

تاثیر حل معادلات و ضریب زبری در شبیه سازی جریان روباز

با بستر فرسایش پذیر

یوسف حسن زاده^۱، محمد علی کی نژاد^۲، محمد تقی اعلمی^۳، داوود فرسادیزاده^۴، کیومرث روشننگر^۵

^۱ استاد گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند

^۳ دانشیار گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

^۴ استادیار گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۵ دانشجوی دکتری گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

در این مقاله یک مدل یک بعدی برای شبیه سازی جریان روباز و بررسی تغییرات بستر در کانال های آبرفتی ارائه شده است. جهت کالیبراسیون و صحت سنجی مدل مذکور اندازه های تجربی در یک کانال آزمایشگاهی انتقال رسوب انجام گردیده است. جهت ارتقای کارایی مدل از یک سو روند تحلیل معادلات حاکم بر پدیده چگونگی ارتباط بین پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل و مقایسه با داده های تجربی نشان می دهد، روش جفت که در آن تحلیل پارامترها به طور همزمان و مرتبط انجام می شود دارای کارایی بهتر و خطای محاسبانی کمتری نسبت به روش غیرجفت می باشد.

از سوی دیگر به متغیر بودن ضریب زبری در جریان های با بستر متحرک و نیز به دلیل پیچیدگی و عدم قطبیت موجود در تابع ضریب اصطکاک این نوع جریانها، ضریب زبری مانینگ، به صورت متغیر در نظر گرفته شده و با استفاده از داده های آزمایشگاهی و تکنیک بهینه سازی به طور همزمان با معادلات حاکم تحلیل و کالیبره گردید. نتایج گویای آن است که، به کارگیری همزمان ضرایب زبری بهینه در مدل باعث کاهش خطاهای عددی و ارتقای کارایی شبیه سازی جریان با بستر متحرک می شود.

کلمات کلیدی: واسنجی، شبیه سازی، کانال رسوبی، ضریب زبری

Effects of solution procedure and roughness coefficient on simulation of movable bed stream

Abstract

In this paper a numerical model is presented which solves the 1-D unsteady flow over a mobile bed. The model is based on the modified Lax-Wendroff second order explicit scheme. Comparisons of the model results with the experimental flume data of steady flow and unsteady flow on mobile bed, show that, by using of the proposed scheme, one can solve the equations, governing the phenomenon, in a coupled method with the desired accuracy. For calibration of model, in one hand solution procedure of governing equations is investigated. Results have clearly shown the importance of the synchronous solution procedure of the complete governing equations for both aggradation and degradation process. In other hand, due to complexity and uncertainty in determination of friction factor of alluvial channels, the optimization technique and unsteady alluvial flow model are coupled by time interval in order to dynamically identify the Manning roughness parameter and get the updated state variable values. The study shows that, application of optimized roughness coefficient increases the accuracy of numerical simulation.

Keywords: calibration, mobile bed, roughness coefficient, aggradation

مقدمه

از حدود سه دهه پیش مدل های عددی اصلاح شده متعددی برای شبیه سازی جریان در کانال های آبرفتی هدف به حداقل رساندن هزینه های ناشی از خسارات و افزایش دقت محاسباتی در زمینه های مختلف مهندسی رودخانه گسترش و توسعه پیدا کرده اند. مدلسازی یک بعدی جریان رولز و ارزیابی تغییرات بستر در کانال های فرسایش پذیر، به کمک معادلات سن ونان پیوستگی و اندازه حرکت جریان $\frac{\partial u}{\partial t}$ معادله اکزنر (پیوستگی رسوب) انجام می شود. تخصیص متعددی شبیه سازی یک بعدی جریان با بستر متحرک در کانال های روباز را مورد توجه قرار داده اند. بسیاری از این شبیه سازی ها شامل مدل های مبتنی بر معادلات مذکور است. این مدل های تحلیلی عمدتاً فرض های ساده کننده ای نظیر حذف عبارت $\frac{\partial h}{\partial t}$ و $\frac{\partial u}{\partial t}$ معادلات پیوستگی جریان و پیوستگی

رسوب و یا حذف جمله $u \frac{\partial u}{\partial x}$ از معادله ممنتوم هستند. این مورد می تواند به کارهای

محققینی نظیر سونی و همکاران (۱۹۸۰) گیل (۱۹۸۳) ریرینک و واندرهال (۱۹۸۵)، بیگن (۱۹۸۸)، زانگ و کاهویتا (۱۹۹۰) ولنا و هجلمفلت (۱۹۹۲) اشاره نمود. اخیراً به دلیل ایرادات و محدودیت های موجود در چنین روش های تحلیلی، استفاده از مدل های عددی مبتنی بر روش تفاضلات محدود رشد چشمگیری داشته است. برای استفاده از چنین روش های عددی در مدلسازی جریان های رسوبی در مجاری روباز، توجه به دو نکته اساسی حائز اهمیت است.

نکته اول مربوط به روند تحلیل معادلات حاکم بر پدیده و چگونگی ارتباط بین پارامترها در شبکه حل می باشد. در تحلیل غیر مزدوج، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت جریان با فرض تغییرات ناچیز بستر تحلیل گشته و سپس با داده های به دست آمده از این تحلیل، معادله پیوستگی رسوب حل عددی میگردد. در روش مزدوج تحلیل پارامترها همزمان و مرتبط انجام شده و تغییرات ایجاد شده در بستر توسط معادله رسوب در معادله پیوستگی و اندازه حرکت جریان اعمال می شود.

برخی از محققین نظیر لین (۱۹۸۷)، کوریا و همکاران (۱۹۹۲) و کاو و همکاران (۲۰۰۲) بسته به مورد و شرایط شبیه سازی، استفاده از روش غیر مزدوج را مورد نقد قرار داده اند. در حالیکه افرادی نظیر کاظم و چادری (۱۹۹۸) ادعا کردند روش غیر مزدوج، روش نامتعادلی نبوده و منجر به جواب های قابل قبول می گردد. در سالهای اخیر نیز فرسادی زاده و همکاران (۱۳۸۵) و حسن زاده و همکاران (۱۳۸۹) مدل سازی جریانهای غیردائمی را بطور تجربی و روشهای عددی مورد بررسی قرار داده اند. نکته دومی که در مدلسازی جریان های با بستر متحرک باید در نظر گرفته شود، مسئله متغیر بودن ضریب زبری بستر است. در چنین شرایطی دست آوردن تابع ضریب زبری بستر به دلیل تاثیر عوامل متعدد بر آن (نظیر شکل بستر، پارامترهای جریان، اندازه دانه ها و ...) وجود عدم قطعیت و پیچیدگی رگرسیون غیر خطی توابع چند متغیّر - کلهو مشکلی بوده و با خطای قابل توجهی همراه است. در این حالت، چنانچه ضریب زبری مانینگ موجود در تابع شیب خط

انرژی در معادله اندازه حرکت به صورت متغیر در نظر گرفته شود و با استفاده از داده های تجربی به صورت روش سعی و خطا همراه با معادلات حاکم بر پدیده کالیبره گردد، مسئله از لحاظ ریاضی موصوم به مسئله معکوس (Inverse problem) بوده و تحلیل آن نسبتاً پیچیده خواهد شد. موارد موجود در ادبیات فن جهت تخمین و واسنجی ضریب زبری جریان غیر ثلثی می توان به مواردی نظیر بکر (۱۹۷۲)، فرد و اسمیت (۱۹۷۳) و واسانتالال (۱۹۹۵) اشاره نمود.

در این تحقیقات سَن و نان و معادله پیوستگی رسوب (اکثر به روش تفاضلات محدود صریح و الگوی دو مرحله ای ریچ مایر (۱) دقت از مرتبه دوم مکانی و زمانی) تحلیل گردیده اند. روند تحلیل معادلات به دو صورت جفت و غیر جفت بوده و به کمک نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده در یک کانال با بستر متحرکورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. و همچنین روند تحلیل، ساده سازی معادله پیوستگی رسوب و انتخاب معادله رسوب در شبیه سازی پروفیل رِطَن و بستر مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت مسئله معکوس تعیین ضریب زبری بستر در کانال رسوبی روباز به کمک الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه سازی تحلیل گردیده است. عمق های جریاندهی های اندازه گیری شده در مقاطع و زمان های مختلف به عنوان ورودی تا ابع هدف بهینه سازی ملحوظ گردیده است. تحلیل مزدوج و همزمان معادلات مدل و تابع بهینه سازی ضرائب زبری کالیبره و بهینه شده به دست آمده و مدلسازی با ضرائب زبری بهینه مجدداً انجام پذیرفته است.

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 می باشد که به صورت زیر بیان می شوند:

معادله پیوستگی جریان:

[۱]

$$(h)_t + (hu)_x + (z)_t = 0$$

معادله ساده شده پیوستگی جریان:

[۲]

$$(h)_t + (hu)_x = 0$$

معادله اندازه حرکت جریان:

[۳]

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

معادله پیوستگی رسوب:

[۴]

$$(z)_i + \left(\frac{1}{1-p}\right)(q_i)_i = 0$$

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 دوپه 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 [۵] و معادله تعیین میزان انتقال رسوبات [۶] می باشند.

۵]

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

[۶]

که در آن m

$$q_i = f(u, h, \delta, \dots)$$

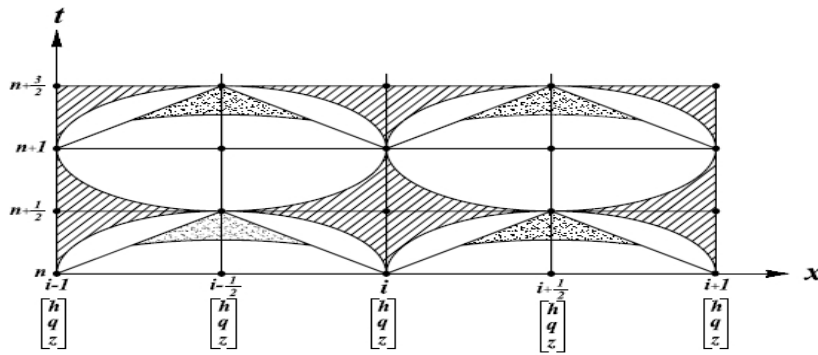
ضریب مانینگ، R_h شعاع هیدرولیکی مقطع جریان و δ ضریب مربوط به مشخصات مصالح بستر است.

- الگوی عددی برای تحلیل معادلات

الگوی عددی به کار رفته روش صریح و اصلاح شده لکس وندرف است که این روش ترکیبی از روش های Lax و Leapfrog میانی است (اندرسون و همکاران ۲۰۰۶). این روش برای معادلات هذلولوی غیرخطی مناسب بوده و عملکرد آنها براساس پیش بینی و تصحیح می باشد، به طوریکه در گام نخست مقداری برای متغیر وابسته پیش بینی می شود و سپس در گام بعدی با استفاده از این مقدار پیش بینی شده، مقدار نهائی متغیر انتخاب می گردد. روش چند گامی لاکس- وندرف اولین گام را در نقطه میانی $(i \pm \frac{1}{2})$

اعمال می کند، در حالی که گام زمانی $\frac{1}{2}$ است و سپس در مرحله زمانی $n+1$ ، از

روش جهش نقطه میانی (اندرسون و همکاران ۲۰۰۶) برای یافتن متغیرها استفاده می گردد، این روش با دقت زمانی و مکانی از مرتبه دوم جزو روش های با دقت بالا محسوب میگردد (اندرسون و همکاران ۲۰۰۶).



شکل ۱- شبکه حل تفاضلات محدود با روش صریح و اصلاح شده لکس وندرف - ریچ مایر
شبکه- صیقل سابق سس (۱) به صورت دو تار به سس زیر و است.

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

$$\left\{ \begin{aligned} h_{i+1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(h_{i+1}^n + h_i^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}((hu)_{i+1}^n - (hu)_i^n) \\ (hu)_{i+1/2}^{n+1/2} &= ((hu)_{i+1}^n + (hu)_i^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right)_{i+1}^n - \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right)_i^n \right] + \frac{\Delta t}{2} \frac{(\varphi_{i+1}^n + \varphi_i^n)}{2} \\ z_{i+1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(z_{i+1}^n + z_i^n) - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x}(q_{i+1}^n - q_i^n) \end{aligned} \right. \quad \begin{matrix} [۷] \\ [۸] \\ [۹] \end{matrix}$$

$$\left\{ \begin{aligned} (hu)_{i-1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}((hu)_{i-1}^n + (hu)_i^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right)_i^n - \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right)_{i-1}^n \right] + \frac{\Delta t}{2} \frac{(\varphi_i^n + \varphi_{i-1}^n)}{2} \\ h_{i-1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(h_{i-1}^n + h_i^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}((hu)_i^n - (hu)_{i-1}^n) \\ z_{i-1/2}^{n+1/2} &= \frac{1}{2}(z_{i-1}^n + z_i^n) - \frac{\Delta t}{2(1-p)\Delta x}(q_{i-1}^n - q_i^n) \end{aligned} \right. \quad \begin{matrix} [۱۰] \\ [۱۱] \\ [۱۲] \end{matrix}$$

گام دوم: در این مرحله نیز مقادیر متغیرهای h, u, q گام زمانی بالاتر به صورت جفت در گره های داخلی $i=2,3,\dots,k$ محاسبه می گردد.

$$\left\{ \begin{aligned} (hu)_i^{n+1} &= (hu)_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right)_{i+1/2}^{n+1/2} - \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right)_{i-1/2}^{n+1/2} \right] + \Delta t \frac{(\varphi_{i+1/2}^{n+1/2} + \varphi_{i-1/2}^{n+1/2})}{2} \\ z_i^{n+1} &= z_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x}(q_{i+1/2}^{n+1/2} - q_{i-1/2}^{n+1/2}) \end{aligned} \right. \quad \begin{matrix} [۱۳] \\ [۱۴] \end{matrix}$$

$$\varphi_{i\pm 1}^n = gh_{i\pm 1}^n (S_0 - S_i)_{i\pm 1}^n \quad [۱۵]$$

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

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

جهت کاهش نوسانات ناشی از خطاهای عددی، ویسکوزیته مصنوعی به الگو اضافه می شود که روش غیر خطی جمیسون و همکاران (۱۹۸۱) یکی از روش های 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 می شوند.

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

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

سپس مقادیر نهائی بصورت زیر اصلاح می شوند.

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

محاسبه مقادیر متغیرها در مرزها

برای این جریان زیر بحرانی جهت محاسبه مقادیر z, u, h در گره های 1 و $k+1$ مطابق روش مشخصه (درسون و همکاران ۲۰۰۶)، 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 نبوده اند، به کمک روش مشخصه، مطابق روابط زیوحاسبه گردیده اند. برای کمیت های بالا دست ابتدا با تعریف مقادیر پارامترها در نقطه R و به کمک هیدروگراف ورودی، مقادیر u_1^{n+1} و y_1^{n+1} محاسبه شده اند. سپس با تصحیح مقدار عملیات مجدداً با مقادیر تصحیح شده، ادامه داده شده اند تا با حصول همگرایی، مقادیر متغیرهای مجهول در گره های مرزی بالا دست به دست آیند.

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

$$\left(\begin{array}{l} x_R^n = \frac{1}{2} \Delta t ((c - u)_1^{n+1} + (c - u)_R^n) \\ \begin{bmatrix} uh \\ h \\ z \end{bmatrix}_R^n = \begin{bmatrix} uh \\ h \\ z \end{bmatrix}_2^n - \left(\frac{x_2^n - x_R^n}{\Delta x} \right) \begin{bmatrix} (uh)_2 - (uh)_1 \\ h_2 - h_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix}^n \\ h_1^{n+1} = \frac{2((uh)_1^{n+1} - (uh)_R^n) - \Delta t (\xi_R^n + \xi_1^{n+1})}{(u + c)_R^n + (u + c)_1^{n+1}} + h_R^n \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} [23] \\ [24] \\ [25] \end{array}$$

$$c = \sqrt{gh}$$

در اینجا برای گرهای مرزی پایین دست نیز با در نظر گرفتن $\xi = gh (S_0 - S_f)$

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)، $C_n = (u + \sqrt{gh}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$ ، در هر نقطه شبکه رعایت شده است.

مطالعه آزمایشگاهی

جهت بررسی و ارزیابی عملکرد مدل، آزمایشاتی در داخل یک فلوم انتقال رسوب به طول ۱۶ و عرض ۰.۷ متر در مرکز تحقیقات CNRS دانشگاه کان فرانسه انجام پذیرفته است. (شکل ۲)

کف کانال با ماسه مصنوعی غیر چسبنده دارای $m D_{50} = 0.11$ 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. اندازه گیر متحرک با سرعت های 5 cm/s ، 10 cm/s ، 30 cm/s جهت ثبت نیمرخ های جریان و بستر د طول کانال استفاده شده است و تأمین جریان از یک مخزن با ارتفاع ثابت بوده و پس از ورود به فلوم توسط یک سیستم آرام کننده، تلاطم جریان گرفته شده و جریان به صورت یک بعدی وارد

و کانال مورد آزمایش می گنجدول دبی جریان بوسیله شیر فلکه الکترونیکی بوده آزمایشات تحت شرایط مختلف به شرح زیر انجام می پذیرد.

الف- رسوبگذاری تحت شرایط جریان دائمی (aggradations)

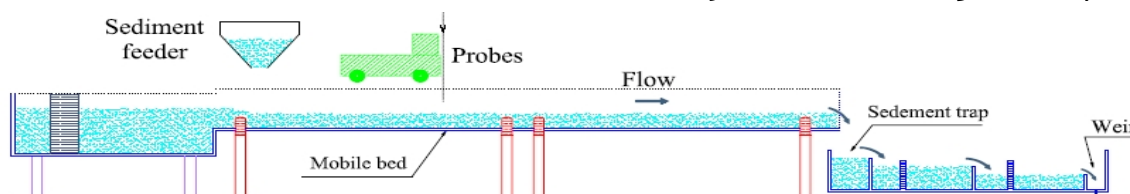
در آزمایش اول، پس از برقراری جریان و تعیین دبی لازم برای آستانه حرکت، تغذیه رسوب از مقداری بیشتر از ظرفیت حمل رسوب جریان، آغاز می گردد پس از تنظیمات اولیه،

مقدار دبی در حدود 6 lit/s و مقدار تزریق بالا دست رسوب بستر در 0.008 kg/s تثبیت

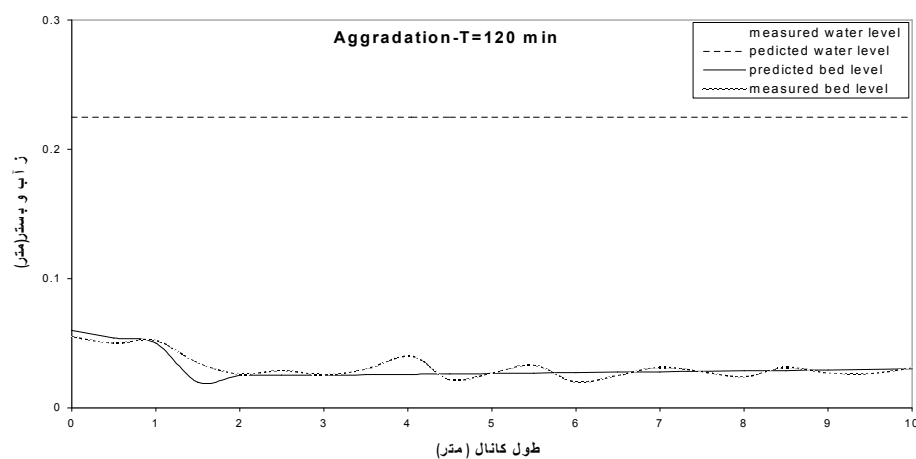
می گردد. شیب اولیه بستر 0.005 بوده و با رخداد فرسایش و آبشستگی اولیه در ورودی کانال، پروفیل های اندازه گیری شده جریان و بستر در لحظه $t=0$ عنوان شرایط

اولیه و دبی ثابت و عمق جریان در بالا دست و پایین دست به عنوان شرایط مرزی مدل تعیین می گردند.

در طول آزمایش شکل بستر از نوع دون (dune) بود و رسوبگذاری عمدتاً در دومتر اول کانال بوجود می آید از این ناحیه با وجود حرکت فرم بستر دون، تغییر عمده ای در تراز متوسط بستر فرسایش پذیر مشاهده نمی شود شمای بهتری از این جزئیات در شکل های ۲ الف و ۲ ب ملاحظه می گردد.



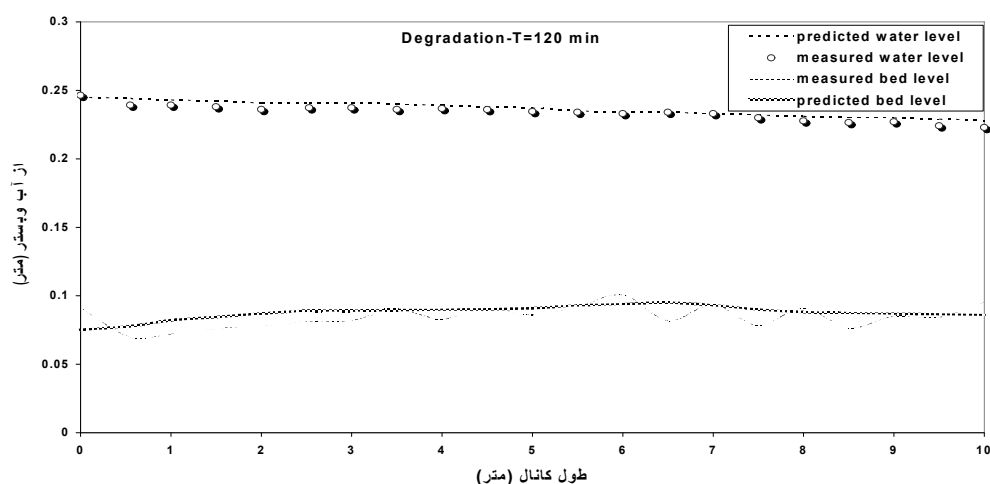
شکل ۲ الف- مقطع طولی فلوام انتقال رسوب



شکل ۲ ب- رسوبگذاری تحت شرایط جریان دائمی در $t=120 \text{ min}$

ب - فرسایش تحت جریان دائمی (degradation)

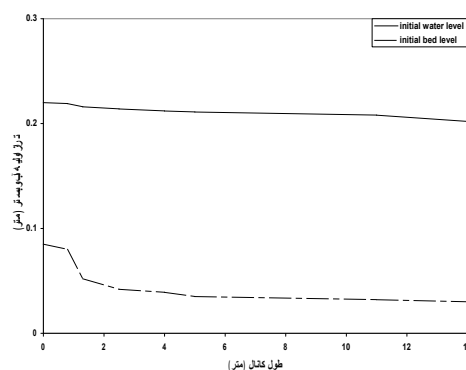
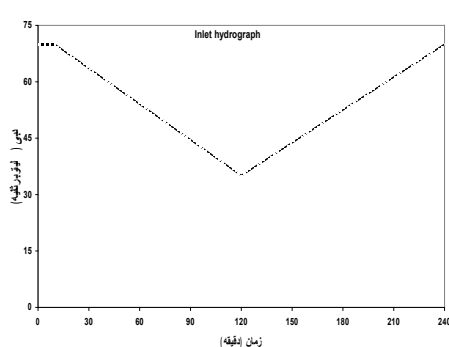
آزمایش دوم با شیب اولیه بستر ۰۰۰۲/ بوده و با کاهش دبی به lit/s نسبت به آزمایش اول، امکان فرسایش بستر فراهم می شود. شرایط دیگر مانند آزمایش اول بوده و ترازهای بستر جریان در فواصل و زمانهای مختلف ثبت می گردد. (شکل ۳)



شکل ۳- فرسایش تحت جریان دائمی در $t=120\text{ min}$

ج - رسوبگذاری و فرسایش تحت جریان غیر دائمی

برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه سازی رسوبگذاری و فرسایش به دلیل وقوع جریان غیر دائمی به کمک داده های تجربی، هیدروگراف ورودی، مطابق شکل ۴ اعمال می شود. این آزمایش رسوب تزریقی در ابتدای فلوم در مقدار 0.2 kg/sec ثابت نگه داشته می شود. شوهقادیر تراز آب و بستر در لحظه $t=0$ عنوان شرایط اولیه و هیدروگراف ورودی (شکل ۴) بستر تزریقی و عمق اندازه گیری شده در پایین دست به عنوان شرایط مرزی اعمال می شود. (شکل ۴ و شکل ۵ الف)



شکل ۴- هیدروگراف ورودی کانال

بهینه سازی شرایط زیرین به روش تحلیل معکوس

یکی از شرایط های مهم و موثر در به کارگیری مدل های ریاضی، تخمین صحیح پارامترهای مدل است. در این پژوهش، به منظور بهینه سازی مدل، شرایط مرزی و شرایط اولیه در مدل استوار یک کانال با بستر متحرک با توجه به دائمی یا غیر دائمی بودن

جریان و تغییرات شکل بستر در طول کالافیادیر ضریب زبری نسبت به زمان و مکان متغیر است. توجه به تعدد و پیچیدگی پارامترهای حاکم بر ضریب مانینگ در شرایط بستر متحرک، رگرسیون غیر خطی این پارامترها و یافتن فرمول مناسب عموماً با پیچیدگی و عدم قطعیت همراه است. در چنین شرایطی، استفاده از تحلیل معکوس جهت تعیین ضریب زبری مقاطع و زمان‌های مختلف، دقت نتایج حاصل از مدل را افزایش می‌دهد. روش تحلیل معکوس، ابتدا مقداری برای ضریب زبری اولیه تخمین زده می‌شود و سپس پس از شبیه سازی کامل، تابع خطای 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 بهینه سازی 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:

$$\varepsilon = \sum [(\eta(\text{simulated}) - \eta(\text{observed}) / \eta(\text{observed}))^2] \quad [28]$$

که در آن ε تابع هدف یا معیار خطا و $(\eta(\text{simulated}))$ مقدار (عمق یا دبی) محاسباتی و $(\eta(\text{observed}))$ مقدار (عمق یا دبی مشاهداتی) را در مقاطع مختلفشان می‌دهند. در این تحقیق الگوریتم ژنتیک به عنوان تابع بهینه سازی 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 تبیینی به ضرائب زبری بهینه و نهایتاً شبیه سازی مجدد پروفیل‌های جریان و بستر با پارامترهای زبری بهینه شده است.

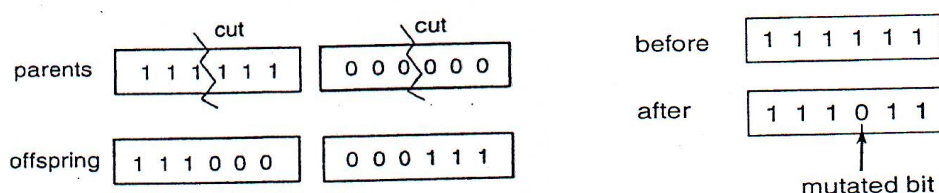
نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم‌های ژنتیک با مجموعه‌های اولیه از راه‌حل‌های تصادفی که جمعیت نامیده می‌شوند کار خود را آغاز می‌کنند. هر فرد در این جمعیت، کروموزوم نامیده می‌شود که نماینده راه‌حلی برای مساله مورد نظر است. معمولاً یک کروموزوم رشته‌ای از بیت‌های باینری (0، 1) است. هر کد یا عدد در این رشته یک ژن نامیده می‌شود. برای ایجاد کروموزوم‌ها اعداد باید به صورت باینری کدگذاری شوند. در هر نسل توسط پردازش جمعیت و بر اساس میزان برازش آنها، مجموعه‌ای از تخمین پارامترها در دامنه مساله به دست می‌آیند. جمعیت به کمک عملگرهایی که شبیه سازی 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 و سپس مقدار تابع هدف که معیاری برای سنجش کارایی و تطبیق رشته است، محاسبه می‌شود. اگر معیار رسیدن به حالت بهینه برآورده نشده باشد، تولید نسل جدید آغاز می‌شود. این صورت که اعضای جمعیت بر طبق میزان

برازش انتخاب شده و برای تولید نسل جدید انتخاب می شوند روند ایجاد فرزندان در نسلهای بعدی از سه قانون کلی تبعیت می کند:

فرزندان نخبه‌پایی که دارای بهترین برازندگی باشند برای نسل بعد انتخاب می شوند.

فرزندان حاصل از ترکیب ایجاد یک یا چند کروموزوم از والدین دارای بهترین برازندگی اسشکل خیلی عمومی ترکیب ، شامل دو والد است که فرزند را ایجاد می کنندبدین گونه که یک نقطه به صورت تصادفی روی رشته کروموزومی انتخاب شده ، بعد ناحیه های چپ یا راست آن نقطه ، در رشته کروموزومی جابجا می شود . در زیر نمونه ای از ترکیب با یک نقطه انتخابی به صورت شماتیک نمایش داده شده است :



شکل ۱۰ الف - ترکیب یک نقطه ای

شکل ۱۰ ب - عمل جهش

فرزندان حاصل از جهش یکی از مهمترین فرایندهایی است که اجازه می دهد ژنهایی جدید در کروموزوم ها ایجاد شود بدین صورت که فرزندان را به وسیله ایجاد تغییر در ژنها به صورت تصادفی ایجاد می کند.

از نسل دوم به بعد پس از ایجاد فرزندان با نسبت های تعریف شده و معین ، با استفاده از الگوریتم های انتخاب فرزندان نسل جدید گزینش و با قرار دادن این فرزندان در تابع هدف و امتیاز دهی به آنها الگوریتم تکرار شده تا وقتی که معیارهای پایان الگوریتم که می تواند تعداد نسل ، زمان ، معیار در میزان تابع هدف در چند نسل متوالی و ... باشد ، باعث توقف الگوریتم شود.

در این مطالعه پارامترهای شبیه سازی شده از تحلیل مدل تفاضلات محدود پیشنهادی با ضرب زبری اولیه به دست می آید. معادلات ۱ به عنوان قیدهای تابع بهینه سازی بوده و با استفاده از مقادیر مشاهداتی دبی و عمق، تابع بهینه سازی، مقادیر جدیدی برای ضرائب مانینگ تولید می کنند. اعمال مقادیر ضرائب زبری جدید در مقاطع مشخص شده و شبیه سازی دوباره پارامترها، روش مذکور با کمک الگوریتم ژنتیک دوباره تکرار شده و تا زمان رسیدن به معیار توقف الگوریتم ادامه می یابد.

تجزیه و تحلیل داده ها

۱- 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، ۱۹۸۵). کوریا و همکاران (۱۹۹۲) نیز در بررسی دولت رسوبگذاری مخزن به اهمیت این جمله ($\frac{\partial z}{\partial t}$) اشاره نموده اند. جهت ارزیابی عملکرد مدل از معیار متوسط خطای نسبی

$$\left(RAE_2 = \frac{\sum_{i=1}^n |z_{measured} - z_{calculated}|}{\sum_{i=1}^n z_{measured}} \right) \text{ و } \left(RAE_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |h_{measured} - h_{calculated}|}{\sum_{i=1}^n h_{measured}} \right)$$

و سینیچ (۱۹۹۴).

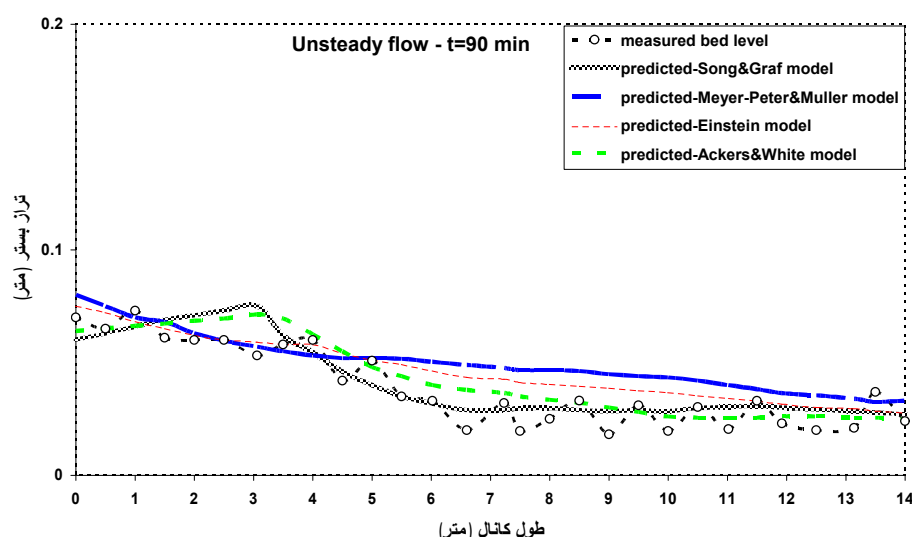
مطابق جدول، حذف جمله مربوط به نرخ تغییرات بستر $(\frac{\partial z}{\partial t})$ از معادله پیوستگی آب برای فرسایش (degradation) در جریان دائمی در لحظه $t = 120 \text{ min}$ تغییر قابل ملاحظه ای در نتایج ایجاد نمی کند در حالیکه برای حالت رسوبگذاری (aggradation) نیز حالت جریان غیردائمی خطاهائی ملاحظه می شود. بنابراین چنین استنباط می شود در شبیه سازی 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.

جدول ۱- خطای مربوط به روند تحلیل (ضریب مانینگ ثابت)

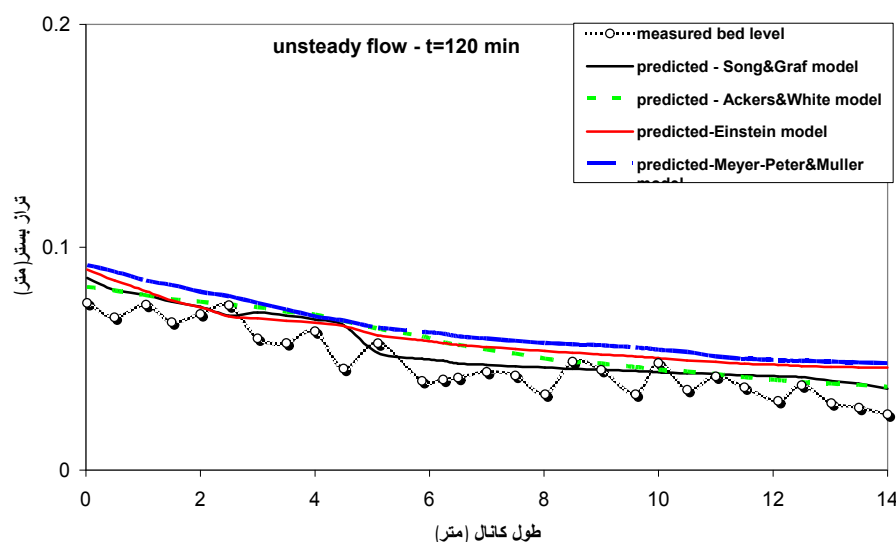
روند تحلیل حالت جریان	مزدوج Coupled					
	غیر مزدوج Uncoupled		(معادله پیوستگی) $\frac{\partial z}{\partial t}$ با			
			(معادله پیوستگی) $\frac{\partial z}{\partial t}$ بدون			
	%RAE ₁	%RAE ₂	%RAE ₁	%RAE ₂	%RAE ₁	%RAE ₂
دائمی (aggradation)	۱.۵	۱۹	۰.۹	۱۳	۱.۱	۱۳.۹
دائمی (degradation)	۲.۷	۱۳	۲.۳	۸	۲.۳۳	۸.۱
غیر دائمی (T=۱.۵ hr)	۲.۹	۱۸	۴	۱۸.۴	۵	۲۰.۲
تغییر دائمی (T=۲ hr)	۵.۹۶	۱۸.۸	۴.۸۲	۱۵.۷	۵.۸	۱۷.۹
تغییر دائمی (T=۴ hr)	۶	۳۰	۲.۵۵	۲۳	۲.۴	۲۵

۲- مطابق شکل ۶ و شکل برای مدل سازی جریان دائمی با بستر متحرک از فرمول های انتقال باریستر انیشتن (۱۹۵۰)، میتریتر- مولر (۱۹۴۸) و ایکرز وایت (۱۹۷۳) و جهت شبیه سازی جریان غیردائمی علاوه بر روابط فوق الذکر از رابطه سانگ و گراف (۱۹۹۷) استفاده شده است. تراش 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 و فرمول انتقال بار بستر مهمترین نقش را در شبیه سازی تراز بستر رسوبی ایفا می کند دلایل تفاوت فاحش برخی روشها در برآورد بار بسترو نتیجتاً مدل 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 جریانپذیدگی و محدودیت شناخت نسبت به مکانیزم و فرم مختلط حرکت ذرات در روابط انتقال رسوب است.



شکل ۶- اثر فرمول های انتقال بار رسوب در شبیه سازی بستر متحرک



شکل ۷- اثر فرمول های انتقال بار رسوب در شبیه سازی بستر متحرک

۳- جدول ۱ و ۲ تأثیر روند تحلیل سه معادله حاکم بر جریانهای رسوبی در ایجاد نوسانات و خطای مدل را نشان می دهد. تحلیل غیر مزدوج براساس حل غیر همزمان معادلات جریان و معادله رسوب بوده در حالیکه در تحلیل مزدوج، اساس کار حل همزمان هر سه معادله و تأثیر پارامترهای سه معادله بر هم به طور مسدود و تقسیم و همزمان است. مطابق جدول ۱ و در شبیه سازی با هر دو روش مزدوج و غیرمزدوج، برای جریان غیردائمی دودت

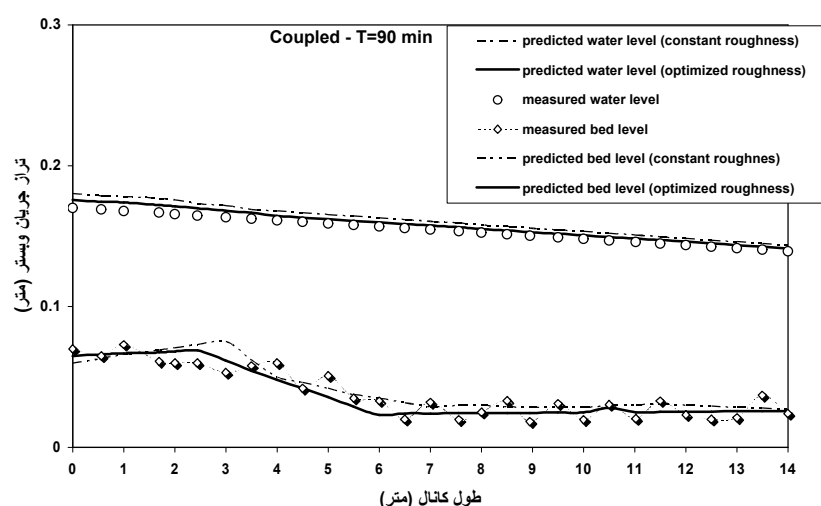
$t=90\text{ min}$ ، نتایج دو روش بسیار نزدیک به هم است. در مدت زمان $t=120\text{ min}$ ، نوسانات و خطاهایی در روش غیر مزدوج ملاحظه می شود و با افزایش زمان در $t=240\text{ min}$ خطاهای روش غیر مزدوج بیشتر و بارزتر می گردد.

برای جریان دائمی در هر دو حالت رسوبگذاری (aggradation) و فرسایش (degradation) عدم دقت قابل توجهی در روش غیر مزدوج ملاحظه می گردد. در توجیه این نتایج می توان گفت که تغییرات ناگهانی بستر تأثیر مستقیم بر شیب بستر داشته و به دلیل غیرهمزمانی شبکه حل در تحلیل غیر مزدوج، این تأثیرات نادیده گرفته می شود. در نتیجه با افزایش زمان، نوسانات و خطاهای روش غیر مزدوج رو به افزایش گذاشته و ایجاد ناپایداری می نماید.

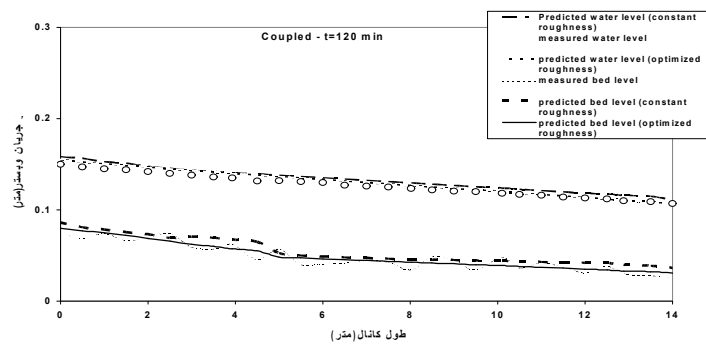
۴- شکل ۵ (ب) تا ۵ (د) و جدول ۱ و ۲ مقایسه بین پروفیل های جریان و بستر در زمانهای مختلف شبیه سازی شده با ضرائب مانینگ ثابت و بهینه شده را نمایش می دهند. روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک به طور اتوماتیک با مدل پیشنهادی جریان لینک شده و با استفاده از داده های اندازه گیری شده و انجام یک روند تکراری، ضرائب زبری بهینه شده را ایجاد می نماید.

۵- نتایج حاصله مطابق شکل ۵ و جدول ۱ و ۲ از آن است که مدل پیشنهادی باعث ارتقای کارایی شبیه سازی و کاهش خطاهای عددی شده و در کلیه حالات عملکرد آن رضایت بخش است.

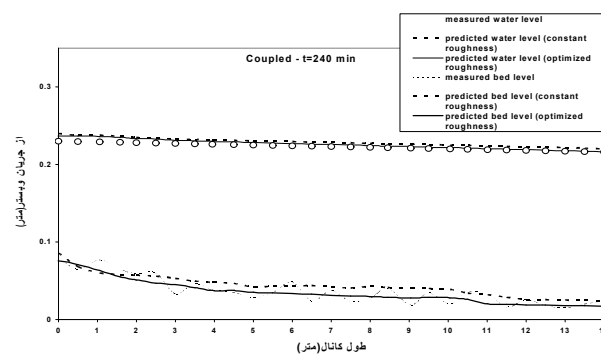
۶- مورد شکل بستر در آزمایشات، در جریان دائمی فرم بستر ایجاد شده ابتدا به صورت رپل بوده سپس در حالات بینابینی رپل و دون قرار می گیرد در حالیکه در جریان غیردائمی به دلیل تغییرات سریع دبی نسبت به زمان، توسعه و تشکیل فرم بستر روند پیچیده ای دارد. نوع شکل بستر توجیه به روش به کار رفته، هیچ نوع تغییری در روند تحلیل ایجاد نمی نماید.



شکل ۵ب- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تراز جریان و بستر

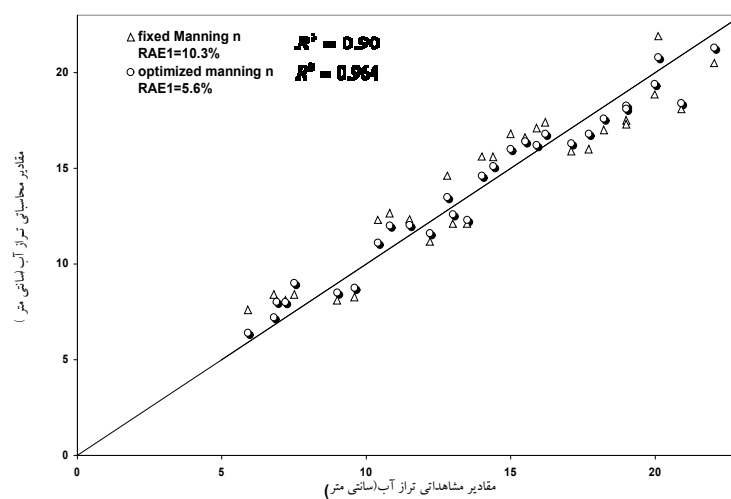


شکل ۵- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تراز جریان و بستر

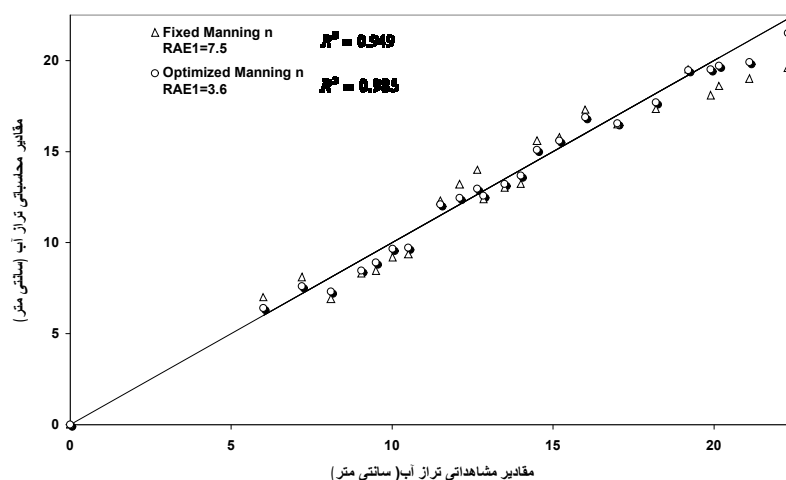


شکل ۵د- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تراز جریان و بستر

جهت درک بهتر عملکرد مدل، تغییرات عمق در مقاطع $x=5m$ و $x=10m$ مطابق شکل ۸ و ۹ ترسیم شده است.



شکل ۸- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تغییرات عمق در $x=5m$



شکل ۹- اثر بهینه سازی ضرائب زبری در شبیه سازی تغییرات عمق در $X=10m$

جدول ۲- خطای مربوط به روند تحلیل (ضریب مانینگ بهینه)

روند تحلیل جریان	غیر مزدوج (Uncoupled)		مزدوج (Coupled)	
	$\%RAE_1$	$\%RAE_2$	$\%RAE_1$	$\%RAE_2$
غیر دائمی				
$T=1.5 \text{ hr}$	۲.۳	۱۵	۲.۱	۱۴
$T=2 \text{ hr}$	۳.۴	۱۲.۲	۲.۵	۱۰
$T=4 \text{ hr}$	۲.۶	۲۱.۸	۱.۳۳	۱۸

مقایسه نتایج حاصله با داده های تجربی درین مقطع نشان می دهد که روش شبیه سازی پیشنهادی رفته موجب کاهش خطا در پیش بینی تراز های عمق گردیده است.

نتیجه گیری

از مجموعه بررسی های تجربی و تئوری مسأله حاضر چنین استنتاج می شود که: کاربرد الگوریتم ژنتیک در جستجوی ضرایب زبری بهینه و استفاده همزمان آن در مدل، ضمن کاهش خطاهای عددی از ۲ تا ۱۵ درصد موجب ارتقای کارایی شبیه سازی پارامترهایی نظیر عمق و دبی و تراز بستر می گردد.

- با گذشت زمان، خطاهای ناشی از تحلیل معادلات با روش غیر مزدوج افزایش می یابد.

- در شبیه سازی جریانهای انتقال رسوب در بسترهای آبرفتی، دژاتغییر شکل بستر، حذف عبارت $\frac{\partial z}{\partial t}$ از معادله پیوستگی جریان، منجر به افزایش جزئی خطاهای محاسباتی تا حداکثر ۴ درصد می گردد.

نتایج گویای آن است که خطاها و عدم قطعیت در تخمین شکل بستر به دلیل اثرات انتخاب فرمول انتقال رسوب بسیار بیشتر از خطاهای عددی بوده و فرمول انتقال بار بستر نقش بسیار حساس در شبیه سازی تراز بستر بازی می کند.

تشکر و قدردانی

آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق در مدت فرصت مطالعاتی و با پشتیبانی مالی دانشگاه تبریز، در آزمایشگاه مورفودینامیک موسسه تحقیقی CNRS وابسته به دانش گاه کان فرانسه انجام گرفته اسکف بدین وسیله از کلیه عوامل دست اندرکار تشکر و قدردانی می شود.

مراجع:

- حسن زاده ی، کی نژاد م، روشنگر ک، اعلمی م، ۱۳۸۹ ارائه مدل یک بعدی انتقال جریان و رسوب، مطالعه موردی رودخانه الندخوی، مجله آب و فاضلاب. ۷۳، ۱۴-۴.
- فرسادی زاده د، منعم م، حسن زاده ی، ۱۳۸۵. بررسی مدل هیدرودینامیک ICSS در کانال آزمایشگاهی برای شبیه سازی جریان غیرماندگار در سیستم کنترل کانال ها. مجله دانش کشاورزی. ۱۶، ۱۴۷-۱۵۹.
- Ackers P, and White WR, 1973. Sediment transport: New approach and analysis. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng. 99 (Hy11): 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 Surf. 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. Hydraul. Eng., ASCE, 128:306-321.

Correia, LRP , Krishnappan and BG, Graf WH,1992. fully coupled unsteady mobile boundary flow model. J. Hydraul. Eng., ASCE, 118: 476-494.

Einstein, HA, 1950. The bed – load function for sediment transportation in open channel flows. Tech. Bull. No 1026, U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.

Fread DL, and Smith GG,1978.Calibration techniques for 1-D unsteady flow models. J Hydr Div , ASCE , 104(7): 1027- 1043

Gill MA, 1983a. Diffusion model for aggrading channels. J. Hydraul. 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. AIAA 14th fluid and plasma dynamics conference. Palo Alto, California, AIAA-81-1259.

Kassem A , and Chaudhry MH, 1998. Comparison of coupled and semi coupled numerical models for alluvial channels. J. Hydraul. Eng., 124(8): 794-802.

Krishnappan BG,1985. Modelling of unsteady flows in alluvial streams. J. Hydr. Engrg, ASCE, 111(2): 257-266

Lenau CW , and Hjelmfelt AT, 1992. River bed degradation due to abrupt outfall lowering. J. Hydraul. Eng., 118(6):918-933.

Lyn DA, 1987. Unsteady sediment transport modeling. J. Hydraul. Eng.,ASCE, 113: 1-15.

Mendenhall, W. and T. Sincich. 1994 Statistics for engineering and sciences. Prentics- Hall pub.co. Inc., London.

Meyer-Peter E , and Müller R, 1948. Formulas for bed- load transport. Int. Assoc. Hydraulic Research, 2nd Mtg., Stockholm: 39-64.

Ribberink JS , and Van der Sande JTM,1985. Aggradation in rivers due to overloading-analytical approaches. J. Hydraul. Res. 23(3): 273-283.

Song T and Graf WH ,1997. Experimental study of bedload transport in unsteady open-channel flow. Internat. J. of Sediment Res., 12(3): 63-71.

Soni JP, Garde RJ, and Raju KG, 1980. Aggradation in streams due to overloading. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 106(1):117-132.

Wasantha Lal AM ,1995. Calibration of riverbed roughness. J Hydr Engrg, ASCE, 121(9): 664- 671

Zhang H, and Kahawita R, 1990. Linear hyperbolic model for alluvial channels. J. Hydraul. Eng., 116(4): 478-793.