

# هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران

7<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering



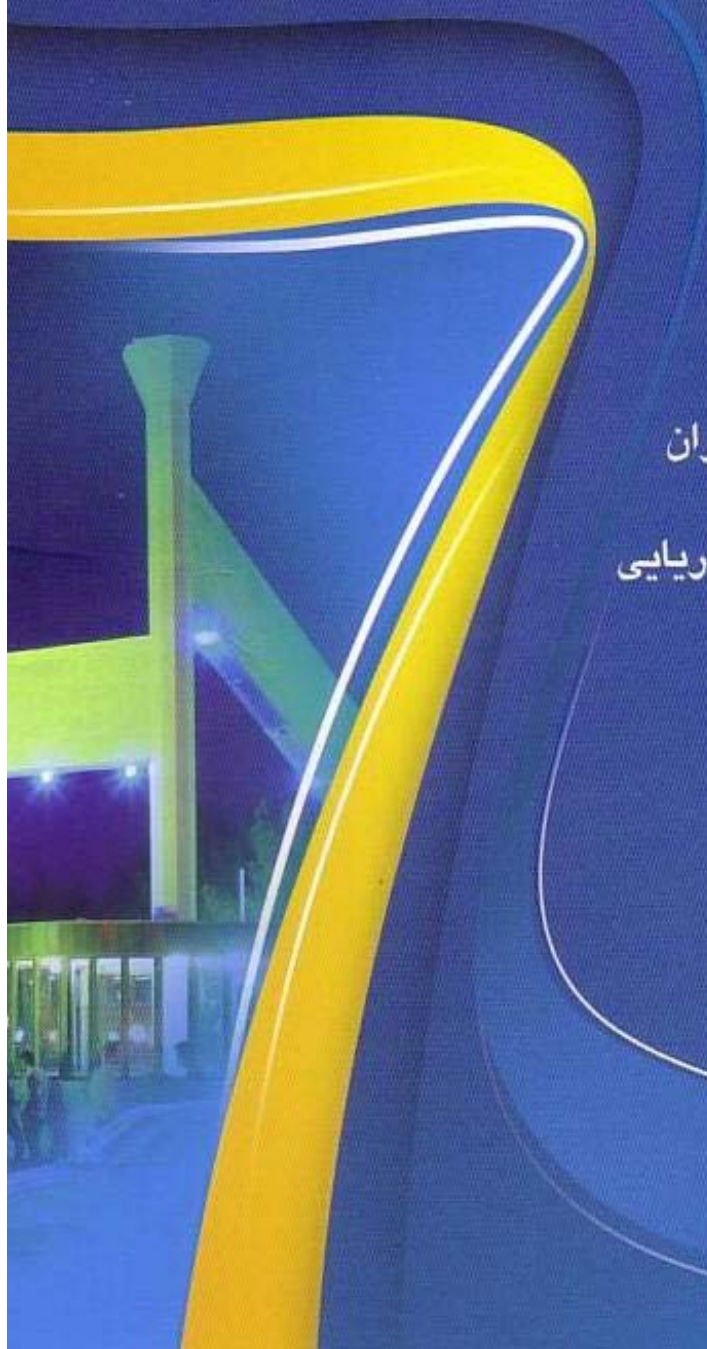
دانشگاه سیستان و بلوچستان

## چکیده مجموعه مقالات

روش های عددی در مهندسی عمران  
مدیریت بحران و پدافند غیر عامل  
مهندسی سازه های هیدرولیکی و دریایی  
مهندسی محیط زیست  
مهندسی و مدیریت منابع آب

## جلد سوم

۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲  
دانشگاه سیستان و بلوچستان





## شبیه‌سازی یک بعدی جریان ناشی از شکست سد بر بسترهای متحرک

امین استثنائی<sup>۱</sup>، محمدرضا جعفرزاده<sup>۲</sup>، ابراهیم علامتیان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران

Amin.Estesnaie@stu-mail.um.ac.ir

jafarzad@um.ac.ir

e.alamatian@yahoo.com

### چکیده

در این مقاله مدل یک بعدی حجم محدود Roe و SLIC برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد بر بستر متحرک توسعه داده می‌شود و با استفاده از آنها معادلات آب‌های کم عمق که اثرات انتقال رسوب و تغییرات بستر در آن دیده شده است حل می‌شوند. انتقال بار بستر و بار معلق در حالت غیرتعادلی و با کاربرد رابطه ون راین با اعمال ضریب تصحیح انجام شده است. برای در نظر گرفتن اثرات غلظت رسوب بر ته‌نشینی رسوبات از سرعت ته‌نشینی مواد رسوبی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد میزان تغییر شکل بستر در مقایسه با تغییرات جریان قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد و بایستی در مدل کردن شکست سد اثر متقابل جریان و رسوب در نظر گرفته شود. مقایسه نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی موجود نشان داد که مدل‌های بکار رفته بخوبی قادر به پیش‌بینی شرایط جریان و تغییرات بستر می‌باشند. تجربیات عددی نشان داد که پیشروی پیشانی موج بر بسترهای ثابت با سرعت بیشتری نسبت به بسترهای متحرک انجام می‌شود؛ لیکن سرعت موج در حال گسترش به سمت مخزن بر دو بستر چندان متفاوت نمی‌باشد.

**کلمات کلیدی:** شکست سد، بستر متحرک، انتقال رسوب، حجم محدود، جریان یک بعدی.



## شبیه‌سازی یک بعدی جریان ناشی از شکست سد بر بسترهای متحرک

امین استثنائی<sup>۱</sup>، محمدرضا جعفرزاده<sup>۲</sup>، ابراهیم علامتیان<sup>۳</sup>  
 ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
 ۲- استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
 ۳- استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران

Amin.Estesnaie@stu-mail.um.ac.ir

### خلاصه

در این مقاله مدل یک بعدی حجم محدود Roe و SLIC برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد بر بستر متحرک توسعه داده می‌شود و با استفاده از آنها معادلات آب‌های کم عمق که اثرات انتقال رسوب و تغییرات بستر در آن دیده شده است حل می‌شوند. انتقال بار بستر و بار معلق در حالت غیرتعادلی و با کاربرد رابطه ون راین با اعمال ضریب تصحیح انجام شده است. برای در نظر گرفتن اثرات غلظت رسوب بر ته‌نشینی رسوبات از سرعت ته‌نشینی مواد رسوبی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد میزان تغییر شکل بستر در مقایسه با تغییرات جریان قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد و بایستی در مدل کردن شکست سد اثر متقابل جریان و رسوب در نظر گرفته شود. مقایسه نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی موجود نشان داد که مدل‌های بکار رفته بخوبی قادر به پیش‌بینی شرایط جریان و تغییرات بستر می‌باشند. تجربیات عددی نشان داد که پیشروی پیشانی موج بر بسترهای ثابت با سرعت بیشتری نسبت به بسترهای متحرک انجام می‌شود؛ لیکن سرعت موج در حال گسترش به سمت مخزن بر دو بستر چندان متفاوت نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: شکست سد، بستر متحرک، انتقال رسوب، حجم محدود، جریان یک بعدی.

### ۱. مقدمه

سدها سازه‌هایی هستند که در مسیر رودخانه ساخته می‌شوند و باعث تشکیل مخزن و بالا آمدن سطح آب در بالادست خود می‌گردند. با استفاده از مخزن سد می‌توان آب اضافی را در مواقع پر آبی ذخیره و در مواقع کم آبی استفاده نمود. به دلیل ذخیره زیاد آب در بالادست سد، شکست آن بسیار با اهمیت می‌باشد. شبیه‌سازی جریان شکست سد روی بسترهای متحرک با چالش بیش‌تری نسبت به بسترهای ثابت همراه است؛ زیرا غلظت بالای رسوب و تغییرات سریع بستر باعث پیچیده شدن ساختار جریان می‌شود.

فریرا و لیل در سال ۱۹۹۸، فراکارولو و آرمانی‌نی در سال ۱۹۹۸ و وانگ و گریمن در سال ۱۹۹۹ مدل‌های جریان شکست سد بر بستر متحرک را بنا نهادند [۱]. با این حال، بعضی از مدل‌ها از اثر انتقال رسوب و تغییر بستر روی جریان صرف نظر نموده‌اند و بعضی از فرض انتقال رسوب در شرایط تعادلی موضعی استفاده نموده‌اند که این شرط در حالت جریان شکست سد اعتباری ندارد. فراکارولو و کاپارت در سال ۲۰۰۲ [۲] یک مدل دو لایه‌ای جریان شکست سد با بستر متحرک را پیشنهاد نمودند؛ در این مدل جریان آب تمیز در لایه بالتر و مخلوط آب و رسوب در لایه پایین‌تر به صورت جداگانه شبیه‌سازی می‌شوند. قابلیت کاربرد این مدل دو لایه‌ای محدود است؛ چرا که یک غلظت ثابت رسوب در لایه پایین‌تر فرض می‌شود. کاپارت و یونگ در سال ۱۹۹۸ [۲]، کائو و همکاران [۳] و وو و وانگ [۱] مدل‌های پیشرفته‌تری را برای جریان شکست سد روی بسترهای متحرک و فرسایش‌پذیر توسعه داده‌اند. آنها انتقال رسوب در شرایط غیرتعادلی و اثرات غلظت رسوب و تغییر بستر روی جریان را در نظر گرفتند. با این حال، مدل تبدیلی رسوب پیشنهادی توسط کاپارت و یونگ اثر اندازه رسوب را در نظر نمی‌گیرد؛ مدل کائو و همکاران فقط رسوب معلق را شبیه‌سازی می‌کند و مدل وو و وانگ بار انتقالی کل (بار بستر و بار معلق) را شبیه‌سازی می‌نماید.

در این مقاله شکست سد بر بستر متحرک به صورت عددی شبیه‌سازی می‌گردد. شبیه‌سازی با استفاده از حل هم‌زمان معادلات آب‌های کم عمق و معادلات مربوط به رسوب (بار بستر و بار معلق) و استفاده از روش‌های عددی (Roe و SLIC) صورت می‌گیرد. نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌گردد.



## ۲. معادلات حاکم

معادلات آب‌های کم عمق در کانال‌های باز با متوسط‌گیری در عمق از معادلات سه بعدی ناویراستوکس بدست می‌آیند. در استخراج معادلات مذکور، سیال غیرقابل تراکم و توزیع فشار در عمق به صورت هیدرواستاتیک فرض می‌شود. با توجه به تأثیر متقابل جریان، انتقال رسوب، تغییر بستر و چگالی متغیر، معادلات یک بعدی تعمیم یافته آب‌های کم عمق به صورت ذیل بدست می‌آیند، [۴]:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho Q)}{\partial x} + \rho_b \frac{\partial A_b}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Q) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho Q^2}{A} + \frac{1}{2} \frac{g A^2}{B} \right) + \rho g A \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{2} g A h_p \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho g \frac{n^2 Q |Q|}{A R^{4/3}} = 0, \quad h_p = \int_0^B h_{2d}^2 dy / A \quad (2)$$

که در آن  $A$  سطح مقطع جریان،  $Q$  دبی جریان،  $\rho_b$  جرم مخصوص مخلوط آب و رسوب در لایه سطحی بستر،  $A_b$  سطح مقطع بستر در بالای سطح مینا،  $\rho$  جرم مخصوص مخلوط آب و رسوب،  $\beta$  ضریب تصحیح برای اندازه حرکت ( $\beta=1$ )؛  $g$  شتاب گرانش،  $z_b$  تراز سطح بستر،  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $B$  عرض کانال در سطح آب و  $h_{2d}$  عمق جریان نقطه‌ای (محلی) می‌باشد.  $\rho$  و  $\rho_b$  به صورت ذیل محاسبه می‌شوند:

$$\rho = \rho_f (1 - C_i) + \rho_s C_i \quad (3)$$

$$\rho_b = \rho_f p'_m + \rho_s (1 - p'_m) \quad (4)$$

در آن  $\rho_f$  و  $\rho_s$  جرم مخصوص‌های آب و رسوب،  $C_i$  غلظت متوسط عمقی بار کل رسوب و  $p'_m$  تخلخل ذرات رسوب می‌باشد. با توجه به حالت انتقال رسوب، بار رسوبی کل در رودخانه‌های طبیعی ممکن است به دو بخش بار بستر و بار معلق تقسیم گردد. بنابراین نرخ انتقال بار کل،  $Q_t$ ، به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$Q_t = Q C_i = Q C + Q_b \quad (5)$$

که در آن  $C$  متوسط غلظت حجمی بار معلق روی سطح مقطع جریان و  $Q_b$  نرخ انتقال بار بستر می‌باشد. معادله‌ی یک بعدی انتقال بار معلق به صورت ذیل می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) + \frac{\partial}{\partial x}(QC) = B(E_b - D_b) \quad (6)$$

که در آن  $D_b$  و  $E_b$  نرخ‌های ته‌نشینی و ورود رسوب در لایه‌های مشترک بار بستر و بار معلق می‌باشند که به صورت  $D_b = \omega_{sm} C_b$  و  $E_b = \omega_{sm} C_b$  تعریف می‌شوند. در این روابط  $\omega_{sm}$  سرعت سقوط ذرات رسوب در آب تیر و کدر،  $C_b$  غلظت بار معلق نزدیک بستر در حالت تعادلی می‌باشد.  $C_b$  غلظت نزدیک بستر است که به متوسط غلظت  $C$  با رابطه‌ی  $C_b = \alpha_c C$  مربوط می‌شود.  $\alpha_c$  با استفاده از رابطه ارائه شده توسط کائو و همکاران [۳] محاسبه می‌شود.

با توجه به مدل انتقال رسوب در حالت غیر تعادلی، تغییرات بستر به صورت ذیل بیان می‌شود، [۴]:

$$(1 - p'_m) \frac{\partial A_b}{\partial t} = B(D_b - E_b) + \frac{1}{L}(Q_b - Q_{b^*}) \quad (7)$$

در آن  $Q_{b^*}$  نرخ انتقال بار بستر تعادلی و  $L$  طول انطباق رسوب است. طول انطباق با استفاده از رابطه‌ی ذیل تعیین می‌شود، [۱]:

$$L = \max \left\{ L_b, \frac{uh}{\alpha_c \omega_s} \right\} \quad (8)$$

در آن  $u$  متوسط سرعت جریان،  $h$  متوسط عمق جریان،  $\omega_s$  سرعت ته‌نشینی یک ذره منفرد در آب تمیز و  $L_b$  طول انطباق بار بستر می‌باشد؛  $L_b$  به ابعاد شکل بستر غالب و هندسه کانال بستگی دارد که می‌توان به طور تقریبی برابر با طول تلماسه‌ها که ۱۰-۵ برابر عمق جریان می‌باشند در نظر گرفته شوند.

با در نظر گرفتن تعادل جرم در لایه‌ی بستر و با توجه به رابطه‌ی (۷) معادله‌ی انتقال بار بستر یک بعدی به صورت ذیل می‌باشد، [۴]:



$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q_b}{u_b} \right) + \frac{\partial Q_b}{\partial x} = \frac{1}{L} (Q_{b^*} - Q_b) \quad (9)$$

در آن  $u_b$  سرعت بار بستر است؛ در این مقاله برای سادگی  $u_b$  با سرعت جریان برابر فرض شده است. برای تکمیل مدل انتقال رسوب ذکر شده، روابط تجربی اضافی برای تعیین نرخ انتقال بار بستر تعادلی ( $Q_{b^*}$ ) و غلظت رسوب معلق نزدیک کف ( $C_{b^*}$ ) مورد نیاز می‌باشند. در این مقاله روابط ون راین [۵،۶] استفاده می‌شوند. با این حال، این روابط، که در رژیم‌های جریان پایین‌تر واسنجی شده‌اند، باید برای موقعیت جریان شکست سد تغییر شکل داده شوند. با توجه به مشاهدات فراکارولو و کاپارت، غلظت رسوب در لایه‌ی پایین‌تر نزدیک بستر در شرایط جریان شکست سد بسیار بالاست. بنابراین وو و وانگ یک ضریب تصحیح را برای عدد مرحله‌ی انتقال ( $T$ ) در روابط ون راین معرفی نمودند؛ که در آن چگالی آب با چگالی مخلوط نزدیک کف جایگزین می‌شود، [۱]:

$$\tau_{cr} = \frac{u_{b^*}^2}{\theta_{cr} (\rho_s / \rho_{mb} - 1) g d} = k_t \frac{u_{b^*}^2}{\theta_{cr} (\rho_s / \rho_f - 1) g d} \quad (10)$$

در رابطه بالا  $\theta_{cr}$  مقدار بحرانی پارامتر شیلدز برای آستانه حرکت رسوب،  $\rho_{mb}$  چگالی آب و مخلوط رسوب نزدیک بستر و  $k_t$  ضریب تصحیح است؛ ضریب تصحیح فوق با روش سعی و خطا برای داده‌های در دسترس به صورت ذیل توسط وو و وانگ پیشنهاد شده است:

$$k_t = 1 + 1.5 \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (11)$$

برای ایجاد یک الگوریتم صریح، روابط (۱) و (۲) با حذف چگالی جریان در سمت چپ آنها با استفاده از رابطه‌ی (۳) دوباره فرمول‌بندی می‌شوند. در نهایت روابط پیوستگی و اندازه حرکت و روابط (۶) و (۹) در شکل قانون تعادل به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شوند، که در آن  $\Phi$  و  $F$  بیانگر بردارهای مقادیر مجهول و شارها و  $S$  شامل تمام جمله‌های باقی‌مانده در هر رابطه می‌باشد.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = S \quad (12)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} A \\ Q \\ AC \\ Q_b/u_b \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} Q \\ Q^2/A + gA^2/2B \\ QC \\ Q_b \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-p'_m} \left[ B(E_b - D_b) + \frac{1}{L} (Q_{b^*} - Q_b) \right] \\ -gA \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{1}{2} gAh_p \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} - \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho} u \left( 1 - \frac{C_t}{1-p'_m} \right) \times \left[ B(E_b - D_b) + \frac{1}{L} (Q_{b^*} - Q_b) \right] \\ B(E_b - D_b) \\ \frac{1}{L} (Q_{b^*} - Q_b) \end{bmatrix}$$

معادلات (۱۲) و (۱۳) را می‌توان به کمک یک روش عددی حل و مشخصات جریان و تغییرات بستر را بدست آورد.

### ۳. روش عددی

با توجه به شبکه‌بندی حجم محدود، شکل ۱، با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی (۱۲) روی  $\Delta$  امین حجم کنترل و اعمال تئوری گرین، همچنین استفاده از روش اولر برای مشتقات زمانی، رابطه‌ی گسسته شده‌ی ذیل بدست می‌آید، [۴]:

حجم کنترل



$$\Phi_i^{n+1} = \Phi_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (\mathbf{F}_{i+1/2}^n - \mathbf{F}_{i-1/2}^n) + \Delta t \mathbf{S}_i^n \quad (14)$$

در رابطه‌ی فوق  $\Delta x_i$  طول  $i$  امین حجم کنترل،  $\Delta t$  گام زمانی، بالانویس  $n$  نمایه‌ی گام زمانی و  $\mathbf{F}_{i+1/2}^n$  شار جریان بین سلولی در دیواره‌ی  $i+1/2$  می‌باشند. شار عددی با روش‌های مختلف عددی قابل محاسبه می‌باشد.

### ۳-۱. روش Roe برای محاسبه شار عددی

روش Roe یک حل کننده ریمن خطی شده می‌باشد که با استفاده از آن شارهای عددی در مرز بین سلول‌ها به صورت ذیل محاسبه می‌شوند، [۷]:

$$\mathbf{F}_{i+1/2}^n = \frac{1}{2} (\mathbf{F}_L^n + \mathbf{F}_R^n) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \tilde{\alpha}_i |\tilde{\lambda}_i| \tilde{\mathbf{r}}^{(i)} \quad (15)$$

در آن  $\tilde{\lambda}_i$  و  $\tilde{\mathbf{r}}^{(i)}$ ، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه راست ماتریس ژاکوبین  $\mathbf{A}(\Phi) = \partial \mathbf{F}(\Phi) / \partial \Phi$  می‌باشند و به صورت ذیل محاسبه می‌گردند:

$$\tilde{\lambda}_1 = \tilde{u} - \tilde{a} \quad \tilde{\lambda}_2 = \tilde{u} \quad \tilde{\lambda}_3 = \tilde{u} \quad \tilde{\lambda}_4 = \tilde{u} + \tilde{a}$$

$$\tilde{\mathbf{r}}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{u} - \tilde{a} \\ \tilde{c} \\ \tilde{c}_b \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{r}}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{r}}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{r}}^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{u} + \tilde{a} \\ \tilde{c} \\ \tilde{c}_b \end{bmatrix} \quad (16)$$

نماد  $\tilde{p}$  در روابط فوق مشخص کننده مقدار میانگین Roe برای متغیر  $p$  می‌باشد. در روش Roe مقادیر میانگین به صورت ذیل محاسبه می‌شوند:

$$\bar{A} = \frac{1}{2} (A_L + A_R), \quad \tilde{u} = \frac{Q_L \sqrt{A_R} + Q_R \sqrt{A_L}}{\sqrt{A_L A_R} (\sqrt{A_L} + \sqrt{A_R})}, \quad \tilde{c} = \frac{C_L \sqrt{A_L} + C_R \sqrt{A_R}}{\sqrt{A_L} + \sqrt{A_R}} \quad (17)$$

$$\tilde{c}_b = \frac{Q_R Q_{bL} \sqrt{A_L} + Q_L Q_{bR} \sqrt{A_R}}{Q_L Q_R (\sqrt{A_L} + \sqrt{A_R})}, \quad \tilde{a} = \sqrt{\frac{g}{2B} (A_L + A_R)}$$

با توجه به رابطه‌ی  $\Delta \Phi = \Phi_R - \Phi_L = \sum_{i=1}^m \tilde{\alpha}_i \tilde{\mathbf{r}}^{(i)}$ ،  $\tilde{\alpha}_i$  های به صورت ذیل بدست می‌آیند:

$$\tilde{\alpha}_1 = \frac{(\tilde{a} + \tilde{u}) \Delta \phi_1 - \Delta \phi_2}{2\tilde{a}}, \quad \tilde{\alpha}_2 = -\tilde{c} \Delta \phi_1 + \Delta \phi_3, \quad \tilde{\alpha}_3 = -\tilde{c}_b \Delta \phi_1 + \Delta \phi_4, \quad \tilde{\alpha}_4 = \frac{(\tilde{a} - \tilde{u}) \Delta \phi_1 + \Delta \phi_2}{2\tilde{a}} \quad (18)$$

### ۳-۲. محاسبه شار عددی در روش SLIC

روش SLIC در دسته روش‌های مرتبه دوم TVD است که از توسعه و بسط روش مرکزی مرتبه اول FORCE بدست آمده است. شار مرکزی مرتبه اول FORCE با رابطه ذیل محاسبه می‌شود، [۸]:

$$\mathbf{F}_{i+1/2}^{force} = \mathbf{F}_{i+1/2}^{force}(\Phi_L, \Phi_R) = \frac{1}{2} [\mathbf{F}_{i+1/2}^{LF}(\Phi_L, \Phi_R) + \mathbf{F}_{i+1/2}^{LW2}(\Phi_L, \Phi_R)] \quad (19)$$



این شار یک میانگین حسابی بین شار لاکس- فردریک  $(F_{i+1/2}^{LF})$  و شار دو گامی لاکس- وندروف  $(F_{i+1/2}^{LW2})$  می باشد. در روش SLIC شار بین سلولی  $F_{i+1/2}$ ، در سه گام ذیل محاسبه می شود:

گام اول- بازسازی داده ها

$$\Phi_i(x) = \Phi_i^n + \frac{(x-x_i)}{\Delta x} \Delta_i, \quad \Delta_i = \frac{1}{2}(\Phi_i^n - \Phi_{i-1}^n) + \frac{1}{2}(\Phi_{i+1}^n - \Phi_i^n) \quad (20)$$

گام دوم- تکمیل مقادیر پرون یابی شده

$$\bar{\Phi}_i^L = \Phi_i^L + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} [F(\Phi_i^L) - F(\Phi_i^R)], \quad \bar{\Phi}_i^R = \Phi_i^R + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} [F(\Phi_i^L) - F(\Phi_i^R)] \quad (21)$$

گام سوم- محاسبه شار به کمک روش FORCE

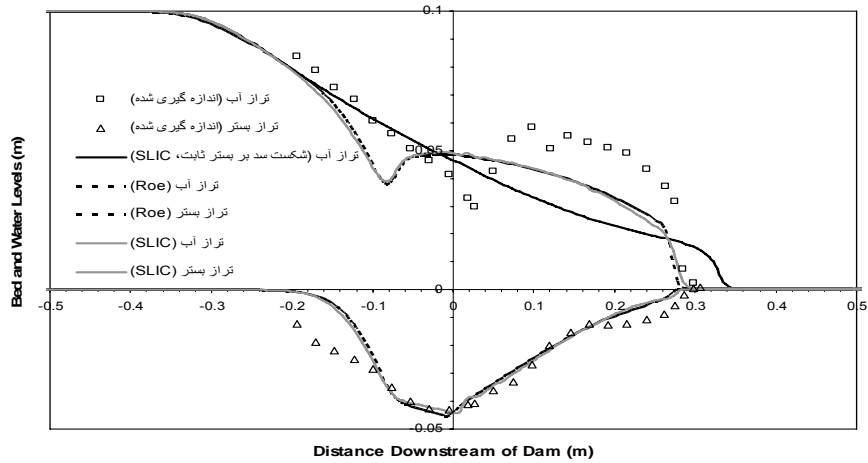
$$F_{i+1/2}^{force} = F_{i+1/2}^{force}(\bar{\Phi}_i^R, \bar{\Phi}_{i+1}^L) \quad (22)$$

برای تکمیل نگارش TVD روش SLIC، در رابطه ی (۲۰) شیب های  $\Delta_i$  در گام بازسازی با شیب های محدود شده  $(\bar{\Delta}_i)$  با روش Minmod جایگزین می شوند، [۸].

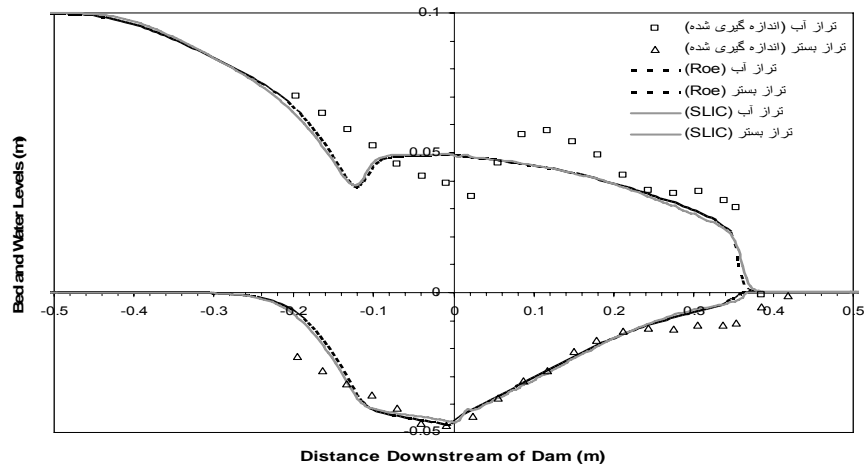
#### ۴. تجربیات عددی

برای صحت سنجی مدل عددی از داده ی آزمایشگاهی که توسط کپارت و یانگ در سال ۱۹۹۸ برای جریان ناشی از شکست سد بر بستر متحرک انجام شده است، استفاده می گردد، [۱]. این آزمایش در کانال منشوری و مستطیلی به طول ۱/۲ متر، عرض ۰/۲ متر و عمق ۰/۷ متر صورت گرفته است. در آزمایش یک لایه حدود ۵ تا ۶ سانتیمتری، از نوعی مروارید مصنوعی کروی شکل به قطر ۶/۱ میلیمتر، چگالی ۱۰۴۸ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت ته نشینی حدود ۷/۶ سانتیمتر بر ثانیه به عنوان ذرات رسوبی استفاده شده است. برای شبیه سازی شکست سد در آزمایش از باز کردن سریع یک دریچه کشویی در میانه کانال استفاده شده و عمق آب اولیه بالادست ۰/۱ متر بوده است. مدل عددی برای کانالی با مشخصات مدل آزمایشگاهی فوق آزموده می شود. در مدل عددی از ۲۴۰ سلول با طول ۰/۰۰۵ استفاده گردید و برای رفع مشکل بستر خشک، عمق اولیه ی ۰/۰۰۰۵ متر برای پایین دست سد در نظر گرفته شد. ضریب زبری مانینگ معادل ۰/۰۲۵ برای مدلسازی منظور شد، [۱].

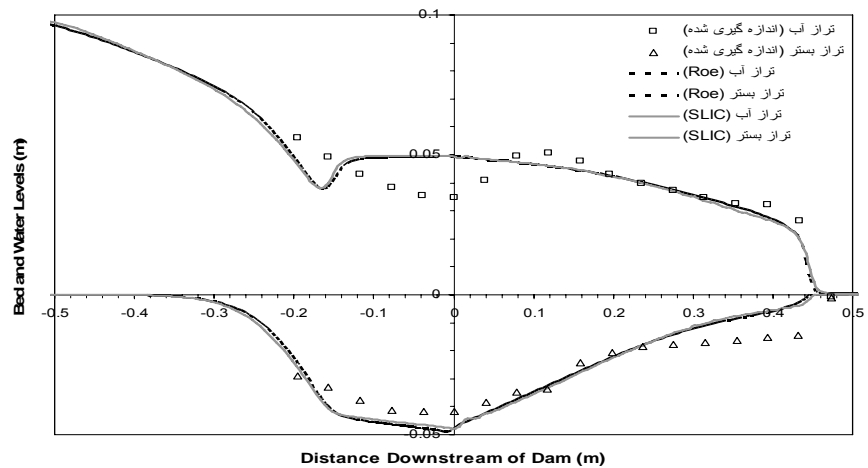
در شکل های ۲ تا ۴ پروفیل سطح آب و تراز بستر در روش های مختلف عددی و در زمان های مختلف آورده شده است. در همین شکل ها مقادیر اندازه گیری شده و همچنین نتیجه مدل عددی مربوط به حالت بستر ثابت نیز جهت مقایسه درج شده است. همان طور که ملاحظه می شود هماهنگی خوبی بین مقادیر شبیه سازی شده و آزمایشگاهی وجود دارد و حداکثرهای فرسایش و مکان های پیشانی موج بوسیله ی مدل عددی به خوبی پیش بینی گردید است. با توجه به این شکل ها شستگی و فرسایش قابل ملاحظه ای در بستر ایجاد می شود و بنابراین میزان تغییر شکل بستر در مقایسه با تغییرات جریان قابل چشم پوشی نمی باشد و بایستی در مدل کردن شکست سد اثر متقابل جریان و رسوب و مورفولوژی را در نظر گرفت. با توجه به این شکل ها می توان گفت که بین نتایج دو مدل عددی Roe و SLIC اختلاف معناداری دیده نمی شود. همچنین مشاهده می شود که در زمان ۰/۳۰ ثانیه مدل عددی پیشروی جبهه فرسایش بستر در بالاست را کمتر از نتایج آزمایشگاهی پیش بینی می کند ولی با گذشت زمان نتایج همخوانی بهتری با هم دارند؛ تاجایی که در زمان ۰/۵۰ ثانیه داده های بریکدیگر منطبقند. بطور مشابه می توان دید که مدل عددی جبهه فرسایش بستر در پایین دست را کمتر از داده های آزمایشگاهی برآورد می نماید؛ هر چند که با گذشت زمان این اختلاف بیشتر می شود.



شکل ۲- تراز آب و تراز بستر در زمان ۰/۳۰ ثانیه



شکل ۳- تراز آب و تراز بستر در زمان ۰/۴۰ ثانیه



شکل ۴- تراز آب و تراز بستر در زمان ۰/۵۰ ثانیه





با توجه به نتایج عددی می توان گفت که انتشار موجی که بر بستر متحرک به سمت مخزن حرکت می کند دارای همان سرعت موجی است که بر بستر ثابت ایجاد می شود؛ اما در بستر متحرک انتشار پیشانی موجی که به سمت پایین دست مخزن حرکت می کند، با سرعت کمتری صورت می گیرد. با این وجود در مراحل میانی به دلیل اختلاف دانسیته بین پیشانی موج با غلظت بالا و بدنه آبی پایین دست، پیشانی موج در بستر متحرک با سرعت بیشتری انتشار می یابد.

برای تعیین حساسیت نتایج مدل عددی به بزرگی ضریب زبری مانینگ، شبیه سازی برای مقادیر مختلف  $n$  انجام شد. تجربیات عددی نشان داد که با تغییر  $n$  سطوح شبیه سازی شده بستر و سطح آب به مقدار بسیار کمی تغییر می کنند و سرعت پیشروی پیشانی موج به مقدار کمی کندتر می گردد. بنابراین می توان گفت که نتایج مدل عددی به تغییرات زبری مانینگ چندان حساسیتی ندارد.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله برای شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد مدل های حجم محدود، یک بعدی و صریح Roe و SLIC استفاده شد. اثرات غلظت بالای رسوب و تغییرات بستر جریان، در معادلات پیوستگی و اندازه حرکت لحاظ گردید. در مدل انتقال رسوب، انتقال بار بستر و بار معلق در حالت غیرتعدالی در نظر گرفته شد. از رابطه اصلاحی ون راین برای تعیین ظرفیت انتقال بار بستر و بار معلق نزدیک بستر استفاده شد. برای صحت سنجی نتایج مدل سازی، از داده های آزمایشگاهی موجود استفاده گردید. نتایج دو روش مختلف عددی با یکدیگر اختلاف ناچیزی داشتند و همخوانی مناسبی با داده های آزمایشگاهی وجود داشت. نتایج عددی نشان داد که در بستر متحرک انتشار پیشانی موجی که به سمت پایین دست مخزن حرکت می کند، با سرعت کمتری صورت می گیرد. نتایج مدل سازی نشان داد که جریان ناشی از شکست سد بر بستر متحرک می تواند فرسایش چشم گیری بر بستر ایجاد کند به صورتی که نمی توان از اثرات این فرسایش بر جریان صرف نظر کرد. تجربیات عددی نشان دهنده تاثیر ناچیز اصطکاک بستر در مدل سازی بود.

## ۶. مراجع

1. Wu, W.; Wang, S.S.Y (2007). "One-Dimensional Modeling of Dam-Break Flow over Movable Beds." J. Hydraulic Eng., ASCE, 133(1), 48-58.
2. Leal, J.G.A.B.; Ferreira, R.M.L.; Cardoso, A.H. (2003). "1-D Model for Dam-Break Waves Over Mobile Beds." Advances in Hydro-Science and -Engineering, VI, 1-11.
3. Cao, Z.; Pender, G.; Wallis S.; Carling P. (2004). "Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed." J. Hydraulic Eng., ASCE, 130(7), 689-703.
4. Wu, W. (2008). Computational River Dynamics, Taylor & Francis, UK.
5. Van Rijn, L. C. (1984a). "Sediment transport. Part I: Bed load transport." J. Hydraul. Eng., 110(10), 1431-1456.
6. Van Rijn, L. C. (1984b). "Sediment transport. Part II: Suspended load transport." J. Hydraul. Eng., 110(11), 1613-1641.
7. Leveque, R.J. (2002). Finite Volume Methods For Hyperbolic Problems, Cambridge University press, New York.
8. Toro, E.F. (2001). Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows, John Wiley & Sons, Chichester, New York.