‌افتد و به‌صورت آبی نیست. محققین برای تمایز بین حالت تعادلی و غیر تعادلی، دو پارامتر به اسم ضریب طول انطباق^۳ و ضریب بازیافت^۴ را به ترتیب برای بار بستر و بار معلق تعریف کرده‌اند (۱۷). در تحقیق حاضر به‌طور مفصل بررسی حساسیت این ضرایب غیرتعادلی در سیستم‌های رودخانه‌ای و تاثیر آن‌ها در پروفیل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است. طول انطباق برای انتقال بار بستر، معمولاً با فرض این‌که این طول بر اساس اندازه فرم بستر غالب در رودخانه مقیاس‌بندی شود، برآورد می‌گردد. این فرض می‌تواند منجر به تخمین این طول در محدوده‌ای از چند برابر عرض کانال تا طول ریپل ماسه‌ای یا طول گام جهش یک دانه رسوبی شود یا حتی منجر به این نتیجه گردد که این طول آن قدر کوچک شود که بتوان آن را نادیده گرفت (۱). گایون و همکاران (۵) برای محدود

1- Equilibrium

2- Non- Equilibrium

3- Adaptation Length Coefficient

4- Recovery Coefficient

رسوب استفاده شده است.

بخش هیدرودینامیک جریان

روندیابی هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها با حل هم‌زمان معادلات پیوستگی و اندازه حرکت که به معادلات سنت-ونانت معروف هستند، انجام می‌شود. روابط ۱ و ۲ فرم کلی معادلات مذکور استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + T_w \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{Q_L}{\Delta X} \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \frac{\partial \left[\frac{Q^2}{A} \right]}{\partial x} = -gAS_f - gA \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (5)$$

با جایگزین نمودن $\frac{\partial Q}{\partial x}$ از معادله پیوستگی در معادله مومنتم و

هم‌چنین جای‌گرینی شیب خط انرژی به صورت $S_f = \frac{n_m^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}}$

می‌توان معادله مومنتم را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\beta Q Q_L}{A \partial x} - \frac{2\beta Q T_w}{A} \frac{\partial Z}{\partial t} - \frac{\beta Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} = -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{n_m^2 Q^2}{AR^{4/3}} \quad (6)$$

که در روابط فوق،

Q ، دبی جریان؛ A ، سطح مقطع جریان؛ Z ، رقوم سطح آب؛

T_w ، عرض سطح آب؛ β ، ضریب تصحیح اندازه حرکت؛ n_m ،

ضریب زبری مانینگ؛ R ، شعاع هیدرولیکی مقطع؛ Q_L ، دبی جریان

ورودی یا خروجی جانبی و S_f ، شیب خط انرژی می‌باشد. در رابطه

فوق می‌توان به جای $\frac{Q_L}{\Delta x}$ از مقدار q_L استفاده کرد. بعد از محاسبه

پارامترهای هیدرولیکی در بخش هیدرودینامیک جریان، این پارامترها

به بخش انتقال رسوب ارسال می‌شوند. در این رساله در بخش انتقال

رسوب، بار معلق و بار بستر به صورت مجزا محاسبه می‌شوند. برای

تخمین ظرفیت حمل رسوب از معادلات تجربی بار معلق و بار بستر، و

برای محاسبه میزان انتقال رسوب در بخش بار معلق از معادله

دینامیکی انتقال-پخش و برای بار بستر از معادله دیفرانسیلی بار

بستر که در ادامه بیشتر به آن اشاره می‌شود، استفاده شده است.

بخش انتقال رسوب

معادلات بار معلق

معادله دینامیکی توازن جرمی در قالب رابطه انتقال-پخش برای

حالت یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی اساس مدل‌سازی کیفی

می‌باشد، که با به‌کارگیری روش فیک برای شار جرمی متلاطم

ژانگ و دوان (۱۸) آنالیز حساسیت تغییرات ارتفاعی بستر را با توجه به ضرایب مختلف طول انطباق و ضرایب بازیافت انجام دادند. ایشان مقادیر متفاوتی را در محدوده ۲۰۰ الی ۸۰۰ فوت برای طول انطباق انتخاب و آنالیز حساسیت را انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تغییرات ارتفاعی بستر به تغییرات ضریب طول انطباق و بازیافت بسیار حساس است. بوهورکز و انسی (۳) نشان دادند که ضریب طول انطباق به‌وسیله سرعت انتقال ذره، پخشیدگی ذره، میزان ته‌نشینی و صعود ذرات از بستر به ستون آب کنترل می‌شود. هم‌چنین نتیجه گرفتند که ضریب طول انطباق مستقل از طول موج فرم بستر می‌باشد. در این مطالعه، مدل عددی هیدرودینامیکی یک بعدی و غیرماندگار توسعه داده شده است، که برای روندیابی جریان و انتقال رسوب به‌صورت شبه‌کوپل در سیستم‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معادله دینامیکی انتقال-پخش و معادله دیفرانسیلی بار بستر به‌ترتیب برای محاسبه میزان انتقال بار معلق و بار بستر استفاده می‌شود. بعد از محاسبه میزان رسوب، از معادله اکسندر برای محاسبه تغییرات ارتفاع بستر در رودخانه استفاده می‌شود. با توجه به طبیعت غیر تعادلی بودن رسوب در رودخانه‌ها، در این مدل عددی از روش غیر تعادلی به‌علت پیچیدگی حل آن و هم‌چنین وجود پارامترهای غیرتعادلی در آن مانند ضرایب طول انطباق و بازیافت بسیار مشکل است. در این تحقیق سعی شده است که مقادیر مناسب و واقع بینانه‌ای برای ضرایب غیر تعادلی انتخاب شود.

مواد و روش‌ها

مدل توسعه یافته در این تحقیق یک مدل از نوع شبه‌کوپل می‌باشد. در گام اول و قبل از شروع گام زمانی، شرایط اولیه برای سیستم رودخانه‌ای و برای مدل عددی تعریف می‌گردد. در مرحله بعد، گام زمانی برای برنامه شروع می‌شود. اولین مرحله بعد از شروع گام زمانی، تعیین شرایط مرزی بالادست و پایین دست برای محدوده موردنظر است که در این مرحله تعریف می‌شود. شرط مرزی بالادست هیدروگراف ورودی و شرط مرزی پائین دست رابطه دبی-اشل می‌باشد که توسط مدل عددی موجود با استفاده از رابطه مانینگ ساخته شده است. بعد از تعیین شرایط مرزی، مدل هیدرودینامیکی جریان اجرا و پارامترهای هیدرولیکی از قبیل دبی، سرعت، عمق و تراز سطح جریان تعیین و محاسبه می‌شوند. پارامترهای محاسبه شده در بخش هیدرودینامیک در همان گام زمانی به بخش انتقال رسوب مدل ارسال، و تراز بستر رودخانه محاسبه و به‌روز می‌شود. همین روند تا پایان زمان اجرای برنامه و تا آخرین گام زمانی ادامه خواهد داشت. در این تحقیق از روش عددی تفاضلات محدود در بخش انتقال هیدرودینامیک جریان و از روش عددی حجم محدود در بخش انتقال

با انتگرال گیری از معادله ۷ روی حجم کنترل یک بعدی و همچنین با توجه به غیرماندگار بودن مسئله، با انتگرال نسبت به زمان از t تا $t + \Delta t$ داریم:

$$\int \int \frac{\partial}{\partial t} (CA) dt dx + \int \int \frac{\partial}{\partial x} (AUC) dt dx - \int \int \frac{\partial}{\partial x} (AD_L \frac{\partial C}{\partial x}) dt dx = \int \int S_T dt dx + \int \int q_L C_L dt dx \quad (11)$$

بعد از انتگرال گیری معادله فیک روی حجم کنترل و نسبت به زمان داریم:

$$A_p(C_i^{n+1} - C_i^n) + (A_u C_e^{n+1} - A_u C_e^n) \frac{dt}{dx} - A D_e \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_e \frac{dt}{dx} + A_w D_w \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_w \frac{dt}{dx} = \omega_w t_w (C_a^* - C) dt + q_L C_L dt \quad (12)$$

برای گسسته سازی معادله فوق از طرح اختلاف پیوند اسپالدینگ (۱۰) که بر اساس ترکیبی از طرح های اختلاف بالادست و اختلاف مرکزی می باشد، استفاده شده است.

معادلات بار بستر

برای محاسبات بار بستر در این تحقیق از معادله تعادل جرم در لایه بستر به صورت زیر استفاده می شود (۱۴):

$$\frac{\partial}{\partial t} (A_b \bar{C}_b) + \frac{\partial Q_b}{\partial x} + (1 - P_m) \frac{\partial A_b}{\partial t} + t_w (D - E) = 0 \quad (13)$$

که A_b سطح مقطع لایه بستر و \bar{C}_b میانگین غلظت رسوب در لایه بار بستر می باشد. با پیروی از وو (۱۲) تغییر بستر به علت بار کل (مواد بستر) می تواند به صورت زیر تعریف گردد:

$$(1 - P_m) \frac{\partial A_b}{\partial t} = \frac{1}{L_b} (Q_i^* - Q_i) \approx t_w (D - E) + \frac{1}{L_b} (Q_b^* - Q_b) \quad (14)$$

که P_m ، تخلخل مواد رسوبی؛ L_b ، ضریب طول انطباق؛ Q_i^* ، ظرفیت انتقال بار کل یا میزان انتقال بار کل و Q_b^* ، ظرفیت حمل بار بستر یا میزان انتقال بار بستر است که از معادلات تجربی به دست می آید و Q_b ، میزان واقعی انتقال بار بستر می باشد. با جای گزینی معادله ۱۴ در معادله ۱۳ و با استفاده از رابطه $Q_b = A_b u_b \bar{C}_b$ معادله بار بستر به صورت زیر منتج می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q_b}{u_b} \right) + \frac{\partial Q_b}{\partial x} = \frac{1}{L_b} (Q_b^* - Q_b) \quad (15)$$

که در رابطه ۱۵، u_b ، سرعت ذرات بار بستر است.

در نهایت داریم:

$$Q_{b(i)}^{n+1} = \left[\left(\frac{Q_b}{u_b} \right)_i^n - \frac{dt}{dx} Q_{b(i)}^n + \frac{dt}{dx} Q_{b(i-1)}^n + \frac{dt}{L_b} Q_{b(i)}^* - \frac{dt}{L_b} Q_{b(i)}^n \right] * u_{b(i)}^{n+1} \quad (16)$$

محاسبه تغییرات ارتفاع بستر

بعد از حل مدل هیدرو دینامیک و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی در گام زمانی مورد نظر و همچنین محاسبات میزان دبی بار بستر و بار معلق، تغییرات ارتفاع بستر رودخانه با استفاده از معادله اکسندر در حالت

(موازنه جرم)، معادله یک بعدی انتقال پخش را می توان به صورت معادله (۷) نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial t} (CA) + \frac{\partial}{\partial x} (QC) - \frac{\partial}{\partial x} (AD_L \frac{\partial C}{\partial x}) = S_T + q_L C_L \quad (7)$$

در رابطه (۷) از سمت چپ، ترم یک نشان دهنده تاثیر محلی، ترم دوم انتقال و ترم سوم انتشار به وسیله پخشیدگی، همچنین از سمت راست ترم یک منبع کاهش دهنده یا افزایش دهنده آلودگی و ترم دوم مقدار دبی ورودی و یا خروجی جانبی می باشد. در رابطه (۷)، C ، غلظت رسوب معلق در مقطع مورد نظر؛ A ، سطح مقطع جریان؛ Q ، دبی جریان؛ D_L ، ضریب پخشیدگی طولی؛ C_L ، غلظت رسوب معلق جریان ورودی یا خروجی جانبی و q_L ، دبی جریان جانبی در واحد عرض است. ترم منبع یا S_T در مدل سازی رسوب معلق و غیر چسبنده به صورت رابطه (۸) در معادله انتقال - پخش قرار می گیرد:

$$S_T = \omega_f C_s + \varepsilon_s \frac{\partial C_s}{\partial y} = E - D \quad (8)$$

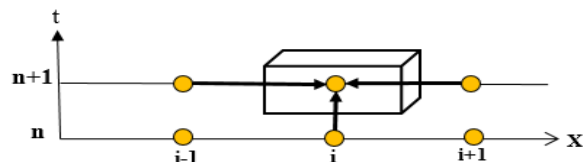
که در آن پارامتر E ، میزان رسوبات وارد شده به ستون آب از لایه بستر، و پارامتر D ، مقدار رسوبات ته نشین شده از ستون آب روی بستر می باشد. در حالت تعادلی نرخ تبادل رسوب بین بار معلق و بار بستر یکسان و برابر لحاظ می گردد، یعنی داریم:

$$S_T = E - D = 0 \quad (9)$$

بر اساس نظریه انتقال رسوب در حالت غیر تعادلی، α به عنوان ضریب بازیافت رسوب معلق تعریف شده است، که در حالت غیر تعادلی ترم منبع به صورت رابطه (۱۰) تعریف می شود:

$$S_T = \omega_f C_s + \varepsilon_s \frac{\partial C_s}{\partial y} = E - D = \alpha \omega_s t_w (C_a^* - C_a) \quad (10)$$

که در آن C_a^* ، ظرفیت حمل بار رسوب معلق که با استفاده از معادلات تجربی محاسبه می شود و C_a ، میزان واقعی انتقال بار معلق است که با استفاده از معادله دینامیکی انتقال - پخش به دست می آید. قدم اصلی در روش حجم محدود، انتگرال گیری از معادلات حاکم روی یک حجم کنترل (شکل ۱) برای رسیدن به یک معادله گسسته در نقاط گرهی می باشد.



شکل ۱- شماتیکی از حجم کنترل
Figure 1- Schematic of control volume

$$\Delta Z(k, i) = 0.5 * \left[\frac{\Delta t}{t_w(k, i)(1 - P_m)} [t_w(k, i)w_s(C_a^n(k, i) - C_a^{n*}(k, i))] + \frac{1}{L_b(k, i)} (Q_b^n(k, i) - Q_b^{n*}(k, i))] \right] +$$

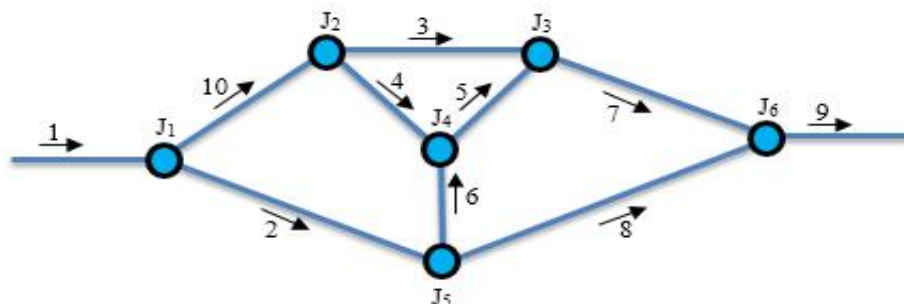
$$0.25 * \left[\frac{\Delta t}{t_w(k, i-1)(1 - P_m)} [t_w(k, i-1)w_s(C_a^n(k, i-1) - C_a^{n*}(k, i-1))] + \frac{1}{L_b(k, i-1)} (Q_b^n(k, i-1) - Q_b^{n*}(k, i-1))] \right] +$$

$$0.25 * \left[\frac{\Delta t}{t_w(k, i+1)(1 - P_m)} [t_w(k, i+1)w_s(C_a^n(k, i+1) - C_a^{n*}(k, i+1))] + \frac{1}{L_b(k, i+1)} (Q_b^n(k, i+1) - Q_b^{n*}(k, i+1))] \right] \quad (22)$$

برای رسوب‌گذاری مقدار ΔZ ، مثبت و برای فرسایش مقدار آن منفی خواهد بود. در نهایت با استفاده از رابطه ۲۲ تغییرات فرسایشی و رسوب‌گذاری در مسیر رودخانه محاسبه شده است. این تغییرات به بخش هیدرودینامیک مدل ارسال شده و بستر اولیه رودخانه مطابق آن به‌روز می‌شود.

نتایج و بحث

پارامترهای غیر تعادلی رسوب شامل ضریب طول انطباق بار بستر و ضریب بازیافت بار معلق، از جمله پارامترهای بسیار حساس و مهم در بحث مدل‌های عددی انتقال رسوب هستند که مطالعات نشان داده است، روش مبنا و خاصی برای تعیین این پارامترها وجود ندارد. برای درک بهتر اهمیت این پارامترها در تغییرات بستر رودخانه، در این تحقیق، آنالیز حساسیت روی پارامترهای غیر تعادلی برای سیستم رودخانه‌ای موجود در چاودری (۴) انجام گرفت. به‌طوری‌که مقادیر ثابت مختلفی برای ضریب طول انطباق در نظر گرفته شد. سعی شده است که مقادیر انتخابی برای ضریب طول انطباق، تقریباً ضرایبی از فاصله بین مقاطع عرضی رودخانه باشد. سیستم رودخانه‌ای چاودری به‌صورت حلقه‌ای، دارای ۱۰ شاخه و ۶ اتصال می‌باشد (شکل ۲). همه کانال‌ها دارای مقطع مستطیلی هستند. سایر مشخصات ژئومتری هر یک از شاخه‌های این سیستم رودخانه‌ای در منبع مذکور ذکر شده است.



شکل ۲- سیستم رودخانه‌ای حلقوی
Figure 2- Chaudhry river system

غیر تعادلی محاسبه خواهد شد:

$$(1 - P_m) \frac{\partial A_b}{\partial t} = B(D - E) + \frac{1}{L_b} (Q_b - Q_b^*) \quad (17)$$

که در آن P_m ، تخلخل مواد بستر و A_b ، سطح لایه بستر است که به جای آن از تراز بستر یعنی Z_b ، استفاده شده است. با توجه به اینکه عرض سطح آب در مقاطع نامنظم و طبیعی رودخانه در هر ارتفاعی تغییر می‌کند، بنابراین در معادله اکسز غیر تعادلی به جای عرض کف کانال از عرض فوقانی سطح آب استفاده شده است ($B = t_w$).

داریم:

$$B(D - E) = Bw_s (C_a - C_a^*) \quad (18)$$

که در آن C_a ، میزان انتقال واقعی بار معلق که پیشتر از معادله دینامیکی انتقال-پخش محاسبه شد؛ و C_a^* ، میزان ظرفیت حمل بار معلق است که از روابط تجربی محاسبه می‌شود. در نهایت معادله اکسز غیر تعادلی به‌صورت زیر گسسته‌سازی شده است:

$$Z_b^{n+1} = Z_b^n + \frac{\Delta t}{t_w(1 - P_m)} [t_w w_s (C_a^n - C_a^{n*}) + \frac{1}{L_b} (Q_b^n - Q_b^{n*})] \quad (19)$$

داریم:

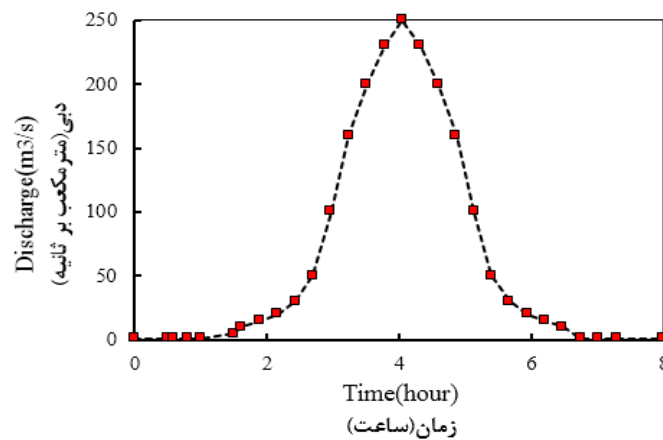
$$\Delta Z = Z_b^{n+1} - Z_b^n \quad (20)$$

$$\Delta Z = \frac{\Delta t}{t_w(1 - P_m)} [t_w w_s (C_a^n - C_a^{n*}) + \frac{1}{L_b} (Q_b^n - Q_b^{n*})] \quad (21)$$

در این تحقیق گسسته‌سازی معادله اکسز، به‌صورت زیر انجام شده است، به‌طوری‌که برای محاسبه تغییر ارتفاع بستر در گره i ، علاوه بر خصوصیات خود این گره، از مشخصات گره‌های اطراف نیز، اما با ضرایب وزنی کمتری استفاده شده است.

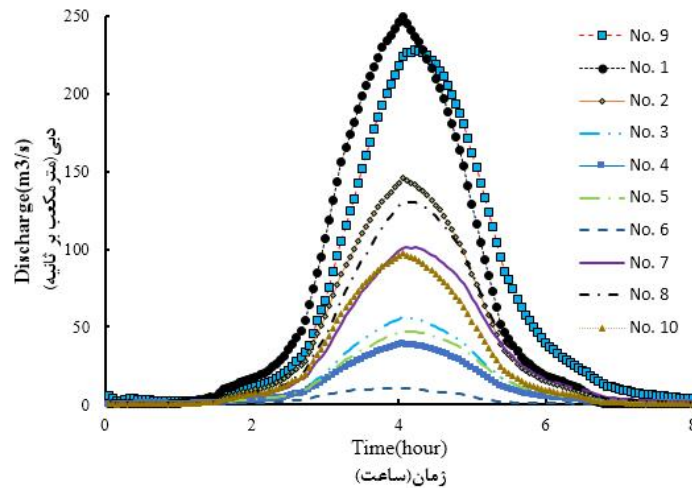
ورودی به سیستم رودخانه‌ای چاودری، در شاخه شماره یک معادل ۱۸۴۱۲۹۹ متر مکعب و در شاخه انتهایی سیستم یعنی شاخه شماره ۹، معادل ۱۸۴۰۹۴۶ مترمکعب برآورد شد. با توجه به این‌که مقدار تلفات نشت در طول مسیر نادیده گرفته شده است، بنابراین می‌بایست حجم هیدروگراف در شاخه شماره ۱ و ۹ با یکدیگر برابر باشند. مقدار خطای مدل در این حالت برابر ۰/۰۲ درصد می‌باشد، که خطای بسیار کوچک و قابل صرفنظر کردن است. مقادیر محاسبه شده حجم هیدروگراف در محل اتصال شاخه‌ها، حاکی از دقت بالای مدل در ارضای رابطه پیوستگی می‌باشد.

به منظور شبیه سازی سیستم رودخانه‌ای مورد نظر با استفاده از مدل عددی توسعه یافته از یک هیدروگراف سیل فرضی با زمان پایه ۸ ساعت، که مقدار دبی اوج آن معادل ۲۵۰ متر مکعب بر ثانیه است، استفاده شده است. این هیدروگراف به عنوان شرط مرزی بالادست به کانال شماره یک وارد شده است. بعد از اجرا و شبیه‌سازی مدل، روندیابی هیدروگراف سیل نشان داده شده در شکل ۳ برای تمامی شاخه‌های سیستم رودخانه‌ای چاودری انجام شد. شکل ۴ هیدروگراف روندیابی شده را به تفکیک برای همه شاخه‌های سیستم رودخانه‌ای چاودری نشان می‌دهد. فرض شده است، تلفات انتقال در طول مسیر این سیستم رودخانه‌ای معادل صفر می‌باشد. میزان حجم هیدروگراف



شکل ۳- هیدروگراف جریان ورودی به شاخه شماره یک

Figure 3- Inflow hydrograph in river No. 1



شکل ۴- روندیابی هیدروگراف سیل در سیستم رودخانه‌ای چاودری

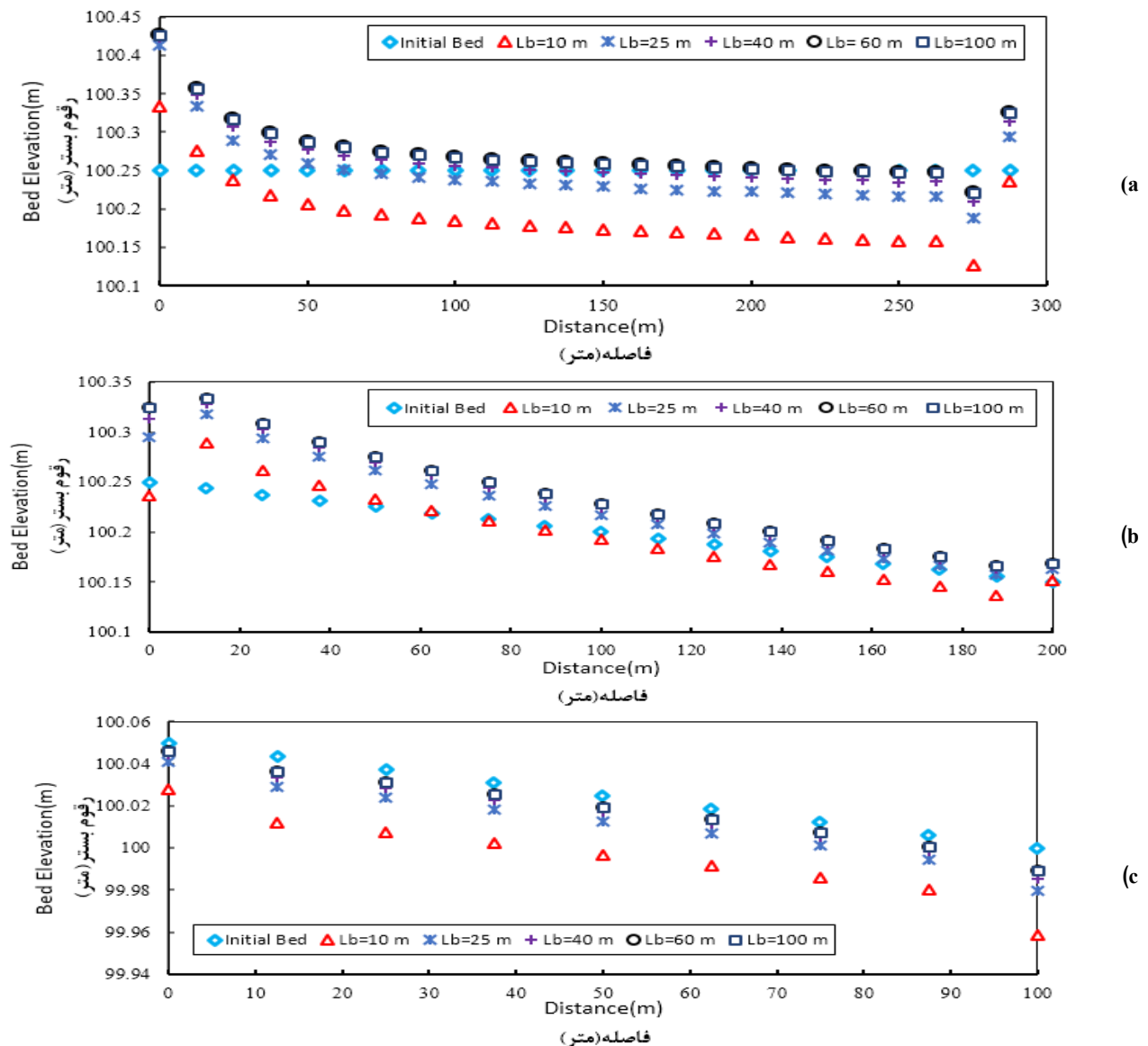
Figure 4- Flow routing in Chaudhry river system

به ضریب طول انطباق روی سیستم رودخانه‌ای چاودری نشان داد، که با افزایش مقدار این ضریب، فرسایش‌پذیری در پروفیل طولی رودخانه کاهش و مقدار رسوب‌گذاری افزایش پیدا می‌کند. این روند را می‌توان

جهت بررسی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در سیستم رودخانه‌ای چاودری از توابع انتقال وایف و همکاران برای بار معلق و میرپیتز - مولر برای بار بستر استفاده شده است. آنالیز حساسیت نسبت

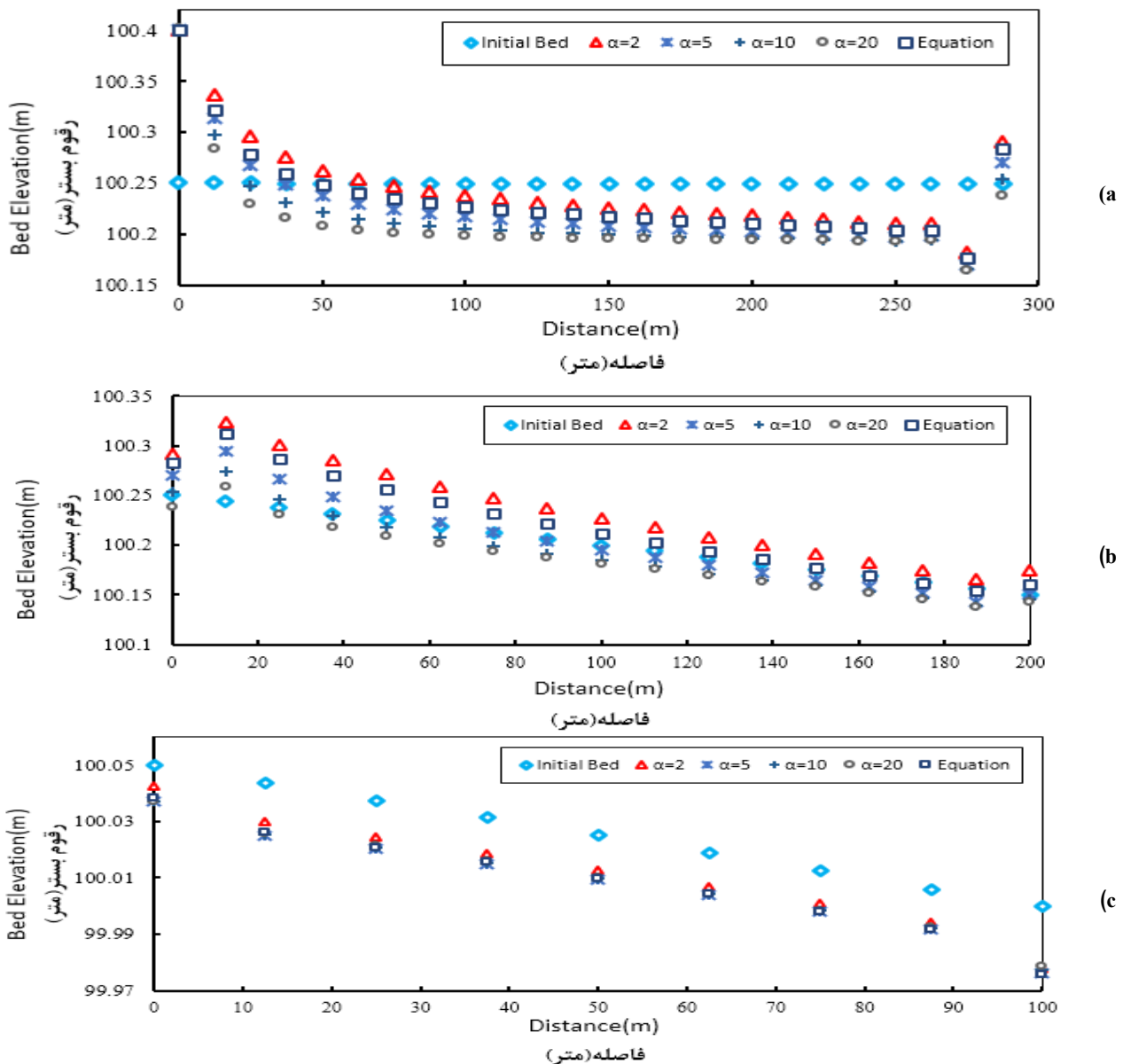
توجه به مباحث گفته شده در بخش مقدمه، مقادیر انتخاب شده برای ضریب بازیافت معادل ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ می‌باشد. علاوه بر اعداد ثابت انتخاب شده برای ضریب بازیافت، این ضریب از طریق معادله ۳ نیز محاسبه و با ضرایب دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. آنالیز حساسیت نسبت به ضریب بازیافت بار معلق روی سیستم رودخانه‌ای چاودری نشان داد، که با افزایش مقدار این ضریب، فرسایش پذیری در پروفیل طولی رودخانه افزایش و مقدار رسوب گذاری کاهش پیدا می‌کند. این روند را می‌توان در تمام شاخه‌های این سیستم رودخانه‌ای مشاهده نمود.

در تمام شاخه‌های این سیستم رودخانه‌ای مشاهده نمود. همچنین با توجه به شکل ۵ می‌توان پی برد که تغییرات ارتفاع بستر با توجه به تغییرات ضریب طول انطباق در دبی‌های بالا، افزایش می‌یابد. در شاخه‌های شماره ۱ و ۹ که دبی معادل دبی ورودی به سیستم می‌باشد، این تغییرات نسبت به شاخه‌های دیگر که دبی به تناسب بین آن‌ها تقسیم می‌گردد، بیشتر است. نکته مهم دیگری که از این تحقیق نتیجه گرفته شد این است، که با انتخاب ضریب طول انطباق، معادل با مضربی از ۱ الی ۳ برابر فاصله بین مقاطع عرضی، نتایج واقع بینانه‌تری می‌توان از مدل عددی گرفت. شکل ۶ نیز آنالیز حساسیت پارامتر ضریب بازیافت بار معلق را روی تغییرات بستر نشان می‌دهد. با



شکل ۵- آنالیز حساسیت تغییرات بستر به ضریب طول انطباق در رودخانه (a شماره ۱، b شماره ۲، c شماره ۷)

Figure 5- Sensitivity analyses of bed elevation change on bed load adaptation length L_b in river a)no.1, b)no.2, c)no.7



شکل ۶- آنالیز حساسیت تغییرات بستر به ضریب بازیافت در رودخانه (a) شماره ۱، (b) شماره ۲، (c) شماره ۷

Figure 6- Sensitivity analyses of bed elevation change on suspended load recovery coefficient α in river a) no.1, b) no.2, c) no.7

سیستم‌های رودخانه‌ای حلقوی و پیچیده دارد. در الگوریتم در نظر گرفته شده برای این مدل عددی، نخست معادلات هیدرودینامیکی جریان برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی از قبیل سرعت، دبی، سطح مقطع جریان و ... حل می‌شوند. سپس در همان گام زمانی این پارامترها به بخش انتقال رسوب ارسال می‌شوند و پارامترهای هیدرولیکی تخمین زده شده برای محاسبه بار معلق و بار بستر و همچنین تغییرات تراز بستر مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس تراز جدید محاسبه شده، دوباره به بخش هیدرودینامیک جریان فرستاده

جمع‌بندی

رودخانه‌ها همواره از گذشته‌های دور مورد توجه جوامع انسانی بوده‌اند بطوریکه رودخانه‌ها نه تنها در سیمای کلی سطح زمین نقش دارند، بلکه شکل زیستن انسان در کره زمین را تعیین می‌کنند که تشکیل تمدن‌های بزرگ و کهن در کناره رودخانه‌ها از آن جمله است. تجزیه و تحلیل میزان فرسایش و رسوب‌گذاری از پیچیده‌ترین مباحث هیدرولیک رسوب و رودخانه می‌باشد. مدل عددی توسعه یافته در این رساله توانایی شبیه‌سازی و روندیابی جریان و انتقال رسوب را در

است و آنالیز حساسیت نیز روی این مقادیر انجام شد. نتیجه گرفته شد، که با انتخاب ضریب طول انطباق، معادل با مضربی از ۱ الی ۳ برابر فاصله بین مقاطع عرضی، نتایج واقع بینانه‌تری می‌توان از مدل عددی گرفت. برای ضریب بازیافت بار معلق نیز بهتر است از معادله تجربی لین (۸) استفاده شود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از رساله دکتری نویسنده اول می‌باشد. نویسندگان این تحقیق از همکاری تمامی اساتید گروه مهندسی آب دانشگاه رازی کمال تشکر را دارند.

شده و ژئومتری کانال براساس آن دوباره تعدیل می‌گردد. برای محاسبه تغییرات بستر رودخانه، می‌توان از معادله اکسندر در دو حالت تعادلی و غیر تعادلی استفاده نمود. با توجه به طبیعت غیر تعادلی بودن رسوب در رودخانه‌ها، در این مدل عددی، خلاف بسیاری از مدل‌های شناخته شده موجود مانند HEC-RAS، از روش غیر تعادلی معادله اکسندر استفاده شده است. استفاده از روش غیر تعادلی به علت پیچیدگی حل آن و همچنین به جهت وجود پارامترهای غیر تعادلی موجود در آن مانند ضرایب طول انطباق و بازیافت بسیار سخت و مشکل است.

در این تحقیق ضریب طول انطباق برای بار بستر و ضریب بازیافت برای بار معلق در بخش انتقال رسوب در نظر گرفته شده

منابع

- 1- Armanini A. 1992. Variation of bed and sediment load mean diameters due to erosion and deposition processes. Dynamics of gravel-bed rivers, Wiley, 5:352-359.
- 2- Bai Y., and Duan J.G. 2014. Simulating unsteady flow and sediment transport in vegetated channel network. Journal of Hydrology, 515:90-102.
- 3- Bohorquez P., and Ancey C.h. 2015. Stochastic-deterministic modeling of bed load transport in shallow water flow over erodible slope: Linear stability analysis and numerical simulation. Advanced Water Resources, 83:36-54.
- 4- Chaudhry M.H. 1993. Open channel flow. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- 5- Gaeuman D., Sklar L., and Lai Y. 2014. Flume experiments to constrain bedload adaptation length. Journal of Hydrologic Engineering, 20(5):1-6.
- 6- Hongming H., Yong Q.T., Xingmin M.u., Jie Z.h., Zhanbin L.i., Nannan C., Qingle Z.h., Soksamnang K., and Chantha O. 2015. Confluent flow impacts of flood extremes in the middle yellow river. Quaternary International, 380:382-390.
- 7- Juxiang J., Jing H., Liu C., and Tao J. 2011. Hydrodynamic and water quality models of river network and its application in the Beiyun River. 978-1-4244-5089-3/11/2011 IEEE.
- 8- Lin B. 1984. Current study of unsteady transport of sediment in China. In: Proc. Japan-China Bilateral Seminar on River Hydraulics and Engineering Experiences, Tokyo-Kyoto-Saporo, Japan, 337-342.
- 9- Maleki Safarzadeh F., and Khan A. 2016. 1-D coupled non-equilibrium sediment transport modeling for unsteady flows in the discontinuous Galerkin framework. Journal of Hydrodynamics, 28(4):534-543.
- 10- Spalding D.B. 1972. A Novel Finite Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives. Journal Number Methods Engineering, 4:1-551.
- 11- Termini D. 2014. Non-uniform sediment transport estimation in non-equilibrium situation. Procedia Engineering, 70:1639-1648.
- 12- Wu W. 2004. Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. Journal of Hydraulic Engineering, 130(10): 1013-1024.
- 13- WU W. 2007. Computational river dynamics. Abingdon, UK: CRC Press, Taylor and Francis Group.
- 14- WU W., and Wang S.S. 2007. One-dimensional modeling of dam- break flow over movable beds. Journal of Hydraulic Engineering, 133(1):48-58.
- 15- Wu X.L., Xiang X.H., Wang C.H., Li L., and Wang C.h. 2014. Water level updating model for flow calculation of river networks. Water Science and Engineering, 7(1):60-69.
- 16- Yang C.H., and Marsooli R. 2010. Recovery factor for nonequilibrium sedimentation processes. Journal of Hydraulic Research, 48(3):409-413.
- 17- Yang C.T., and Simoes F.J.M. 2002. User's manual for Gstars3.0 (generalized stream tube for alluvial river simulation). USBR.
- 18- Zhang S., and Duan J. 2011. 1D finite volume model of unsteady flow over mobile bed. Journal of Hydrology, 405(1):57-68.
- 19- Zhang S., Duan J., and Strelkoff T. 2013. Grain-scale non-equilibrium sediment transport model for unsteady flow. Journal of Hydraulic Engineering, 139(1):22-36.

The Effect of Non-Equilibrium Coefficients on Sediment Transport in Rivers Using Numerical Model

S. Mohamadi^{1*}- R. Ghobadian²- S.M. Kashefipour³

Received: 03-07-2017

Accepted: 15-01-2018

Introduction: It is so important for engineers to be able to predict the places in which deposition and scouring occurs. In recent two decades using the numerical models are common for simulating flow and sediment transport. Numerical models are valuable tools for estimating flow conditions and sediment transport, and are widely applied in water resources management. For this reason, many researches focus on modeling and simulation of flow on a mobile bed in natural and alluvial rivers. Analyzer of sediment transport is one of the most complicated topics in sediment and river hydraulic.

Material and Methods: In this research a one dimensional, unsteady, hydrodynamic model is developed which can be used for simulating flow and sediment transport as semi-coupled model in river systems. In this research, the Saint- Venant's first order partial differential hyperbolic equations are numerically solved using the Visual Basic program for river systems. In this research study a semi implicit finite difference scheme is developed to solve the Saint- Venant equations for unsteady flow. The linear equations are produced based on the partial differential equations and the staggered technique, so it is possible to employ the tri-angular matrix algorithm (TDMA) to solve them, with this algorithm the time of running model being minimum due to the least mathematical computations. The matrix form of the linearized momentum and continuity equations for a channel with upstream and downstream boundary conditions is provided. Another technique used to solve the matrix of the linear equations is Influence Line Technique (ILT). Base flow discharge and depth in each branch are introduced into the model as the initial conditions. To avoid divergence in numerical calculations, the downstream end discharge of each branch is calculated using initial flow depth and stage-discharge or Manning's relationship. At the junctions, the upstream discharge is calculated using the algebraic sum of the discharges of the downstream branches and vice-versa; this process is continued up to the last branches at the upstream of the river system. After solving the above equations, the computed hydraulic parameters in this part are sent to the sediment transport segment. In the sediment subroutine the bed and suspended dynamic equations are discretized by finite volume method, and solved with flow equations as semi-coupled scheme. In this study the bed and suspended load rates are individually solved. The dynamic advection- dispersion equation and the bed load differential equation were applied to calculate the suspended sediment concentration and bed load transport, respectively. The Exner equation is then used to predict the changes in the river bed elevations in non-equilibrium conditions. Because of the nature, the sediment transport is often in non-equilibrium form, in this study, the non-equilibrium Exner equation is used to compute the bed elevations, unlike many of the known models. The use of non-equilibrium method due to the complexity of the solution and the presence of non-equilibrium parameters such as coefficients of the adaptation length and recovery is very difficult.

Results and Discussion: In non-equilibrium conditions, the numerical models have high sensitivity to two parameters including, the adaptation length coefficient for bed load and recovery coefficient for suspended load, with the sensitivity analysis for these coefficients being carried out in this research. In this study, a sensitivity analysis was performed on these parameters using developed numerical model. The developed model has this ability to simulate flow and sediment transport in complex and loop river systems. Finally, the model was simulated for the Chaudhry loop river systems. This river system has 9 branches that form the loop. All channels have rectangular sections and their flows are sub-critical. The upstream boundary condition is an unsteady hydrograph with peak discharge of 250 cubic meters per seconds and base time of 8 hours. The calculated stage and discharge by the model (using Manning's equation) was supplied to the model as a downstream boundary condition at last node. The model outputs are discharged hydrographs on different sections of each channel. The developed model has good ability to simulate the flow and sediment transport in river systems. The result

1 - Graduated Ph.D of Water Structures and Associate Professor Water Engineering Department, Razi University
(*-Corresponding Author Email: Sabah.Mohamadi@gmail.com)

3- Professor, Water Structures Department, Shahid Chamran University of Ahvaz

showed that by selecting the adaptation length coefficient, equivalent to a multiple of 1 to 3 times the distance between cross sections, the results of the numerical model can be more realistic. Also it was concluded that empirical equation of Lin(1984) used for the recovery factor of the suspended load.

Keywords: River System, Semi-Coupled, Exner equation, One dimensional

