

تأثیر تکنیک حل معادلات و ضریب زبری در شبیه‌سازی جریان کانال روباز با بستر فرسایش پذیر

یوسف حسن زاده¹، محمدعلی کی‌نژاد²، محمدتقی اعلمی³، داوود فرسادی‌زاده⁴ و کیومرث روشنگر^{5*}

تاریخ دریافت: 89/3/31 تاریخ پذیرش: 89/10/25

1- استاد، دانشیار گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

2- استاد، گروه عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند

4- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

5- دانشجوی دکتری، گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه E-mail: roshangari@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق یک مدل بعدی برای شبیه‌سازی جریان روباز و بررسی تغییرات بستر در کانال‌های فرسایش‌پذیر ارائه شده است. جهت واسنجی و ارتقای کارایی مدل تکنیک حل معادلات حاکم بر پدیده مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی نشان می‌دهد روش جفت که در آن حل معادلات به طور همزمان و مرتبط انجام می‌شود دارای کارایی بهتر و خطای محاسبانی کمتری نسبت به روش غیرجفت می‌باشد. به دلیل پیچیدگی و عدم قطعیت در تعیین ضریب اصطکاک برای کانال‌های آبرفتی، با کاربرد همزمان روش بهینه‌سازی و مدل پیشنهادی، ضریب زبری مانینگ با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به صورت دینامیکی تعیین گردید. نتایج گویای آن است که به کارگیری ضرایب زبری بهینه در مدل باعث افزایش دقت شبیه‌سازی جریان بر روی بستر فرسایش‌پذیر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، ضریب زبری، کانال آبرفتی، واسنجی

Effects of Solution Techniques of Equations and Friction Factor on Simulation of Open Channel Flow with Erodible Bed

Y Hassanzadeh¹, MA Keynejad², MT Aalami³, D Farsadizadeh⁴ and K Roushangar^{5*}

Received: June 21, 2010 Accepted: Jan 15, 2011

^{1,3}Prof. and Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Civil, Engin., Univ. of Tabriz, Iran

²Prof., Dept. of Civil Engin., Faculty of Civil Engin., Univ. of Sahand, Iran

⁴Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

⁵PhD Student, Dept. of Water Engin., Faculty of Civil, Engin., Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding author Email: roshangari@tabrizu.ac.ir

Abstract

In this research a numerical model has been presented which simulates the 1-D open channel flow over an erodible bed. For calibration and improving the model, solution procedure of the governing equations has been investigated. Comparison of the model results with the experimental data shows that the simultaneous solution procedure of the complete governing equations decreases the computational errors and improves the simulated results. Due to complexity and uncertainty in determining the friction factor of alluvial channels, an optimization technique and the proposed model have been coupled to dynamically identify the Manning roughness parameter by using the experimental data. The study shows that application of the optimized roughness coefficient increases the accuracy of flow simulation over an erodible bed.

Keywords: Alluvial channel, Calibration, Roughness coefficient, Simulation

مقدمه

مورد توجه قرار داده اند. بسیاری از این شبیه‌سازی‌ها شامل مدل‌های مبتنی بر معادلات مذکور است. مدل‌های تحلیلی عمدتاً دارای فرض‌های ساده‌کننده‌ای نظیر حذف عبارت $\frac{\partial u}{\partial t}$ و $\frac{\partial h}{\partial t}$ از معادلات پیوستگی جریان و پیوستگی رسوب و یا حذف جمله $u \frac{\partial u}{\partial x}$ از معادله ممنتم هستند. در این مورد می‌توان به کارهای محققینی نظیر سونی و همکاران (1980)، گیل (1983) ریرینک و واندراسانده (1985)، بیگن (1988)، زانگ و کاه‌اویتا (1990) و لناو و هلمفلت (1992) اشاره نمود. اخیراً به

از حدود سه دهه پیش مدل‌های عددی متعددی برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های آبرفتی، با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های ناشی از خسارات و افزایش دقت محاسباتی در زمینه‌های مختلف مهندسی رودخانه گسترش و توسعه پیدا کرده اند. مدل‌سازی یک بعدی جریان روباز و ارزیابی تغییرات بستر در کانال‌های فرسایش پذیر، به کمک معادلات سن و نان (پیوستگی و اندازه حرکت جریان) و معادله اکزنر (پیوستگی رسوب) انجام می‌شود. متخصصین متعددی شبیه‌سازی یک بعدی جریان با بستر متحرک در کانال‌های روباز را

موسوم به مسئله معکوس¹ بوده و تحلیل آن نسبتاً پیچیده خواهد شد. از موارد موجود در مراجع علمی جهت تخمین و واسنجی ضریب زبری جریان غیر دائمی می‌توان به مواردی نظیر بکر و یه (1972)، فرد و اسمیت (1978) و واسانتالال (1995) اشاره نمود.

هدف از این تحقیق حل معادلات سن و نان و معادله پیوستگی رسوب به روش تفاضلات محدود صریح و الگوی دو مرحله‌ای ریچ مایر (با دقت از مرتبه دوم مکانی و زمانی) به دو صورت جفت و غیر جفت بوده و ارزیابی تکنیک حل معادلات به کمک نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در یک کانال با بستر متحرک بوده است. همچنین، نقش تکنیک حل معادلات، ساده سازی معادله پیوستگی رسوب و انتخاب معادله رسوب در شبیه‌سازی پروفیل جریان و بستر مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت ضریب زبری بستر کانال رسوبی بصورت مسئله معکوس و به کمک الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی تعیین گردیده است. عمق‌های جریان و دبی‌های اندازه‌گیری شده در مقاطع و زمان‌های مختلف به عنوان ورودی تابع هدف بهینه‌سازی ملحوظ گردیده است. با حل مزدوج و همزمان معادلات مدل و تابع بهینه‌سازی، ضرایب زبری واسنجی و بهینه شده به دست آمده و مدل‌سازی با ضرایب زبری بهینه مجدداً انجام پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر پدیده

در مدل مزبور معادلات به کار رفته از نوع معادلات دیفرانسیل جزئی بوده که در حالت غیر دائمی و یک بعدی به صورت معادله پیوستگی جریان آب، معادله اندازه حرکت آب و معادله پیوستگی رسوب می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی جریان:

$$(h)_t + (hu)_x + (z)_t = 0 \quad [1]$$

دلیل ایرادات و محدودیت‌های موجود در چنین روش‌های تحلیلی، استفاده از مدل‌های عددی مبتنی بر روش تفاضلات محدود رشد چشمگیری داشته است. برای استفاده از این روش‌های عددی در مدل‌سازی جریان‌های رسوبی در مجاری روباز، توجه به دو نکته اساسی حائز اهمیت است.

نکته اول مربوط به تکنیک حل معادلات حاکم بر پدیده و چگونگی ارتباط بین پارامترها در شبکه می‌باشد. در روش غیر مزدوج، نخست معادلات پیوستگی و اندازه حرکت جریان با فرض تغییرات ناچیز بستر حل شده و سپس با داده‌های به دست آمده از آن، معادله پیوستگی رسوب حل عددی می‌شود. در روش جفت تعیین پارامترها بصورت همزمان و مرتبط انجام شده و تغییرات ایجاد شده در بستر توسط معادله رسوب در معادله پیوستگی و اندازه حرکت جریان اعمال می‌شود.

برخی از محققین نظیر لین (1987)، کوریا و همکاران (1992) و کاو و همکاران (2002) بسته به مورد و شرایط شبیه‌سازی، استفاده از روش غیر جفت را مورد نقد قرار داده‌اند. در حالی‌که افرادی نظیر کاظم و چادری (1998) ادعا کردند روش غیر جفت، روش نامتعادلی نبوده و منجر به جواب‌های قابل قبول می‌گردد. در سال‌های اخیر نیز فرسادی‌زاده و همکاران (1385) و حسن‌زاده و همکاران (1389) مدل‌سازی جریان‌های غیردائمی را بطور تجربی و روش‌های عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. نکته دوم که در مدل‌سازی جریان‌های با بستر متحرک باید در نظر گرفته شود، مسئله متغیر بودن ضریب زبری بستر است. در چنین شرایطی به دست آوردن تابع ضریب زبری بستر به دلیل تأثیر عوامل متعدد بر آن (نظیر شکل بستر، پارامترهای جریان، اندازه دانه‌ها و...)، وجود عدم قطعیت و پیچیدگی رگرسیون غیر خطی توابع چند متغیره، کار مشکلی بوده و با خطای قابل توجهی همراه است. در این حالت، چنانچه ضریب زبری مانینگ در تابع شیب خط انرژی در معادله اندازه حرکت به صورت متغیر در نظر گرفته شود و با استفاده از داده‌های تجربی به روش سعی و خطا همراه با معادلات حاکم بر پدیده واسنجی شود، مسئله از لحاظ ریاضی

¹Inverse problem

معادله ساده شده پیوستگی جریان:

$$(h)_t + (hu)_x = 0 \quad [2]$$

معادله اندازه حرکت جریان:

$$(hu)_t + (hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)_x - gh(S_0 - S_f) = 0 \quad [3]$$

معادله پیوستگی رسوب:

$$(z)_t + (\frac{1}{1-p})(q_s)_x = 0 \quad [4]$$

که در این روابط h عمق جریان، u سرعت جریان، z رقوم کف کانال، S_0 شیب بستر، S_f شیب خط انرژی، p نسبت تخلخل و q_s دبی رسوبی بار بستر در واحد عرض است. در اینجا برای تحلیل سه معادله اصلی (معادلات پیوستگی و اندازه حرکت آب و پیوستگی رسوب) از دو معادله کمکی دیگر نیز استفاده شده است. این معادلات عبارت از معادله تعیین شیب خط انرژی [5] و معادله تعیین میزان انتقال رسوبات [6] می‌باشند.

$$S_f = \frac{m^2 u^2}{R_h^{4/3}} \quad [5]$$

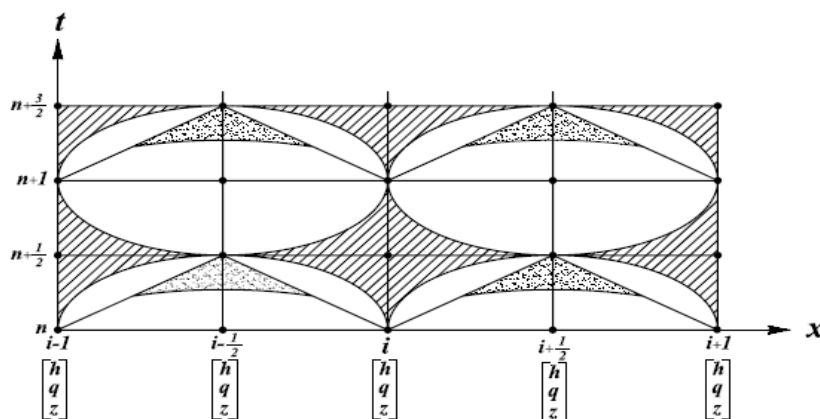
$$q_s = f(u, h, d, \dots) \quad [6]$$

که در آن m ضریب مانینگ، R_h شعاع هیدرولیکی مقطع

جریان و δ ضریب مربوط به مشخصات مصالح بستر است.

الگوی عددی برای حل معادلات

الگوی عددی به کار رفته روش صریح و اصلاح شده لکس و ندرف است که این روش ترکیبی از روش های لکس و لیبفرگ میانی است (اندرسون و همکاران 2006). این روش برای معادلات هذلولوی غیرخطی مناسب بوده و عملکرد آنها براساس پیش‌بینی و تصحیح می‌باشد، به طوریکه در گام نخست مقداری برای متغیر وابسته پیش‌بینی می‌شود و سپس در گام بعدی با استفاده از این مقدار پیش‌بینی شده، مقدار نهائی متغیر انتخاب می‌گردد. روش چند گامی لاکس- و ندرف اولین گام را در نقطه میانی $(i \pm \frac{1}{2})$ اعمال می‌کند، در حالی که گام زمانی $n \pm \frac{1}{2}$ است و سپس در مرحله زمانی $n+1$ ، از روش جهش نقطه میانی (اندرسون و همکاران 2006) برای یافتن متغیرها استفاده می‌گردد. این روش با دقت زمانی و مکانی از مرتبه دوم جزو روش‌های با دقت بالا محسوب می‌گردد (اندرسون و همکاران 2006).



شکل 1- شبکه حل تفاضلات محدود با روش صریح و اصلاح شده لکس و ندرف - ریچ مایر

شبکه حل مطابق شکل 1 به صورت دو گام به شرح زیر است:

$$j_{i\pm 1}^n = gh_{i\pm 1}^n (S_0 - S_f)_{i\pm 1}^n \quad [15]$$

$$j_{i\pm 1/2}^n = gh_{i\pm 1/2}^n (S_0 - S_f)_{i\pm 1/2}^n$$

$$(S_f)_{i\pm 1} = \frac{m^2 |u_{i\pm 1}| u_{i\pm 1}}{R_{h_{i\pm 1}}^{4/3}} \quad [16]$$

$$(S_f)_{i\pm 1/2} = \frac{m^2 |u_{i\pm 1/2}| u_{i\pm 1/2}}{R_{h_{i\pm 1/2}}^{4/3}}$$

جهت کاهش نوسانات ناشی از خطاهای عددی، ویسکوزیته مصنوعی به الگو اضافه می‌شود که روش غیر خطی جمیسون و همکاران (1981) یکی از روش‌های موفق در کاهش نوسانات غیر واقعی در روش‌های حل مرتبه دوم بوده و کمترین خطای احتمالی را به همراه دارد. در اینجا ابتدا متغیرهای Ψ, Γ به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\Psi = \begin{cases} \frac{|h_i - h_{i-1}|}{|h_i| + |h_{i-1}|} & \text{مرز پائین دست} \\ & i=k+1 \\ \frac{|h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1}|}{|h_{i+1}| + 2|h_i| + |h_{i-1}|} & \text{نقاط میانی} \\ & i=2 \text{ تا } k \\ \frac{|h_{i+1} - h_i|}{|h_{i+1}| + |h_i|} & \text{مرز بالادست} \\ & i=1 \end{cases} \quad [17]$$

$$\Gamma^+ = 0.5 \text{Max}(\Psi_{i+1}, \Psi_i) \quad [18]$$

$$\Gamma^- = 0.5 \text{Max}(\Psi_i, \Psi_{i-1})$$

سپس مقادیر نهایی بصورت زیر اصلاح می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} h \\ hu \\ z \end{bmatrix}_i^{n+1} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ z \end{bmatrix}_i^{n+1} + 2\Gamma^+ \begin{bmatrix} h_{i+1} - h_i \\ (hu)_{i+1} - (hu)_i \\ z_{i+1} - z_i \end{bmatrix}^{n+1} - 2\Gamma^- \begin{bmatrix} h_i - h_{i-1} \\ (hu)_i + (hu)_{i-1} \\ z_i - z_{i-1} \end{bmatrix}^{n+1} \quad [19]$$

گام اول: مقدار پیش بینی متغیرها در نقطه میانی $(i \pm \frac{1}{2})$

$$\left. \begin{aligned} h_{i+1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(h_{i+1}^n + h_i^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[(hu)_{i+1}^n - (hu)_i^n \right] & [7] \\ (hu)_{i+1/2}^{n+1/2} &= (hu)_{i+1}^n + (hu)_i^n & [8] \\ -\frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[\left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i+1}^n - \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_i^n \right] \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{(j_{i+1}^n + j_i^n)}{2} \\ z_{i+1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(z_{i+1}^n + z_i^n) - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x} (q_{s_{i+1}}^n - q_{s_i}^n) & [9] \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} (hu)_{i-1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2} \left[(hu)_{i-1}^n + (hu)_i^n \right] & [10] \\ -\frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[\left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_i^n - \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i-1}^n \right] \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{(j_i^n + j_{i-1}^n)}{2} \\ h_{i-1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(h_{i-1}^n + h_i^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[(hu)_i^n - (hu)_{i-1}^n \right] & [11] \\ z_{i-1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(z_{i-1}^n + z_i^n) - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x} (q_{s_i}^n - q_{s_{i-1}}^n) & [12] \end{aligned} \right\}$$

گام دوم: در این مرحله نیز مقادیر متغیرهای q_s, u, h در گام زمانی بالاتر به صورت جفت در گره‌های داخلی $i=2, 3, \dots, k$ محاسبه می‌گردد.

$$\left. \begin{aligned} (hu)_i^{n+1} &= (hu)_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i+1/2}^{n+1/2} - \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i-1/2}^{n+1/2} \right] & [13] \\ &+ \Delta t \frac{(j_{i+1/2}^{n+1/2} + j_{i-1/2}^{n+1/2})}{2} \\ z_i^{n+1} &= z_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{s_{i+1/2}}^{n+1/2} - q_{s_{i-1/2}}^{n+1/2}) & [14] \end{aligned} \right\}$$

محاسبه مقادیر متغیرها در مرزها

برای شرایط جریان زیر بحرانی جهت محاسبه مقادیر u , z , h در گره‌های I و $k+1$ مطابق روش مشخصه (اندرسون و همکاران 2006)، دو شرط مرزی در بالا دست و یک شرط مرزی در پایین دست نیاز است که به عنوان شرط مرزی جریان در بالا دست، هیدروگراف ورودی سیل و در پایین دست منحنی دبی - اشل در نظر گرفته شده است. مقادیر متغیرهای وابسته ای که از طریق شرایط مرزی مشخص نبوده‌اند، به کمک روش مشخصه، مطابق روابط زیر محاسبه گردیده‌اند. برای کمیت‌های بالا دست ابتدا با تعریف مقادیر پارامترها در نقطه R (نقطه‌ای اختیاری بین گره‌های مکانی 1 و 2) و به کمک هیدروگراف ورودی، مقادیر y_I^{n+1} و u_I^{n+1} محاسبه شده‌اند. سپس با تصحیح مقدار x_R ، عملیات مجدداً با مقادیر تصحیح شده، ادامه داده شده تا با حصول همگرایی، مقادیر متغیرهای مجهول در گره‌های مرزی بالا دست به دست آیند.

$$\left. \begin{aligned} x_R^n &= \frac{1}{2} \Delta t ((c-u)_1^{n+1} + (c-u)_R^n) & [23] \\ \begin{bmatrix} uh \\ h \\ z \end{bmatrix}_R^n &= \begin{bmatrix} uh \\ h \\ z \end{bmatrix}_2^n & [24] \\ - \left(\frac{x_2^n - x_R^n}{\Delta x} \right) \begin{bmatrix} (uh)_2 - (uh)_1 \\ h_2 - h_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} & \\ h_1^{n+1} &= \frac{2((uh)_1^{n+1} - (uh)_R^n) - \Delta t (z_R^n + z_1^{n+1})}{(u+c)_R^n + (u+c)_1^{n+1}} + h_R^n & [25] \\ c &= \sqrt{gh} & [26] \\ x &= gh(S_0 - S_f) & [27] \end{aligned} \right\}$$

برای گره‌های مرزی پایین دست نیز با در نظر گرفتن شیب مثبت منحنی مشخصه، شبیه موارد بالا عمل شده است. در مورد رقوم کف در بالا دست نیز از برون یابی مقادیر داخلی استفاده گردیده و جهت پایداری الگو نیز، ارضا شرط کورانت $CFL = (u + \sqrt{gh}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$ ، در هر نقطه شبکه رعایت شده است.

مطالعه آزمایشگاهی

جهت بررسی و ارزیابی عملکرد مدل، آزمایشاتی در یک فلوم انتقال رسوب به طول 16 و عرض 0/7 متر در مرکز تحقیقات CNRS، دانشگاه کان فرانسه انجام پذیرفته است (شکل 2). کف کانال با ماسه مصنوعی غیر چسبنده دارای $D_{50} = 0/011 \text{ m}$ پوشیده شده است. شیب بستر بین 0/6% و 1%- قابل تنظیم بوده و فلوم دارای یک تغذیه کننده بار بستر در بالا دست و تله های جمع آوری رسوب در پایین دست می باشد. از اندازه گیر متحرک با سرعت‌های 5، 10 و 30 سانتی متر بر ثانیه جهت ثبت نیمرخ های جریان و بستر در طول کانال استفاده شده است. تأمین جریان از یک مخزن با ارتفاع ثابت بوده و پس از ورود به فلوم توسط یک سیستم

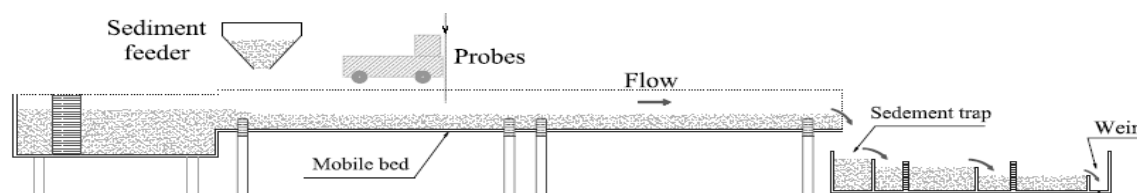
$$\left. \begin{aligned} x_R^n &= (c-u)_1^n \cdot \Delta t & [20] \\ \begin{bmatrix} uh \\ h \\ z \end{bmatrix}_R^n &= \begin{bmatrix} uh \\ h \\ z \end{bmatrix}_2^n & [21] \\ - \left(\frac{x_2^n - x_R^n}{\Delta x} \right) \begin{bmatrix} (uh)_2 - (uh)_1 \\ h_2 - h_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} & \\ h_1^{n+1} &= \frac{((uh)_1^{n+1} - (uh)_R^n) - \Delta t (x_R^n)}{(u+c)_R^n} + y_R^n & [22] \end{aligned} \right\}$$

تثبیت می‌گردد. شیب اولیه بستر 0/0005 بوده و با رخداد فرسایش و آبشستگی اولیه در ورودی کانال، پروفیل‌های اندازه‌گیری شده جریان و بستر در لحظه t برابر صفر به عنوان شرایط اولیه و دبی ثابت و عمق جریان در بالا دست و پایین دست به عنوان شرایط مرزی مدل تعیین می‌گردند. در طول آزمایش شکل بستر از نوع دون¹ بوده و رسوبگذاری عمدتاً در دومتر اول کانال بوجود می‌آید. پس از این ناحیه با وجود حرکت فرم بستر دون، تغییر عمده‌ای در تراز متوسط بستر فرسایش پذیر مشاهده نمی‌شود. شمای بهتری از این جزئیات در شکل 3 ملاحظه می‌گردد.

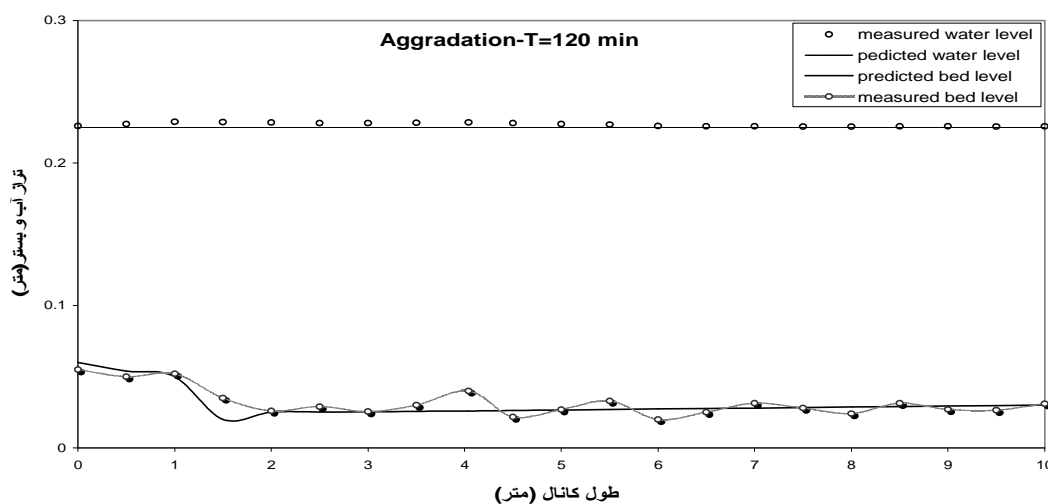
آرام کننده، تلاطم جریان گرفته شده و جریان به صورت یک بعدی وارد کانال مورد آزمایش می‌گردد. کنترل دبی جریان بوسیله شیر فلکه الکترونیکی بوده و آزمایشات تحت شرایط مختلف به شرح زیر انجام گرفت.

الف- رسوبگذاری تحت جریان دائمی

در آزمایش اول، پس از برقراری جریان و تعیین دبی لازم برای آستانه حرکت، تغذیه رسوب از مقداری بیشتر از ظرفیت حمل رسوب جریان، آغاز می‌گردد. پس از تنظیمات اولیه، مقدار دبی در حدود 68 Lit/s و مقدار تزریق بالا دست رسوب بستر در حدود $0/008 \text{ kg/s}$



شکل 2 - مقطع طولی فلوم انتقال رسوب



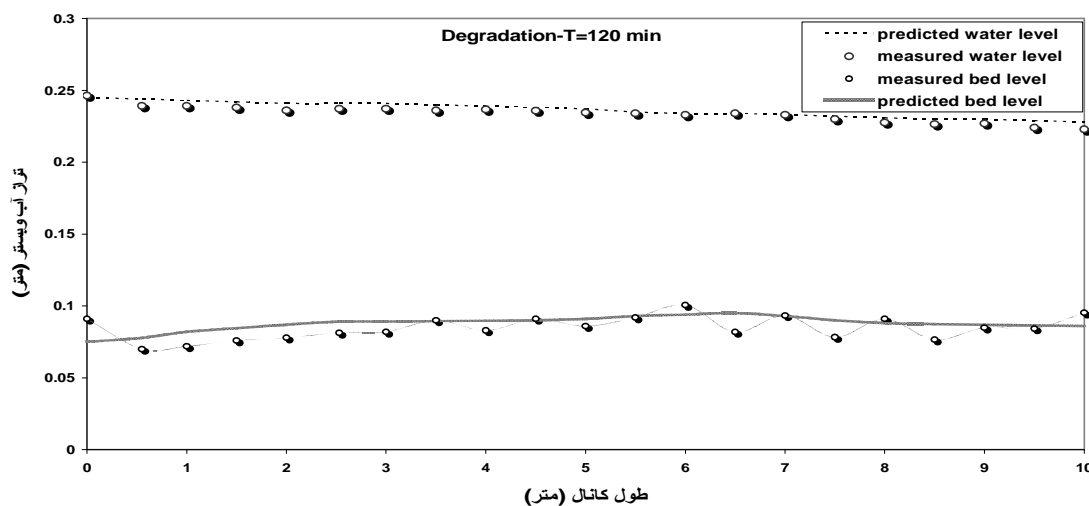
شکل 3- رسوبگذاری تحت جریان دائمی در $t = 120 \text{ min}$

آزمایش اول بوده و ترازهای بستر جریان در فواصل و زمان‌های مختلف ثبت می‌گردد (شکل 4).

ب - فرسایش تحت جریان دائمی

آزمایش دوم با شیب اولیه بستر 0/0002 بوده و با کاهش دبی به 50 Lit/s نسبت به آزمایش اول، امکان فرسایش بستر فراهم می‌شود. شرایط دیگر مانند

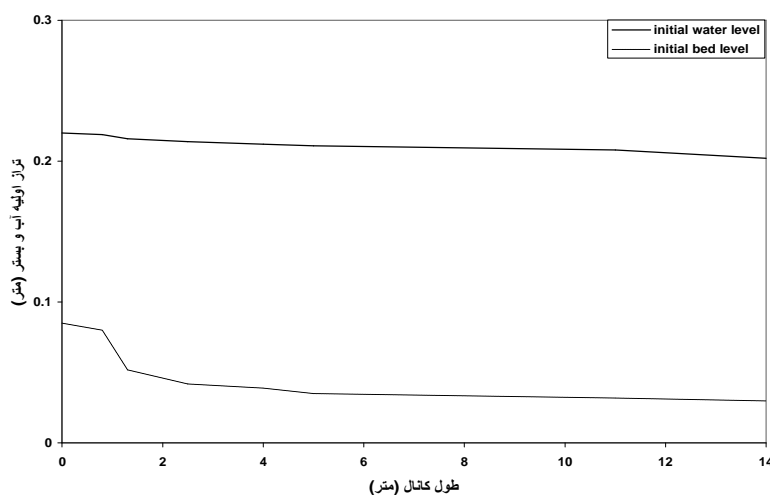
¹done



شکل 4- فرسایش تحت جریان دائمی در $t = 120 \text{ min}$

می‌شود. مقادیر تراز آب و بستر در لحظه $t = 0$ به عنوان شرایط اولیه و هیدروگراف ورودی، بار بستر تزریقی و عمق اندازه‌گیری شده در پایین دست به عنوان شرایط مرزی اعمال می‌شود (شکل 5 و 6).

ج - رسوبگذاری و فرسایش تحت جریان غیر دائمی برای ارزیابی توانائی مدل در شبیه‌سازی رسوبگذاری و فرسایش به دلیل وقوع جریان غیر دائمی به کمک داده‌های تجربی، هیدروگراف ورودی، مطابق شکل 5 اعمال می‌شود. در این آزمایش رسوب تزریقی در ابتدای فلولم در مقدار $0/02 \text{ kg/s}$ ثابت نگه داشته

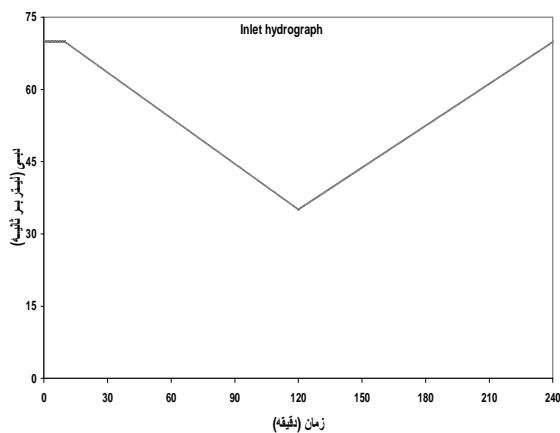


شکل 5- مقادیر تراز آب و بستر در لحظه $t = 0$ به عنوان شرایط اولیه

مدل است. در یک کانال با بستر متحرک با توجه به دائمی یا غیر دائمی بودن جریان و تغییرات شکل بستر در طول کانال، مقادیر ضریب زبری نسبت به زمان و

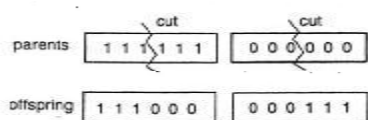
بهینه سازی ضرایب زبری به روش تحلیل معکوس یکی از شرط‌های مهم و موثر در به کارگیری مدل‌های ریاضی، تخمین صحیح پارامترهای تجربی آن

صفر) است. هر کد یا عدد در این رشته یک ژن نامیده می‌شود. برای ایجاد کروموزوم‌ها اعداد باید به صورت باینری کدگذاری شوند.

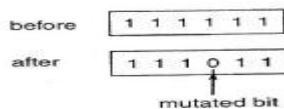


شکل 6- هیدروگراف ورودی کانال

در هر نسل توسط پردازش جمعیت و بر اساس میزان برآزش آنها، مجموعه‌ای از تخمین پارامترها در دامنه مساله به دست می‌آید. این جمعیت به کمک عملگرهایی که شبیه‌سازی شده عملگرهای ژنتیکی هستند، طی نسل‌های متمادی تکامل می‌یابد. هدف از این کار، دقیقاً همانند سازش پذیری طبیعی ژنتیکی، ایجاد جمعیت یا نسل‌هایی از جمعیت قبلی است که نسبت به آنها با محیط تطابق بهتری دارند. برای این منظور در ابتدا یک مجموعه تصادفی از رشته‌ها (جمعیت اولیه) برای رسیدن به نقطه بهینه مقدار دهی می‌شوند.



شکل 7- عمل جهش



شکل 8- ترکیب یک نقطه‌ای

مکان متغیر است. با توجه به تعدد و پیچیدگی پارامترهای حاکم بر ضریب مانینگ در شرایط بستر متحرک، رگرسیون غیر خطی این پارامترها و یافتن رابطه مناسب عموماً با پیچیدگی و عدم قطعیت همراه است. در چنین شرایطی، استفاده از تحلیل معکوس جهت تعیین ضریب زبری در مقاطع و زمان‌های مختلف، دقت نتایج حاصل از مدل را افزایش می‌دهد. در روش تحلیل معکوس، ابتدا مقداری برای ضریب زبری اولیه تخمین زده می‌شود و سپس پس از شبیه‌سازی کامل، تابع خطا یا تابع هدف به صورت مربع تفاضل بین مقادیر مشاهداتی (عمق یا دبی) و مقادیر محاسباتی تشکیل می‌شود.

حداقل تابع مذکور به روش سعی و خطا و تکرار و یا به کمک یک روش بهینه‌سازی و اجرای متوالی مدل به دست می‌آید. و نتیجه اجرای آن مقادیر ضرائب مانینگ بهینه شده مقاطع مشخص شده در زمان‌های مختلف است. فرم استاندارد تابع هدف به صورت معادله زیر توصیف می‌شود:

$$\varepsilon = \left[\frac{\sum (\eta_s - \eta_0)^2}{\eta_0} \right]^2 \quad [28]$$

که در آن ε تابع هدف یا معیار خطا و η_s مقدار عمق یا دبی محاسباتی و η_0 مقدار عمق یا دبی مشاهداتی را در مقاطع مختلف نشان می‌دهند. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی استفاده شده است. ورودی‌های توابع هدف در این الگوریتم، خروجی مدل جریان است که عملیات به صورت تکراری، اتوماتیک و مزدوج با مدل جریان، منجر به دستیابی به ضرائب زبری بهینه و نهایتاً شبیه‌سازی مجدد پروفیل‌های جریان و بستر با پارامترهای زبری بهینه شده است.

نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌های اولیه از جواب‌های تصادفی که جمعیت نامیده می‌شوند کار خود را آغاز می‌کند. هر فرد در این جمعیت، کروموزوم نامیده می‌شود که نماینده راه حلی برای مساله مورد نظر است. معمولاً یک کروموزوم رشته‌ای از بیت‌های باینری (1،

نتایج و بحث

1- جمله مربوط به نرخ تغییرات بستر $(\frac{\partial z}{\partial t})$ در معادله پیوستگی جریان عموماً در شرایطی نظیر ارزیابی دراز مدت بستر رودخانه حائز اهمیت است (کریشناپان، 1985). کوریا و همکاران (1992) نیز در بررسی دراز مدت رسوبگذاری مخزن به اهمیت این جمله $(\frac{\partial z}{\partial t})$ اشاره نموده اند. جهت ارزیابی عملکرد مدل از معیار متوسط خطای نسبی بصورت زیر استفاده شده است (مندرهاال و سینیچ 1994).

$$RAE_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |h_{measured} - h_{calculated}|}{\sum_{i=1}^n h_{measured}} \quad [29]$$

$$RAE_2 = \frac{\sum_{i=1}^n |z_{measured} - z_{calculated}|}{\sum_{i=1}^n z_{measured}} \quad [30]$$

مطابق جدول 1، حذف جمله مربوط به نرخ تغییرات بستر $(\frac{\partial z}{\partial t})$ از معادله پیوستگی آب برای فرسایش در جریان دائمی در لحظه t برابر 120 دقیقه تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج ایجاد نمی‌کند در حالی که برای حالت رسوبگذاری و نیز حالت جریان غیردائمی خطاهائی ملاحظه می‌شود. بنابراین چنین استنباط می‌شود در شبیه‌سازی جریان‌های رسوبی با تغییرات قابل ملاحظه در شکل بستر، حذف $(\frac{\partial z}{\partial t})$ از معادله پیوستگی جریان منجر به افزایش خطاهای محاسباتی خواهد شد.

فرزندان نخبه: ژن‌هایی که دارای بهترین برازندگی باشند برای نسل بعد انتخاب می‌شوند.

فرزندان حاصل از ترکیب: ترکیب ایجاد یک یا چند کروموزوم از والدین دارای بهترین برازندگی است. شکل عمومی ترکیب، شامل دو والد است که 2 فرزند را ایجاد می‌کنند. بدین گونه که یک نقطه به صورت تصادفی روی رشته کروموزومی انتخاب شده، بعد ناحیه‌های چپ یا راست آن نقطه، در رشته کروموزومی جابجا می‌شود. در شکل 8 نمونه‌ای از ترکیب با یک نقطه انتخابی به صورت شماتیک نمایش داده شده است. تابع هدف که معیاری برای سنجش کارایی و تطبیق رشته است، محاسبه می‌شود. حال اگر معیار رسیدن به حالت بهینه برآورده نشده باشد، تولید نسل جدید آغاز می‌شود. به این صورت که اعضای جمعیت بر طبق میزان برآزش برای تولید نسل جدید انتخاب می‌شوند. روند ایجاد فرزندان در نسل‌های بعدی از سه قانون کلی تبعیت می‌کند.

فرزندان حاصل از جهش: جهش یکی از مهمترین فرایندهایی است که اجازه می‌دهد ژن‌هایی جدید در کروموزوم‌ها ایجاد شود بدین صورت که فرزندان را به وسیله ایجاد تغییر در ژن‌ها به صورت تصادفی ایجاد می‌کند (شکل 7).

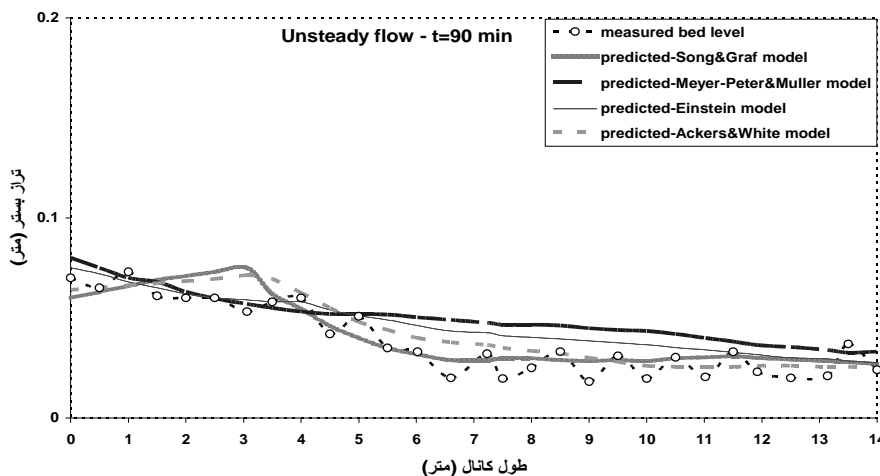
در این مطالعه پارامترهای شبیه‌سازی شده از تحلیل مدل تفاضلات محدود پیشنهادی با ضریب زبری اولیه به دست می‌آید. معادلات 1 تا 3 به عنوان قیدهای تابع بهینه‌سازی بوده و با استفاده از آنها و مقادیر مشاهداتی دبی و عمق، تابع بهینه‌سازی، مقادیر جدیدی برای ضرائب مانینگ تولید می‌کند. با اعمال مقادیر ضرائب زبری جدید در مقاطع مشخص شده و شبیه‌سازی دوباره پارامترها، روش مذکور با کمک الگوریتم ژنتیک دوباره تکرار شده و تا زمان رسیدن به معیار توقف الگوریتم ادامه می‌یابد.

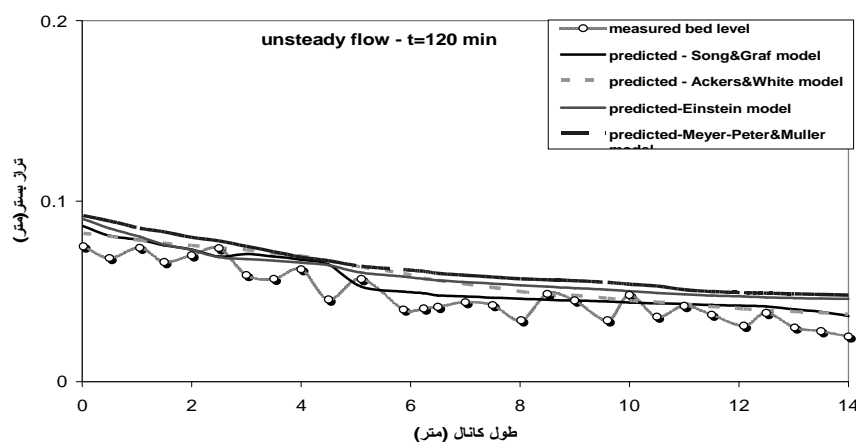
جدول 1- خطای مربوط به روند حل معادلات (ضریب مانینگ ثابت)

| روند تحلیل | | | | | | حالت جریان |
|-----------------------|-------------------|---|-------------------|---|-------------------|----------------------|
| غیر مزدوج (Uncoupled) | | مزدوج (Coupled) | | | | |
| | | معادله پیوستگی با $\frac{\partial z}{\partial t}$ | | معادله پیوستگی بدون $\frac{\partial z}{\partial t}$ | | |
| %RAE ₁ | %RAE ₂ | %RAE ₁ | %RAE ₂ | %RAE ₁ | %RAE ₂ | |
| 1/5 | 19 | 0/9 | 13 | 1/1 | 13/9 | دائمی (aggradation) |
| 3/7 | 13 | 2/3 | 8 | 2/33 | 8/1 | دائمی (degradation) |
| 3/9 | 18 | 4 | 18/4 | 5 | 20/2 | غیر دائمی (T=1/5 hr) |
| 5/96 | 18/8 | 4/82 | 15/7 | 5/8 | 17/9 | غیر دائمی (T=2 hr) |
| 6 | 30 | 2/55 | 23 | 3/4 | 25 | غیر دائمی (T=4 hr) |

و فرمول انتقال بار بسترمهمترین نقش را در شبیه سازی تراز بستر رسوبی ایفا می کند. دلایل تفاوت فاحش برخی روشها در برآورد بار بستر (و نتیجتاً شبیه سازی شکل بستر) مربوط به شرایط کاربری مخصوص هر کدام از روش ها با توجه به محدودیت ها، پیشنهادات و توصیه ها، نیاز روابط موجود به توسعه به شرایط مختلف جریان، پیچیدگی و محدودیت شناخت نسبت به مکانیزم و فرم مختلط حرکت ذرات در روابط انتقال رسوب است.

2- مطابق شکل 9 و 10، برای مدلسازی جریان دائمی با بستر متحرک از فرمولهای انتقال باربستر انیشتن (1950)، میر- پیتر و مولر (1948) و ایکرز وایت (1973) و جهت شبیه سازی جریان غیردائمی علاوه بر روابط فوق الذکر از رابطه سانگ و گراف (1997) استفاده شده است. مقایسه تراز شبیه سازی شده بستر با تراز اندازه گیری شده حاکی از این است که خطاها و عدم قطعیت در تخمین شکل بستر به دلیل اثرات فرمول های انتقال رسوب بسیار بیشتر از خطاهای عددی بوده

شکل 9- تغییرات تراز بستر حاصل از شبیه سازی بستر متحرک با فرمولهای مختلف انتقال بار رسوب در $t = 90 \text{ min}$



شکل 10- تغییرات تراز بستر حاصل از شبیه‌سازی بستر متحرک با فرمول‌های مختلف انتقال بار رسوب در $t = 120 \text{ min}$

نمایش می‌دهند. روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک به طور اتوماتیک با مدل پیشنهادی جریان لینک شده و با استفاده از داده های اندازه گیری شده و انجام یک روند تکراری، ضرائب زبری بهینه شده را ایجاد می‌نماید.

5- نتایج حاصله مطابق شکل های 11 تا 13 و جداول 1 و 2 حاکی از آن است که مدل پیشنهادی باعث ارتقای کارآیی شبیه‌سازی و کاهش خطاهای عددی شده و در کلیه حالات عملکرد آن رضایت بخش است.

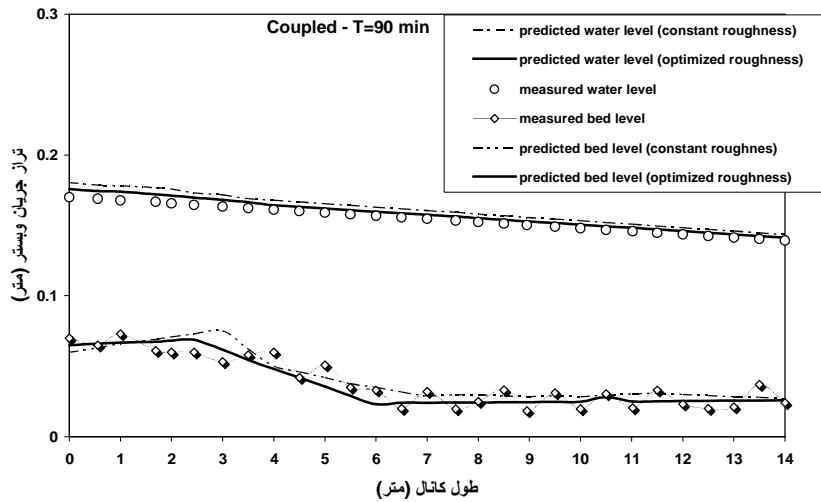
6- در مورد شکل بستر در آزمایشات، در جریان دائمی فرم بستر ایجاد شده ابتدا به صورت ریپل بوده و سپس در حالات بینابینی ریپل و دون قرار می‌گیرد. مطابق شکل 9 تغییرات بستر در چنین حالتی روند سینوسی دارد. دلیل وقوع چنین حالتی در این است که اولاً در زمان ثبت داده‌ها در بستر متحرک، شکل بستر در حالت بینابینی ریپل و دون قرار داشته و مقادیر برداشت شده به صورت متوسط‌گیری شده در عرض مقطع است و ثانیاً به دلیل تغییرات سریع دبی نسبت به زمان در جریان غیردائمی و تزریق رسوب ثابت از بالادست کانال، توسعه و تشکیل فرم بستر روند پیچیده‌ای به خود گرفته است. نوع شکل بستر، با توجه به روش به کار رفته، هیچ تغییری در روند تحلیل ایجاد نمی‌کند.

جهت درک بهتر عملکرد مدل، تغییرات عمق در مقاطع $x=10\text{m}$ و $x=5\text{m}$ مطابق شکل‌های 14 و 15 ترسیم شده است.

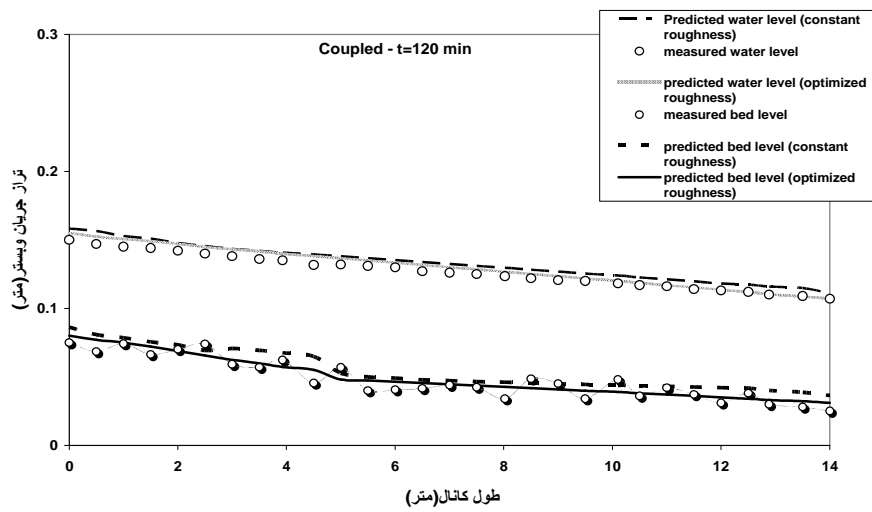
3- جدول 1 و 2 تأثیر تکنیک حل سه معادله حاکم بر جریانهای رسوبی در ایجاد نوسانات و خطای مدل را نشان می‌دهد. روش غیر مزدوج براساس حل غیر همزمان معادلات جریان و معادله رسوب بوده در حالی که در روش مزدوج، اساس کار حل همزمان هر سه معادله و تأثیر پارامترهای سه معادله بر هم به طور مستقیم و همزمان است. مطابق جدول 1 و در شبیه‌سازی با هر دو روش مزدوج و غیرمزدوج، برای جریان غیردائمی در مدت $t=90\text{min}$ ، نتایج دو روش بسیار نزدیک به هم است. در مدت زمان $t=120\text{min}$ ، نوسانات و خطاهائی در روش غیر مزدوج ملاحظه می‌شود و با افزایش زمان در $t=240\text{min}$ خطاهای روش غیرمزدوج بیشتر و بارزتر می‌گردد.

برای جریان دائمی در هر دو حالت رسوبگذاری و فرسایش عدم دقت قابل توجهی در روش غیرمزدوج ملاحظه می‌گردد. در توجیه این نتایج می‌توان گفت که تغییرات ناگهانی بستر تأثیر مستقیم بر شیب بستر S_0 داشته و به دلیل غیرهمزمانی شبکه حل در روش غیرمزدوج، این تاثیرات نادیده گرفته می‌شود. در نتیجه با افزایش زمان، نوسانات و خطاهای روش غیرمزدوج رو به افزایش گذاشته و ایجاد ناپایداری می‌نماید.

4- شکل های 11 تا 13 و جدول 1 و 2 مقایسه بین پروفیل های جریان و بستر در زمانهای مختلف شبیه‌سازی شده با ضرائب مانینگ ثابت و بهینه شده را



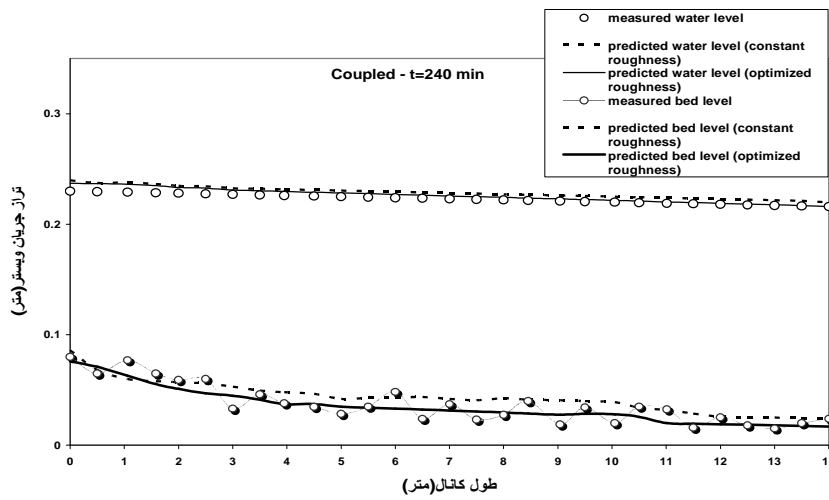
شکل 11- شبیه سازی تراز جریان و بستر با ضرائب زبری ثابت و بهینه در $t = 90 \text{ min}$



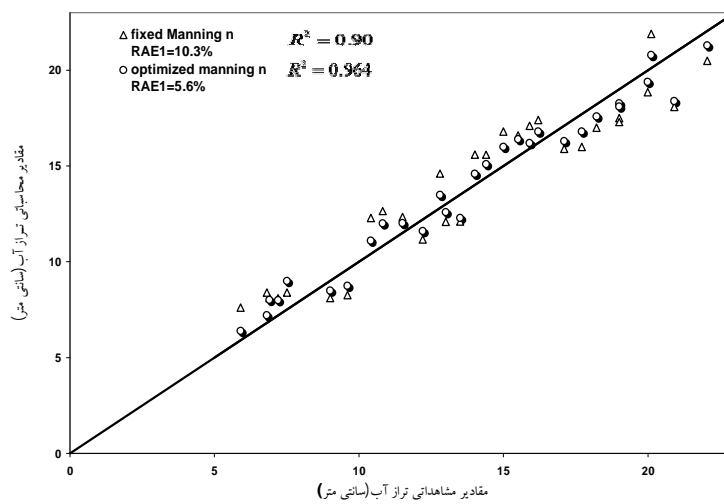
شکل 12- شبیه سازی تراز جریان و بستر با ضرائب زبری ثابت و بهینه در $t = 120 \text{ min}$

جدول 2- خطای مربوط به روند حل معادلات (ضریب مانینگ بهینه)

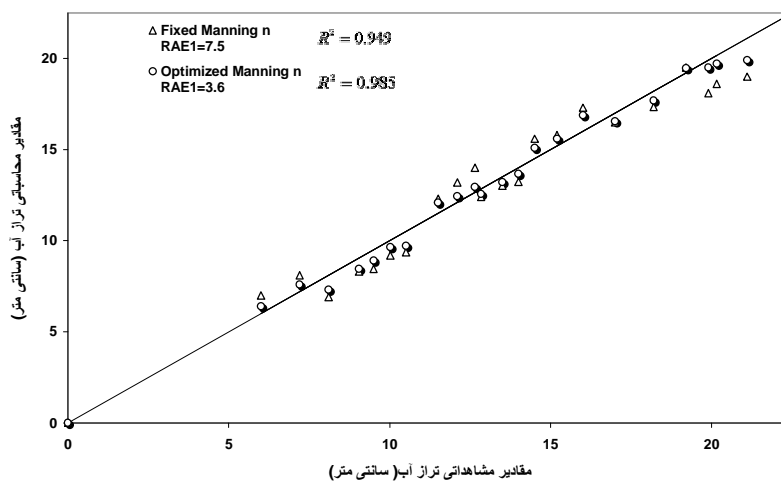
| روند تحلیل | | جریان | | T |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| غیر مزدوج (Uncoupled) | مزدوج (Coupled) | غیر دائمی | مزدوج | |
| %RAE ₁ | %RAE ₂ | %RAE ₁ | %RAE ₂ | |
| 2/3 | 15 | 2/1 | 14 | T=1/5 hr |
| 3/4 | 12/2 | 2/5 | 10 | T=2 hr |
| 2/6 | 21/8 | 1/33 | 18 | T=4 hr |



شکل 13- شبیه سازی تراز جریان و بستر با ضرائب زبری ثابت و بهینه در $t=200 \text{ min}$



شکل 14- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تغییرات عمق در $x=5 \text{ m}$



شکل 15- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تغییرات عمق در $x=10 \text{ m}$

پیوستگی جریان، منجر به افزایش جزئی خطاهای محاسباتی تا حداکثر 4 درصد می‌گردد.

- نتایج گویای آن است که خطاها و عدم قطعیت در تخمین شکل بستر به دلیل اثرات انتخاب معادله انتقال رسوب بسیار بیشتر از خطاهای عددی بوده و رابطه انتقال بار بستر نقش بسیار حساسی در شبیه‌سازی تراز بستر دارد.

سپاسگزاری

آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق در مدت فرصت مطالعاتی مولف مکاتبه کننده و با پشتیبانی مالی دانشگاه تبریز، در آزمایشگاه مورفودینامیک موسسه تحقیقی CNRS وابسته به دانشگاه کان فرانسه انجام گرفته است که بدین وسیله از کلیه عوامل دست اندرکار تشکر و قدردانی می‌شود.

مقایسه نتایج حاصله با داده‌های تجربی در این مقاطع نشان می‌دهد که روش شبیه‌سازی پیشنهادی موجب کاهش خطا در پیش بینی ترازهای عمق گردیده است.

نتیجه گیری

از مجموعه بررسی‌های تجربی و تئوری تحقیق حاضر چنین استنتاج می‌شود که:

- کاربرد الگوریتم ژنتیک در جستجوی ضرایب زبری بهینه و استفاده همزمان آن در مدل، ضمن کاهش خطاهای عددی از 2 تا 15 درصد موجب ارتقای کارایی شبیه‌سازی پارامترهایی نظیر عمق و دبی و تراز بستر می‌گردد.

- با گذشت زمان، خطاهای ناشی از حل معادلات با روش غیر مزدوج افزایش می‌یابد.

- در شبیه‌سازی انتقال رسوب در بسترهای آبرفتی، در اثر تغییر شکل بستر، حذف عبارت $\frac{\partial z}{\partial t}$ از معادله

منابع مورد استفاده

حسن‌زاده ی، کی‌نژاد مع، روشنگر ک و اعلمی مت، 1389. ارائه مدل یک بعدی انتقال جریان و رسوب، مطالعه موردی رودخانه الندخوی، مجله آب و فاضلاب. شماره 73. صفحه‌های 4 تا 14.

فرسادی‌زاده د، منعم م، حسن‌زاده ی، 1385. بررسی مدل هیدرودینامیک ICSS در کانال آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در سیستم کنترل کانال‌ها. مجله دانش کشاورزی، شماره 16. صفحه‌های 147 تا 159.

Ackers P and White WR, 1973. Sediment transport: New approach and analysis. J Hydr Engr, ASCE 99: 2041-2060.

Anderson DA, Tannehill JC and Pletcher RH, 2006. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Mc Graw – Hill, New York.

Becker L and Yeh WG, 1972. Identification of parameters in unsteady open channel flows. Water Resour Res 8(4): 956-965

Begin ZB, 1988. Application of a diffusion-erosion model to alluvial channels which degrade due to base-level lowering. Earth Surface Processes Landforms 13(6): 487-500.

Cao Z, Day R and Egashira S, 2002. Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers. J Hydr Engr, ASCE 128: 306-321.

- Einstein HA, 1950. The bed – load function for sediment transportation in open channel flows. Tech. Bull. No 1026, US. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington DC.
- Correia LRP, Krishnappan BG and Graf WH, 1992. Fully coupled unsteady mobile boundary flow model. J Hydr Engr, ASCE 118: 476-494.
- Fread DL and Smith GG, 1978. Calibration techniques for 1-D unsteady flow models. J Hydr Div, ASCE 104(7): 1027- 1043.
- Gill MA, 1983. Diffusion model for aggrading channels. J Hydr Res 21 (5): 355-367.
- Jameson A, Schmidt W and Turkel E, 1981. Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Rung- kutta time- stepping schemes. Pp: 1-17. AIAA 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference. June, Palo Alto, California.
- Kassem A and Chaudhry MH, 1998. Comparison of coupled and semi coupled numerical models for alluvial channels. J Hydr Engr, ASCE 124(8): 794-802.
- Krishnappan BG, 1985. Modeling of unsteady flows in alluvial streams. J Hydr Engr, ASCE 111(2): 257-266.
- Lenau CW and Hjelmfelt AT, 1992. River bed degradation due to abrupt outfall lowering. J Hydr. Engr, ASCE 118(6):918-933.
- Lyn DA, 1987. Unsteady sediment transport modeling. J Hydr Engr, ASCE 113: 1-15.
- Mendenhall W and Sincich T, 1994. Statistics for Engineering and Sciences. Prentics- Hall Pub Inc, London.
- Meyer-Peter E and Müller R, 1948. Formulas for bed- load transport. Pp: 39-64. Int Assoc Hydr Res, 2nd Meeting, Stockholm.
- Ribberink JS and Van der Sande JTM, 1985. Aggradation in rivers due to overloading-analytical approaches. J Hydr Res 23(3): 273-283.
- Song T and Graf WH, 1997. Experimental study of bedload transport in unsteady open-channel flow. Int J of Sediment Res 12(3): 63-71.
- Soni JP, Garde RJ and Raju KG, 1980. Aggradation in streams due to overloading. J Hydr Engr, ASCE 106(1):117-132.
- Wasantha Lal AM, 1995. Calibration of riverbed roughness. J Hydr Engr, ASCE 121(9): 664- 671.
- Zhang H and Kahawita R, 1990. Linear hyperbolic model for alluvial channels. J Hydr Engr, ASCE 116(4): 478-793.