



شبیه‌سازی عددی پخشیدگی رسوب بستر با قابلیت مدل‌سازی سطوح خشک با استفاده از حل‌کننده ریمن تقویت‌شده

مینا برزگران¹، حسین مهدیزاده^{2*}، سلمان پوراسماعیل³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

2- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند.

3- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه جنتور، جنتور.

* hossein.mahdizadeh@birjand.ac.ir, 97175/615

چکیده

روش‌های عددی مختلفی برای حل سیستم‌های مورفودینامیک توسعه یافته است که در میان این روش‌ها، در سال‌های اخیر روش حجم محدود به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش یک روش حجم محدود کارآمد برای شبیه‌سازی انتقال رسوب بستر در نزدیکی سطوح خشک، ارائه می‌شود. معادلات حاکم بر انتقال رسوب در کانال‌ها و رودخانه‌ها شامل معادلات آب کم‌عمق و اکسیر می‌باشند. با در نظر گرفتن یک سرعت نوین برای امواج ریمن، معادلات آب کم‌عمق و اکسیر توسط روش جفت شده ضعیف بر اساس حل‌کننده ریمن تقویت‌شده، حل می‌شوند. در این روش ابتدا معادله اکسیر حل می‌گردد و سپس تغییرات بستر به‌روز شده با همان ساختار ریمن، به عنوان عبارت منبع در معادلات آب کم‌عمق استفاده می‌شود. حل‌کننده ریمن تقویت‌شده بر اساس تجزیه‌ای از بردار تقویت‌شده شامل عمق جریان، اندازه حرکت، شار اندازه حرکت و تراز بستر می‌باشد. مدل عددی ارائه‌شده ابتدا برای شبیه‌سازی شکست سد بر روی بستر متحرک به کار گرفته شد. سپس مسئله شکست سد ناشی از روگذری جریان در نظر گرفته شد و داده‌های محاسبه‌شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج عددی حاصل بیانگر آن است که روش جفت شده ضعیف که بر مبنای روش ریمن تقویت‌شده، توسعه یافته است، قابلیت مدل‌سازی انتقال رسوب در نزدیکی سطوح خشک با دقت بالا را دارا می‌باشد و در نمونه‌های آزمایشی تطابق بسیار خوبی با داده آزمایشگاهی دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 بهمن 1396

پذیرش: 23 اسفند 1396

ارائه در سایت: 24 فروردین 1397

کلید واژگان:

الگوریتم پخش موج گودنوف

حل‌کننده ریمن تقویت‌شده

انتقال رسوب کف

روش جفت شده ضعیف

Numerical simulation of bedload sediment transport with ability to model dry interfaces using an augmented Riemann solver

Mina Barzgaran¹, Hossein Mahdizadeh^{1*}, Salman Pouresmaeil²

1- Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2- Department of Civil Engineering, Bojnourd University, Bojnourd, Iran.

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, hossein.mahdizadeh@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 February 2018
Accepted 14 March 2018
Available Online 13 April 2018

Keywords:

Godunov-Type Wave Propagation Algorithm
Augmented Riemann Solver
Bedload Sediment Transport
Weakly Coupled Method

ABSTRACT

Various numerical methods have been developed for solving morphodynamic systems, among which the finite-volume method has been widely employed in recent years. This paper presents an efficient finite volume technique for simulation of bedload sediment transport near dry interfaces. The equations governing sediment transport in channels and rivers comprise the shallow water equations and Exner equation. By considering a novel velocity for Riemann waves, shallow water and Exner equations are solved using a weakly-coupled scheme based on an augmented Riemann solver. In this approach the morphodynamic equation is first solved and the updated bedload changes with the same Riemann structure are used as a source term within the shallow water equations. Augmented Riemann solver is based on a decomposition of an augmented vector—the depth, momentum as well as momentum flux and bottom surface. The proposed numerical model is first used for the simulation dam break flow over a mobile bed. Then, dam failure due to over-topping flow is considered and the computed results are compared with the experimental data. These numerical results indicate that the defined weakly coupled method developed based on an augmented Riemann technique is able to be used for modelling bedload sediment transport near dry interfaces with highly accurate and exhibits a very good agreement with the experimental data for test cases.

1- مقدمه

سواحل و بنادر می‌باشند. فرآیندهای فرسایش و یا انتقال رسوبات در رودخانه‌ها، همواره مشکلات زیادی را به وجود می‌آورند. به‌عنوان مثال رسوب‌گذاری در مخزن سد موجب کاهش حجم ذخیره مخزن و نهایتاً باعث

شبیه‌سازی دقیق رسوب کف، سطح آزاد آب و برخورد آن‌ها از مسائل بسیار مهم جهت پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی در بستر رودخانه‌ها و نزدیکی

کاهش عمر مفید مخزن می‌گردد[2,1].

روش‌های عددی که برای شبیه‌سازی مورفودینامیک جریان به‌کار می‌روند باید قادر به تقریب رسوب کف به همراه پیش‌بینی هیدروینامیک جریان سطح آزاد باشند. به‌طور کلی در این روش‌ها، جهت مدل‌سازی جریان سطح آزاد از معادلات آب کم‌عمق¹ و برای رسوب کف از معادله اکسندر² استفاده می‌گردد[4,3]. این دو مجموعه از معادلات معمولاً منجر به یک سیستم غیرخطی از معادلات هذلولی می‌گردد که می‌تواند با دو رویکرد جفت شده و غیر جفت شده حل گردد[5].

رویکرد جداسده³ زمانی که یک فرآیند فرسایش بستر با جریان با سرعت کم در زمان طولانی همراه باشند، پایدار هستند. روش جداسده در گام اولیه به حل جداگانه سیستم معادلات آب‌های کم‌عمق با ثابت در نظر گرفتن توپوگرافی می‌پردازد و سپس در گام دوم توپوگرافی با استفاده از معادله اکسندر به‌روزرسانی می‌گردد. به‌کارگیری این روش آسان است و سبب به حداقل رساندن هزینه‌های محاسباتی می‌شود. ضعف عمده این روش، بروز ناپایداری در هنگام استفاده از گام‌های زمانی مختلف برای هر معادله در شبیه‌سازی عددی است[6]. به‌علاوه این روش تنها قابل‌اعمال در مواردی است که تعامل بین رسوب و امواج آب، ضعیف یا متوسط است و تاکنون روشی در مورد تعامل قوی بین رسوب و سطوح موج ارائه نشده است. روش جفت شده⁴ کل سیستم مورفودینامیک را در فرمی از قوانین بقای جرم و اندازه حرکت حل می‌کند و سبب پایداری بیشتر این روش می‌گردد[7-10]. هرگونه تعاملات قوی که ممکن است در صورت تقابل شدید جریان سطح آزاد با رسوب رخ بدهد، به وسیله این روش تقریب زده می‌شود[11]. روش جفت شده به ایجاد یک ماتریس ژاکوبین تقریبی از کل سیستم نیاز دارد که محاسبه مقادیر و بردار ویژه‌های این ماتریس کار نسبتاً دشواری می‌باشد. روش جفت شده بر اساس فرم غیربقایی⁵ قوانین هذلولی توسعه‌یافته است و تاکنون هیچ راه‌حل بقایی⁶ برای این روش ارائه نشده است[4,3].

هادسون و همکاران [12] با استفاده از نسخه محدودکننده‌های شار روش رو⁷ در قالب روش حجم محدود به حل مسئله پرداختند. آن‌ها دقت دو روش جفت شده و جداسده را با پنج نوع مختلف از فرمول‌های حاکم بر روی مش‌های مستطیلی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که یکی از فرم‌های بقایی بر اساس رویکرد جفت شده از بقیه روش‌ها نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. مورلیو و همکاران [13] یک مدل جفت شده معادله اکسندر را برای جریان ناپایدار دوبعدی روی بسترهای فرسایشی با مش‌های بدون سازمان مثلثی و استفاده از فرمول تجربی گرس را مطالعه نمودند. لیو و همکاران [14] با کمک یک مدل جفت شده دو بعدی بر اساس روش مرکزی نوع گودونو به بررسی تغییرات فرسایش بستر تحت جریان متغیر سریع پرداختند. جوئر و همکاران [15] یک مدل جفت شده دوبعدی برای پیش‌بینی تغییرات مورفولوژی را ارائه نمودند.

به‌طور کلی از دو روش برای محاسبه سرعت انتشار امواج شکل‌گرفته در مسئله ریمن استفاده می‌گردد. در روش اول محاسبه سرعت انتشار امواج بر مبنای حل‌های تحلیلی صورت می‌پذیرد. روش مذکور در بسیاری از موارد بسیار دقیق بوده و قادر به مدل‌سازی جریان بر روی سطوح خشک یا نزدیک به خشک می‌باشد. مشکل عمده حل‌کننده‌های دقیق وقت‌گیر بودن آن و حل

معادلات غیرخطی به‌صورت هم‌زمان، در هر گام زمانی برای روش حجم محدود می‌باشد. در روش دوم، از حل‌کننده‌های تقریبی مانند رو، HLL، HLLC و HLLC برای محاسبه سرعت امواج ایستا و انبساطی استفاده می‌شود که همه آن‌ها بر اساس تئوری خطوط مشخصه هستند[16]. محققین بسیاری حل‌کننده‌های ریمن را مورد بررسی قرار داده‌اند. حل‌کننده ریمن HLL که توسط هارتن و همکاران [17] توسعه داده شده، به مجموعه‌ای تعلق دارد که در آن فقط دو دسته موج در ساختار موج ظاهر می‌شود. بنابراین حل‌کننده ریمن HLL در شبیه‌سازی‌های دقیق فقط برای حالت‌های یک‌بعدی قابل‌اجرا است. حل‌کننده ریمن HLLC که توسط تورو و همکاران [19,18] ارائه شد برای تکمیل نقص دسته موج‌های حل‌کننده ریمن HLL برای جریان دوبعدی مشکلات توسعه داده شد تا اشکالات ساده‌سازی این روش را مرتفع سازد. حل‌کننده ریمن HLLC به‌طور موفقیت‌آمیزی برای حل مسائل ریمن برای مدل‌سازی جریان کم‌عمق دوبعدی پذیرفته شده است که در مطالعات مختلف از جمله مطالعات فراکارولو و همکاران [20] و مهدیزاده و همکاران [22,21] مورد استفاده قرار گرفته است. لوک [23] یک روش حجم محدود گودونو را بر اساس الگوریتم پخش موج و سرعت‌های تقریبی ریمن ارائه داد. این الگوریتم سپس توسط مهدیزاده و همکاران [24] و مودی و همکاران [25] جهت شبیه‌سازی عددی جریان در لوله‌ها و مدل‌سازی سیلاب در شبکه فاضلاب استفاده گردید.

مزیت اصلی استفاده از حل‌کننده‌های تقریبی ریمن، سهولت و دقت بالای آن به‌خصوص برای مدل‌سازی جریان بر روی سطوح تر می‌باشد ولی این روش برخلاف حل تحلیلی ریمن، قادر به تخمین سرعت‌های انتشار امواج بر روی سطوح خشک نبوده و منجر به جواب‌های غیر فیزیکی می‌گردد. برزگران و همکاران [26] به مدل‌سازی رسوب کف با استفاده از روش جفت شده ضعیف بر اساس حل‌کننده ریمن تقویت‌شده پرداختند. در این مطالعه شبیه‌سازی عددی رسوب تنها با در نظر گرفتن نمونه‌های آزمایشی با شرایط بستر تر، بررسی گردید. تفاوت عمده پژوهش حاضر با مقاله [26] این است که در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی رسوب در نزدیکی سطوح خشک با کمک حل‌کننده ریمن تقویت‌شده با رویکرد جفت شده ضعیف با به‌کارگیری سرعت نوین صورت پذیرفته است.

در واقع هدف اصلی این مقاله، تقریب معادلات مورفودینامیک با استفاده از نوعی روش حجم محدود گودونو، به نام الگوریتم پخش موج گودونو⁸ بر اساس حل‌کننده ریمن تقویت‌شده با رویکرد جفت شده ضعیف⁹ در سطوح خشک می‌باشد. در شرایط بستر خشک، سرعت‌های تقریبی رو منجر به جواب‌های غیر فیزیکی در حل معادلات آب کم‌عمق می‌شوند. با انتخاب یک نوع سرعت جدید در روش موج شار می‌توان بر این نقص چیره شد. این سرعت موج، ترکیبی از سرعت‌های دقیق و تقریبی ریمن می‌باشد. برخلاف دیگر روش‌های جداسده که به عدد کورانت و نوع رژیم جریان وابسته‌اند و نیز در مدل‌سازی تعامل شدید بین آب و رسوب با شکست مواجه می‌شوند، روش جفت شده ضعیف که بر مبنای روش ریمن تقویت‌شده توسعه‌یافته است، با در نظر گرفتن سرعت جدید برای امواج ریمن، قادر به شبیه‌سازی دقیق انتقال رسوب در سطوح خشک می‌باشد، در صورتی که اغلب روش‌هایی که تاکنون برای مدل‌سازی انتقال رسوب ارائه شده‌اند، قادر به شبیه‌سازی حالات بستر خشک نمی‌باشند و در صورت کاهش عمق آب به نزدیک صفر، قابلیت مدل‌سازی رسوب بر روی سطوح خشک با استفاده از سرعت‌های تقریبی

¹ Shallow Water Equation

² Exner

³ Splitting

⁴ Coupled

⁵ Non-Conservative

⁶ Conservative Solution

⁷ ROE

⁸ Godunov-type Wave Propagation Algorithm

⁹ Weakly Coupled

فرمول تجربی انتقال رسوب به‌صورت زیر قابل‌ارائه می‌باشد:

$$q_b = K_0 K_1 u^3 \quad (9)$$

که در آن $K_0 = g^{1/2} n^3 / (G_s - 1) h^{1/2}$ می‌باشد. جدول 1 نمایشی از روش‌های تجربی مختلف در قالب عباراتی از پارامترهای K_1 و τ_{cr}^* ارائه می‌دهد که در این روابط d_{90} و d_{30} به ترتیب قطر دانه‌هایی هستند که 30 و 90 درصد دانه‌های نمونه از آن کوچک‌تر می‌باشند، S_0 شیب بستر و $C = h^{1/6} / n$ می‌باشند [11].

3- روش شبیه‌سازی

3-1- الگوریتم پخش موج

روش ارائه‌شده در این بخش نوعی از روش حجم محدود گودونو به نام الگوریتم پخش موج گودونو است که برای حل سیستم مورفودینامیک استفاده می‌گردد. این روش برای اولین بار توسط لوک بیان گردید که به‌صورت رابطه (10) ارائه می‌گردد [23]:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(A^+ \Delta U_{i-\frac{1}{2}} + A^- \Delta U_{i+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\tilde{F}_{i-\frac{1}{2}}^n - \tilde{F}_{i+\frac{1}{2}}^n \right) \quad (10)$$

در رابطه فوق، U_i^n تقریب متوسط بردار مجهولات در زمان Δt و Δx به ترتیب گام زمانی و گام مکانی، n سطح زمانی، $A^+ \Delta U_{i-\frac{1}{2}}$ و $A^- \Delta U_{i+\frac{1}{2}}$ به ترتیب نوسانات راست رونده و چپ رونده و $\tilde{F}_{i\pm\frac{1}{2}}^n$ شارهای اصلاحی مرتبه دوم موردنیاز برای رسیدن به حل با مرتبه بالا می‌باشند.

3-2- روش موج شار

لوک و همکاران [31] تجزیه‌ای به فرم رابطه (11) را ارائه نمودند:

$$\left[\frac{U_i - U_{i-1}}{F(U_i) - F(U_{i-1}))} \right] = \sum_{k=1}^{2m} \beta_{k,i-\frac{1}{2}} \left[\frac{r_{k,i-\frac{1}{2}}}{\eta_{k,i-\frac{1}{2}}} \right] \quad (11)$$

که در این رابطه $\eta_{k,i-\frac{1}{2}} = S_{k,i-\frac{1}{2}} r_{k,i-\frac{1}{2}}$ است. رابطه (11) به این معنا است که هر پرسی در شارها یا بردار مجهولات، می‌تواند به‌عنوان مجموعه‌ای از امواج ریمن یا امواج شار، از سطح مشترک $i - \frac{1}{2}$ منتشر شود و دسته کلی‌تری از حل‌کننده‌های ریمن را بر اساس الگوریتم پخش موج تعریف کند. توسط $A^\pm \Delta U_{i\pm\frac{1}{2}}$ حل مسئله ریمن در هر مرز سلولی، به دست می‌آیند و به‌صورت رابطه (12) محاسبه می‌شوند [32]:

$$A^- \Delta U_{i-\frac{1}{2}} = \sum_{k: S_{k,i-\frac{1}{2}} < 0} \xi_{k,i-\frac{1}{2}} \quad A^+ \Delta U_{i-\frac{1}{2}} = \sum_{k: S_{k,i-\frac{1}{2}} > 0} \xi_{k,i-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

در رابطه فوق $\xi_{k,i-\frac{1}{2}}$ موج شار¹ نامیده می‌شود که این امواج با سرعت $S_{k,i-\frac{1}{2}}$ منتشر می‌شوند و به‌صورت $\xi_{k,i-\frac{1}{2}} = \alpha_{k,i-\frac{1}{2}} \eta_{k,i-\frac{1}{2}}$ به دست

جدول 1 فرمول‌های رسوب در قالب K_1 و τ_{cr}^*

نام فرمول	K_1	τ_{cr}^*
مایر-پیتز [29]	$8(1 - \tau_{cr}^* / \tau_b^*)^{3/2}$	0.0470
اسمارت [30]	$4(d_{90}/d_{30})^{0.2} S^{0.6} C(1 - \tau_{cr}^* / \tau_b^*)$	0.0470
لارسون [4]	$12 \exp(-\tau_{cr}^* / \tau_b^*)$	0.0400

¹ Flux wave

ریمن را ندارند. روش جفت شده ضعیف، نوعی رویکرد جدادشده به همراه ویژگی‌های رویکرد جفت شده می‌باشد. بر اساس اطلاعات نویسندهگان تاکنون هیچ توسعه‌ای از حل‌کننده ریمن تقویت‌شده بر اساس روش جفت شده ضعیف، برای حل معادلات رسوب بستر در سطوح خشک ارائه نگردیده است.

2- معادلات حاکم

در حالت کلی معادلات حاکم برای تقریب معادلات رسوب شامل معادلات آب کم‌عمق و معادله انتقال رسوب به فرم روابط (1) و (2) می‌باشند [11]:

$$h_t + (hu)_x = 0 \\ (hu)_t + \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right)_x = 0 \\ B_t + \zeta q_b = 0 \quad (1)$$

که در آن:

$$\zeta = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (2)$$

در این روابط، B تراز ارتفاع بستر $q_b(m)$ دبی انتقال رسوب (m^2/s)، ε تخلخل مواد بستر، h میزان عمق آب (m)، u سرعت جریان در جهت x (m^2/s) و g شتاب گرانش (m/s^2) می‌باشند. تاکنون روابط تحلیلی بسیاری برای پیش‌بینی و تعیین دبی انتقال رسوب استخراج شده‌اند. یکی از ساده‌ترین روابط برای تعیین دبی انتقال رسوب رابطه گرس می‌باشد که در آن دبی انتقال رسوب به‌عنوان تابعی از سرعت جریان و پارامتر Ag به‌صورت رابطه (3) معرفی گردیده است [27]:

$$q_b = Ag u^3 \quad (3)$$

در رابطه فوق، پارامتر Ag بر اساس داده‌های تجربی تعیین می‌شود. برآورد نرخ رسوب انتقالی عموماً بر اساس تنش برشی کف τ_b (N/m^2) می‌باشد که در جریانات لایه‌ای رابطه تنش برشی کف به‌صورت رابطه (4) می‌باشد [28]:

$$\tau_b = \rho g h S_f \quad (4)$$

در رابطه فوق ρ چگالی آب (kg/m^3) و S_f عبارت اصطکاکی است که توسط رابطه مانینگ (5) قابل‌محاسبه است:

$$S_f = \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (5)$$

در این رابطه، n ضریب مانینگ می‌باشد. تنش برشی بستر معمولاً در فرم بی‌بعد استفاده می‌شود که با τ_b^* نشان داده می‌شود و پارامتر شیلدز نامیده می‌گردد. این پارامتر به‌صورت رابطه (6) تعریف می‌شود:

$$\tau_b^* = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho) g d_m} \quad (6)$$

در رابطه فوق، ρ_s چگالی رسوب (kg/m^3) و d_m قطر متوسط ذرات رسوب (mm) می‌باشند. نرخ انتقال رسوب توسط پارامتر بی‌بعد ψ که در رابطه (7) ارائه‌شده است، بیان می‌شود:

$$\psi = \frac{q_b}{\sqrt{(G_s - 1) g d_m^3}} \quad (7)$$

که در این رابطه G_s چگالی نسبی است که به‌صورت $G_s = \rho_s / \rho$ محاسبه می‌شود. با به‌کارگیری رابطه (4) و (5) در رابطه (6)، پارامتر شیلدز به‌عنوان تابعی از شیب اصطکاکی، $\tau_b^* = \tau_b^*(S_f)$ ، به‌صورت رابطه (8) بیان می‌گردد:

$$\theta = \frac{n^2 u^2}{(G_s - 1) d_m h^{1/3}} \quad (8)$$

با استفاده از روابط (3) و (6) و نیز در نظر گرفتن روابط (7) و (8)،

میانگین رو برای پارامتر سرعت بین دو سلول مجاور i و $i-1$ به صورت رابطه (20) محاسبه می‌شود:

$$\bar{u} = \frac{\sqrt{h_{i-1}}u_{i-1} + \sqrt{h_i}u_i}{\sqrt{h_{i-1}} + \sqrt{h_i}} \quad (20)$$

مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین رو که سرعت‌های رو نام دارند، طبق رابطه (21) قابل محاسبه می‌باشند:

$$\begin{aligned} S_{1,Roe} &= \bar{u}_{i-\frac{1}{2}} - \sqrt{g\bar{h}_{i-\frac{1}{2}}} \\ S_{2,Roe} &= \bar{u}_{i-\frac{1}{2}} + \sqrt{g\bar{h}_{i-\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (21)$$

در بسیاری از مسائل آب کم‌عمق و خصوصاً در حالت‌های خشک که تفاوت بسیاری بین سرعت سلول‌های مجاور در مسئله ریمین وجود دارد، به علت ایجاد اعماق منفی در نتایج، نمی‌توان سرعت تقریبی رو را مورد استفاده قرار داد. استفاده از سرعت‌های اینفلت در روش موج شار، سبب ایجاد جواب‌های غیرمنفی می‌شود. S_E نشان‌دهنده سرعت اینفلت می‌باشد که به صورت رابطه (22) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} S_E^1 &= \min(\lambda_{k,i-1}, \bar{\lambda}_k) \\ S_E^2 &= \max(\lambda_{k,i}, \bar{\lambda}_k) \end{aligned} \quad (22)$$

در رابطه فوق $\lambda_{k,i}$ k امین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین $W(q)$ و $\bar{\lambda}_k$ نشان‌دهنده k امین مقدار ویژه ماتریس رو می‌باشد.

زمانی که در مسائل آب کم‌عمق، امواج انبساطی قوی² در جواب ظاهر شوند، سرعت اینفلت جواب دقیقی را ارائه نخواهد داد. برای چیرگی بر مشکلات سرعت رو، می‌توان از سرعت دقیق ریمین در حالت‌های خشک استفاده نمود. محاسبه سرعت‌های دقیق ریمین در مقایسه با سرعت‌های ریمین تقریبی به لحاظ محاسباتی هزینه‌بر است. در حالت‌های خشک بایستی برای جلوگیری از منفی شدن عمق، از یک سرعت گوناگون استفاده شود که شامل هر دو مزیت سرعت‌های دقیق و تقریبی ریمین باشد. بنابراین برای غلبه بر تمامی این مشکلات، می‌توان از سرعت‌های تعمیم‌یافته اینفلت⁴ استفاده نمود که ترکیبی از سرعت‌های دقیق، تقریبی ریمین و مشخصه است:

$$\bar{S}_E^1 = \min(S_E^1, S_{EX1}), \quad \bar{S}_E^2 = \max(S_E^2, S_{EX2}) \quad (23)$$

3-3-3- حل‌کننده ریمین تقریبی تقویت‌شده

مسئله ریمین تقویت‌شده با داده اولیه و ناپیوستگی q در $x=0$ به صورت رابطه (24) می‌باشد:

$$\begin{aligned} q_t + A(q)q_x &= 0 \\ q(x, 0) &= \begin{cases} q_l, & x < 0 \\ q_r, & x > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

که در آن:

$$q_l = \begin{bmatrix} h_l \\ (hu)_l \\ \phi_l \\ b_l \end{bmatrix}, \quad q_r = \begin{bmatrix} h_r \\ (hu)_r \\ \phi_r \\ b_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

حل تقریبی مسئله ریمین (24) به کمک گسسته سازی امواج ریمین، به صورت رابطه (26) بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta(hu) \\ \Delta \phi \\ \Delta B \end{bmatrix} = \sum_{p=1}^4 \beta_p r_p = W_p \quad (26)$$

که در آن W_p نشان‌دهنده p امین موج ریمین موجود در هر مرز سلولی

می‌آیند. بنابراین دومین مؤلفه رابطه (11) را می‌توان به صورت یک رابطه مجزا بیان کرد، به طوری که:

$$F(U_i) - F(U_{i-1}) = \sum_{k=1}^m \xi_{k,i-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

رابطه (13)، روش موج شار نامیده می‌شود، زیرا در این روش امواج شار در داخل هر سطح مشترک سلول، به جای امواج ریمین وجود دارند. شارهای اصلاحی $\bar{F}_{i+\frac{1}{2}}^n$ بر اساس امواج شار به صورت رابطه (14) محاسبه می‌شوند:

$$\bar{F}_{i-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \left(I - \frac{\Delta t}{\Delta x} |S_k| \right) \xi_{k,i-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

که $\xi_{k,i-\frac{1}{2}}$ موج شار محدودشده است که با استفاده از محدودکننده‌های شار مختلف قابل محاسبه می‌باشد.

3-3- شبیه‌سازی انتقال رسوب با حل‌کننده ریمین تقویت‌شده بر اساس

رویکرد جفت شده ضعیف

3-3-1- سیستم معادلات آب کم‌عمق تقویت‌شده

حل‌کننده ریمین تقویت‌شده نخستین بار توسط جورج برای حل معادلات آب کم‌عمق معرفی گردید. مزیت حل‌کننده ریمین تقویت‌شده این است که این روش به طور هم‌زمان دارای ویژگی‌هایی مناسب از حل‌کننده ریمین رو، برای مقابله با امواج ایستا¹ ایجاد شده در راه‌حل و حل‌کننده HLLC برای جلوگیری از نوسانات غیر فیزیکی ایجاد شده در امواج انبساطی، بدون نقاط ضعف هر یک از این روش‌ها می‌باشد [33]. سیستم تقویت‌شده معادلات آب کم‌عمق، با حذف عبارت منبع و اضافه کردن آن به عنوان متغیر اضافی در کمیت‌های بقائی، به فرم رابطه (15) نوشته می‌شود [33]:

$$q_t + W(q)q_x = 0 \quad (15)$$

در رابطه فوق q بردار شامل کمیت‌های بقائی و $W(q)$ ماتریس ژاکوبین شارهای متناظر با این کمیت‌ها می‌باشد. بردار q به صورت رابطه (16) بیان می‌گردد:

$$q = (h, hu, \phi, B)^T \quad (16)$$

در رابطه فوق شامل کمیت‌های بقائی عمق (h)، اندازه حرکت (hu)، اندازه حرکت ($\phi = (hu^2 + \frac{1}{2}gh^2)$) و تراز بستر می‌باشد. ماتریس ژاکوبین شارهای متناظر با بردار q به صورت رابطه (17) است:

$$W(q) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ -u^2 + gh & 2u & 0 & gh \\ 0 & -u^2 + gh & 2u & 2ugh \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس $W(q)$ مطابق با روابط (18) می‌باشند:

$$\begin{aligned} \{r_1, \lambda_1\} &= \{(1, \lambda_1, (\lambda_1)^2, 0)^T, u - \sqrt{gh}\} \\ \{r_2, \lambda_2\} &= \{(0, 0, 1, 0)^T, 2u\} \\ \{r_3, \lambda_3\} &= \{(1, \lambda_3, (\lambda_3)^2, 0)^T, u + \sqrt{gh}\} \\ \{r_4, \lambda_4\} &= \left\{ \left(\frac{gh}{\lambda_1 \lambda_3}, 0, -gh, 1 \right)^T, 0 \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

3-3-2- انتخاب سرعت موج در روش موج شار

رو [34] برای نخستین بار روشی برای تعیین بردار مشخصه در معادلات اولر ارائه نمود. در معادلات آب کم‌عمق، عمق سیال میانگین رو، توسط میانگین‌گیری حسابی برای مقادیر مجاور h_{i-1} و h_i محاسبه می‌شود:

$$\bar{h} = \frac{1}{2} (h_{i-1} + h_i) \quad (19)$$

² Einfeldt Speed

³ Strong Rarfaction waves

⁴ Generalized Einfeldt Speeds

¹ Shock waves

4- صحت‌سنجی

به‌منظور اعتبار‌سنجی حل‌کننده عددی ارائه‌شده، دو نمونه آزمایشی مورد‌مطالعه قرار گرفته است. در نمونه اول روش عددی برای مسئله شکست سد یک‌بعدی بر روی بستر متحرک استفاده می‌شود. در نمونه دوم مسئله فرسایش و شکست سد به علت روگذری جریان مدل‌سازی می‌گردد. شبیه‌سازی عددی در این پژوهش با استفاده از کد نویسی در فورترن بر روی پردازنده 7 هسته‌ای اینتل با حافظه داخلی 8 گیگابایت حل شده است.

4-1- شکست سد یک‌بعدی بر روی بستر متحرک با پلکان منفی

نتایج دقیق این نمونه برگرفته از آزمایشات بر روی فلوم طراحی‌شده توسط اسپاین واین و همکاران [35] می‌باشد. طول فلوم 6 و عرض آن برابر 25 متر فرض می‌گردد. درپچه قرار گرفته شده در وسط فلوم شکست سد را شبیه‌سازی می‌کند. مصالح بستر از شن درشت‌دانه با خصوصیات قطر متوسط 1.82، چگالی 2683 kg/m³، تخلخل 0.47 و ضریب زبری مانینگ 0.0165 تشکیل شده است. جدول 2 نشان‌دهنده شرایط اولیه نمونه آزمایشی است که در این آزمایش به کار گرفته شده است.

این نمونه آزمایشی به‌منظور ارزیابی درستی عملکرد روش عددی در ترکیب با دو فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت اعمال می‌شود که قادر به شبیه‌سازی دقیق امواج ایستا و انبساطی موجود در راه‌حل می‌باشد. نتایج عددی با در نظر گرفتن $\Delta x=0.015$ و $CFL=0.95$ به دست آمده است. شکل‌های 1 و 2 نتایج داده‌های عددی و آزمایشگاهی برای پروفیل رسوب کف و سطح آزاد جریان در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد که در آن نتایج آزمایشگاهی با روش ژاکوبین جفت شده (CJM) ارائه شده در [13] و روش جفت شده ضعیف ریمن تقویت‌شده (WCAR) مقایسه می‌گردد.

با گذشت زمان، روند تغییرات پروفیل بستر منجر به موج انبساطی در حال حرکت به سمت بالادست و نیز موج ایستا در پائین دست به همراه یک ناحیه میانی با تراز ثابت می‌شود. همان‌طور که در شکل 1 قابل مشاهده است، میزان مواد فرسایش‌یافته در شبیه‌سازی توسط مدل جفت شده ضعیف ریمن تقویت‌شده بر اساس رابطه انتقال رسوب اسمارت، بسیار نزدیک به مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد و این مدل عددی قادر به شبیه‌سازی دقیق امواج ایستا و انبساطی می‌باشد.

با افزایش زمان موج انبساطی چپ رونده به همراه پرش هیدرولیکی و نیز موج ایستای راست رونده در تراز سطح آب، در شکل 2 نمایان می‌شوند. امواج ایستا و انبساطی موجود در راه‌حل به‌خوبی توسط روش عددی موردنظر مدل‌سازی می‌گردد و تراز سطح آب محاسباتی توسط رابطه اسمارت به‌طور صحیح و یکنواخت توسعه یافته و با مقادیر آزمایشگاهی تطابق دارد. اختلافات جزئی مشاهده شده در موج ایستا مدل‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی، مربوط به تغییرات انرژی گذرای مرتبط با وجود پرش هیدرولیکی و نیز تغییرات چگالی مرتبط با غلظت رسوبات می‌باشد.

4-2- فرسایش و شکست سد ناشی از سرریز شدن یکنواخت جریان

مسئله فرسایش سد ناشی از روگذری جریان، توسط تینگسانچلی و همکاران [36] مطالعه شده است. ارتفاع و عرض تاج سد به ترتیب در مقادیر 0.8 و

است و r_p تقریبات محلی بردار ویژه‌های ماتریس $A(q)$ می‌باشند که به‌صورت روابط (27) بیان می‌شوند:

$$r_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ s_\varepsilon^1 \\ 0 \end{bmatrix}, r_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$r_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ s_\varepsilon^3 \\ 0 \end{bmatrix}, r_4 = \begin{bmatrix} \frac{S^+(q_l, q_r)}{-\lambda_1 \lambda_3(q_l, q_r)} \\ 0 \\ \frac{S^-(q_l, q_r)}{1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

میانگین‌های $S^+(q_l, q_r)$ و $\lambda_1 \lambda_3(q_l, q_r)$ طبق فرمول (28) قابل محاسبه می‌باشند:

$$S^+(q_l, q_r) = -\frac{g}{2}(h_l + h_r) \frac{\lambda_1 \lambda_3(q_l, q_r)}{\lambda_1 \lambda_3(q_l, q_r)}$$

$$\lambda_1 \lambda_3(q_l, q_r) = -(u_l u_r + g(\frac{h_l + h_r}{2}))$$

$$\lambda_1 \lambda_3(q_l, q_r) = -(\frac{u_l + u_r}{2})^2 + g(\frac{h_l + h_r}{2}) \quad (28)$$

امواج ریمن با سرعت‌های ارائه‌شده طبق روابط (29) منتشر می‌شوند:

$$s^1 = s_\varepsilon^1, \quad s^2 = \frac{1}{2}(s_\varepsilon^1 + s_\varepsilon^2)$$

$$s^3 = s_\varepsilon^3, \quad s^4 = 0 \quad (29)$$

با کم کردن بردار ویژه چهارم رابطه (27) از بردار کمیت‌های رابطه (26)، مسئله ریمن به یک سیستم سه معادله‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین گسسته سازی امواج ریمن توسط حل یک سیستم خطی برای محاسبه ضرایب β_1 ، β_2 و β_3 به‌صورت رابطه (30) ارائه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta(hu) \\ \Delta \phi \end{bmatrix} = \beta_1 \begin{bmatrix} 1 \\ s^1 \\ (s^1)^2 \end{bmatrix} + \beta_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \beta_3 \begin{bmatrix} 1 \\ s^3 \\ (s^3)^2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

4-3-3- تقریب عددی رابطه اکسرن

برای پیش‌بینی روند حرکت پروفیل بستر توسط رویکرد جفت شده ضعیف، روابط آب کم‌عمق و معادله اکسرن به‌طور مجزا حل می‌گردد. بدین منظور رابطه اکسرن برای یک گام زمانی خاص حل می‌شود و پروفیل بستر به‌دست‌آمده به عنوان عبارت منبع ثابت در معادلات آب کم‌عمق جایگزین می‌گردد. سپس معادلات آب کم‌عمق با حل‌کننده ریمن تقویت‌شده بر اساس روش موج شار حل می‌شوند. در این پژوهش برای نخستین بار به‌منظور تقریب معادله انتقال رسوب، از روش شار موج استفاده می‌شود. بنابراین رابطه (11) به شکل رابطه (31) برای فرمول انتقال رسوب بازنویسی می‌شود:

$$\begin{bmatrix} B_i - B_{i-1} \\ q_{bi} - q_{b(i-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{i-\frac{1}{2}} \\ \xi_{i-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

در رابطه فوق q_{bi} و $q_{b(i-1)}$ میزان دبی انتقال رسوب محاسبه‌شده توسط روابط نوع گرس و B_i و B_{i-1} به ترتیب تراز بستر در سلول‌های i و $i-1$ می‌باشند. برای تقریب امواج شار در هر سطح مشترک سلول محاسباتی حجم محدود، تنها به مقادیر q_b سلول‌های مجاور، نیاز است. بنابراین موج شار برای فرمول انتقال رسوب توسط رابطه (32) به دست می‌آید:

$$F(U_i) - F(U_{i-1}) = v(q_{bi} - q_{b(i-1)}) = \xi_{i-\frac{1}{2}} \quad (32)$$

طبق روش موج شار، میزان $\xi_{k,i-\frac{1}{2}}$ به‌سادگی تعیین و سپس تغییرات به‌روز شده بستر برای گام زمانی بعد توسط رابطه (33) محاسبه می‌گردد:

$$B_i^{n+1} = B_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(A^+ \Delta U_{i-\frac{1}{2}} + A^- \Delta U_{i+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\bar{F}_{i-\frac{1}{2}}^n - \bar{F}_{i+\frac{1}{2}}^n \right) \quad (33)$$

جدول 2 شرایط اولیه نمونه آزمایشی

Table 2 Initial conditions for test case

B_r	B_l	h_r	h_l
0.00	0.10	0.10	0.25

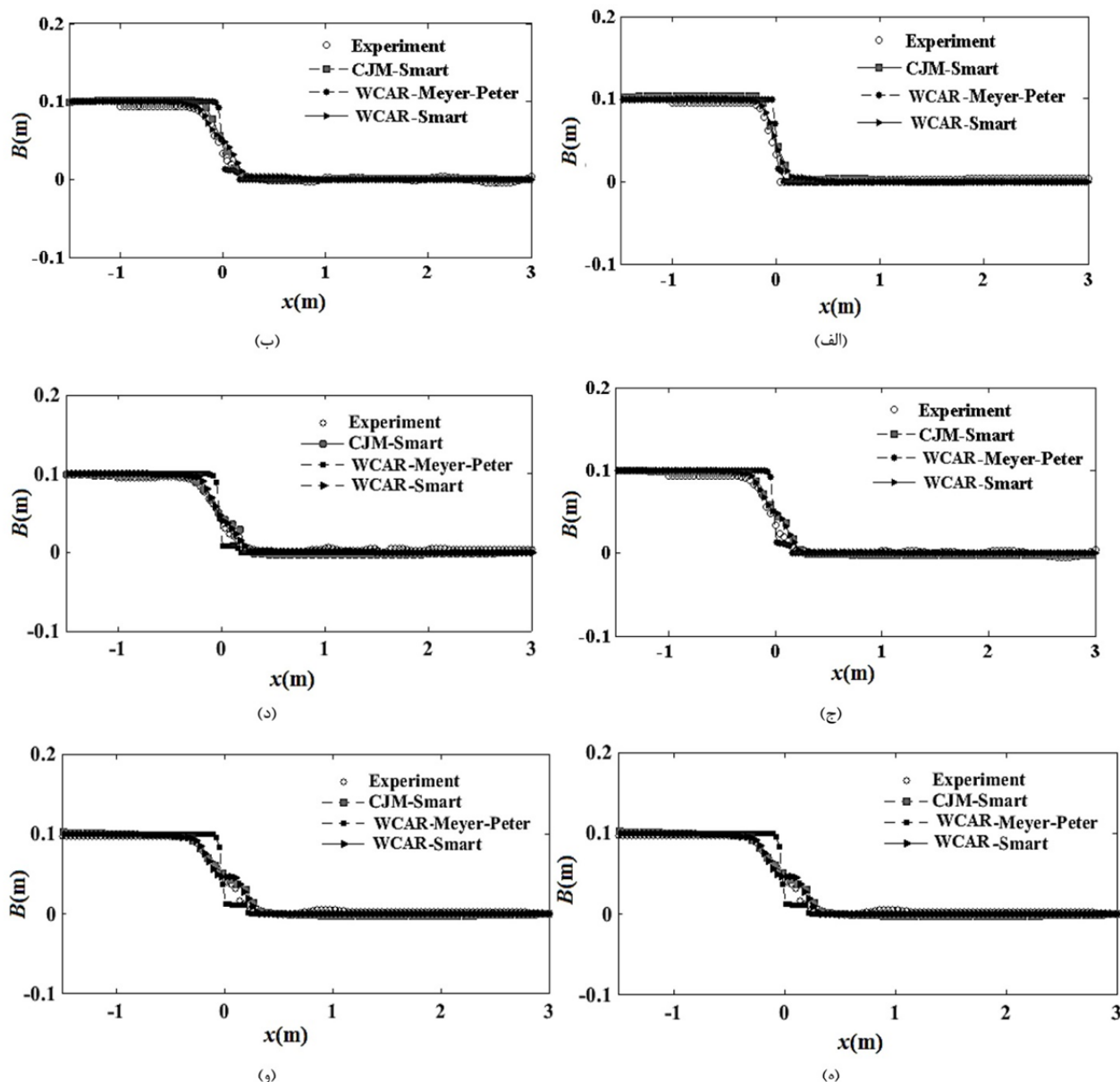


Fig. 1 Comparisons between the experimental data and sediment bedload results computed by CJM and WCAR approach with Meyer-Peter and Smart sediment discharge formula at times (a) $t=0.25s$, (b) $t=0.5s$, (c) $t=0.75s$, (d) $t=1s$, (e) $t=1.25s$ and (f) $t=1.5s$

شکل 1 مقایسه بین داده آزمایشگاهی با نتایج پروفیل بستر محاسبه‌شده با روش WCAR و CJM با فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت در زمان‌های (الف) $t=0.25s$ ، (ب) $t=0.5s$ ، (ج) $t=0.75s$ ، (د) $t=1s$ ، (ه) $t=1.25s$ و (و) $t=1.5s$

از روگذری جریان، از دو فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت استفاده شده است. استفاده از فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر در این نمونه آزمایشی مناسب نمی‌باشد زیرا نرخ فرسایش محاسباتی کمتر از فرسایش آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌گردد که این امر ناشی از عدم وجود پارامتر مربوط به اثر شیب در معادله مایر-پیتر می‌باشد. نتایج به دست آمده از شکل‌های 3 و 4، نشان دهنده تطبیق رضایت‌بخش مقادیر تراز بستر آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه‌شده با استفاده از رابطه اسمارت، می‌باشد که اطلاعات مفید و دقیقی در مورد این پدیده ارائه می‌کند.

به طور مشابه این نمونه آزمایشی توسط لیو و همکاران [37] با روش جداسده و استفاده از فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر بررسی شده است که شکل‌های 5 و 6 نتایج این مطالعه را نشان می‌دهد.

0.3 متر ثابت شده است. شیب بالادست در 1:3 و شیب پایین‌دست در 1:2.5 تنظیم شده است. سد متشکل از ماسه با $d_{50}=0.86$ ، $d_{30}=0.52$ ، $d_m=1.13$ با $d_{90}=3.8$ و دبی ورودی به مخزن برابر با 1.23 l s^{-1} منظور گردیده است. دامنه محاسباتی به 0.05 متر گسسته سازی می‌شود. شکل‌های 3 و 4 به ترتیب نشان‌دهنده توسعه تراز بستر به وسیله فرمول‌های انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت در زمان‌های 30 و 60 ثانیه می‌باشد.

به علت وجود جریان سریع، در تاج سد فرسایش شدیدی مشاهده می‌شود که ناشی از واکنش قوی میان جریان آب و مصالح سد می‌باشد. مصالح خاکریز با گذشت زمان به سرعت توسط جریان در پائین‌دست سد انباشته می‌گردند.

در این نمونه آزمایشی به منظور تعیین روند تغییرات فرسایش سد ناشی

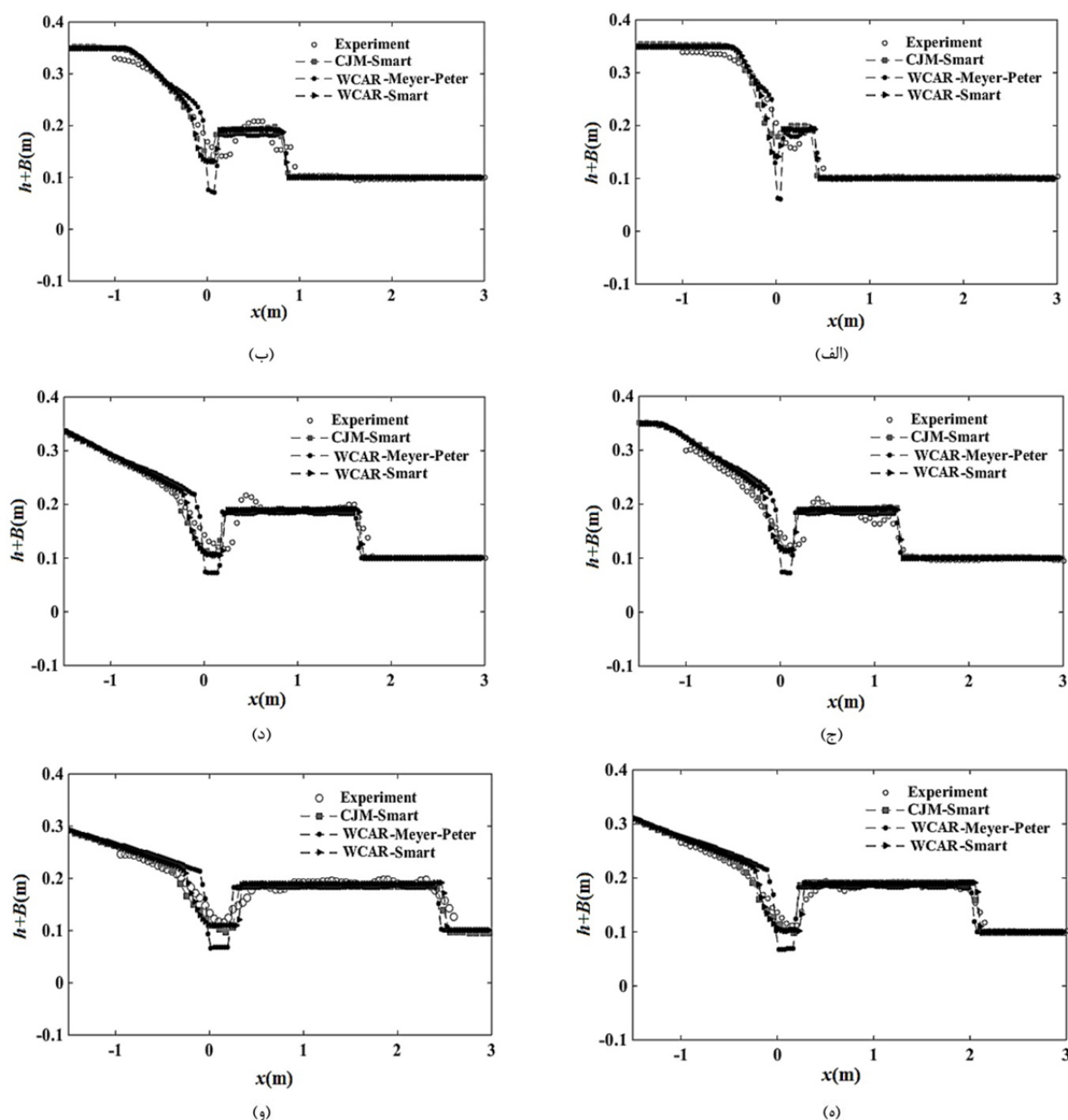


Fig. 2 Comparisons between the experimental data and free-surface results computed by CJM and WCAR approach with Meyer-Peter and Smart sediment discharge formula at times (a) $t=0.25s$, (b) $t=0.5s$, (c) $t=0.75s$, (d) $t=1s$, (e) $t=1.25s$ and (f) $t=1.5s$

شکل 2 مقایسه بین داده آزمایشگاهی با نتایج سطح آزاد جریان محاسبه‌شده با روش WCAR و CJM با فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت در زمان‌های (الف) $t=0.25s$ (ب) $t=0.5s$ (ج) $t=0.75s$ (د) $t=1s$ (ه) $t=1.25s$ و (و) $t=1.5s$

حل‌کننده ریمن تقویت‌شده با نتایج دو نمونه آزمایشی مقایسه گردید. در نمونه آزمایشی اول، شبیه‌سازی مسئله شکست سد یک‌بعدی بر روی بستر متحرک با استفاده از دو فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت صورت گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از تطابق بسیار خوب رویکرد موردنظر با نتایج آزمایشگاهی در طی افزایش زمان می‌باشد. این روش قادر به شبیه‌سازی دقیقی از انواع امواج پدید آمده در حالت شکست سد بر روی بستر می‌باشد. در نمونه آزمایشی دوم، مسئله شکست سد ناشی از سرریز شدن یکنواخت جریان بررسی گردید. نتایج به دست آمده حاکی از مدل‌سازی با دقت بالا در واکنش شدید بین جریان و رسوب می‌باشد که با گذشت زمان مصالح سد در پائین‌دست توسط جریان آب انباشته می‌شوند. می‌توان مشاهده نمود که در هر دو مسئله، مدل عددی ارائه‌شده با به‌کارگیری فرمول انتقال

طبق نتایج به دست آمده از شکل‌های 5 و 6، مشاهده می‌شود که روش جداشده سنتی در شبیه‌سازی واکنش شدید بین آب و رسوب با شکست مواجه شده و قادر به پیش‌بینی تغییرات رسوب نمی‌باشد و درحالی‌که روش عددی ارائه شده در این مقاله به خوبی قادر به مدل‌سازی انواع واکنش‌ها بین جریان آب و رسوب و تغییرات شدید مورفودینامیک بدون ایجاد نمودن نوسانات و ناپایداری‌های عددی می‌باشد. همچنین نتایج عددی حاصل از این روش تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پیش‌بینی تغییرات بستر بر اساس شبیه‌سازی عددی با کمک حل‌کننده ریمن تقویت‌شده صورت گرفته است. نتایج عددی به دست آمده از

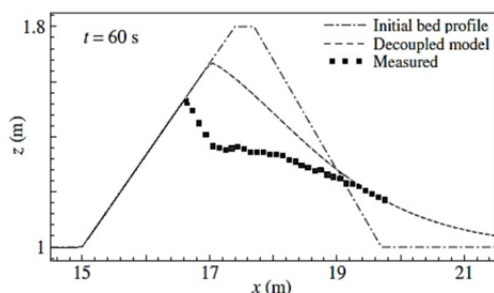


Fig.6 Comparisons between the measured data and the bed profile results computed by the Decoupled model [37] with Meyer-Peter sediment discharge formula at $t=60s$ for dam failure due to overtopping flow

شکل 6 مقایسه بین داده اندازه‌گیری شده و نتایج پروفیل بستر به دست آمده توسط روش جداشده [37] با فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر در $t=60s$ برای مسئله شکست سد ناشی از روگذری جریان

مطابقت بسیار خوبی دارند. رویکرد عددی ارائه‌شده در این پژوهش، قادر به پیش‌بینی دقیق تغییرات بستر در شرایط مختلف جریان و شبیه‌سازی انتقال رسوب در سطوح تر/خشک می‌باشد. در این پژوهش برای اولین بار به‌منظور مدل‌سازی رسوب از حل‌کننده ریمن تقویت‌شده با کاربرد فرمول موج شار در حل مسائل ریمن استفاده شده است. طبق نتایج حاصله روش ارائه شده یک روش قوی و کارآمد برای تقریب انتقال رسوب بستر می‌باشد.

6- فهرست علائم

A_g	ثابت ابعادی گرس (s^2m^{-1})
B	تراز ارتفاع بستر (m)
d_m	قطر متوسط ذرات رسوب (mm)
$\bar{F}$	عبارت اصلاحی مرتبه دوم
g	شتاب گرانش (m^2s^{-1})
G_s	چگالی نسبی
h	عمق آب (m)
n	ضریب زبری مانینگ
q	بردار شامل کمیت‌های بقائی
q_b	دبی انتقال رسوب (m^2s^{-1})
r_p	امین بردار ویژه
s	سرعت موج
S_f	ضریب اصطکاک بستر
t	زمان (s)
U	تقریب متوسط بردار مجهولات
u	مؤلفه سرعت در جهت محور x (ms^{-1})
W	موج ریمن

علائم یونانی

α	ضریب موج
γ	وزن مخصوص آب (Nm^{-3})
γ_s	وزن مخصوص رسوب (Nm^{-3})
ε	تخلخل لایه رسوب
λ_p	امین مقدار ویژه
ξ	موج شار
ρ	چگالی آب (kgm^{-3})

رسوب اسمارت قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر پروفیل بستر تحت یک جریان متغیر سریع می‌باشد. رابطه اسمارت با در نظر گرفتن پارامتر شیب بستر در محاسبه دبی انتقال رسوب، نتایج نزدیک‌تری به داده‌های آزمایشگاهی دارد. به‌طور کلی نتایج عددی به‌دست‌آمده از نمونه‌های آزمایشی نشان می‌دهد که روش عددی ارائه‌شده در این پژوهش قادر به شبیه‌سازی تغییرات شدید مورفودینامیک بدون نوسان عددی می‌باشد و با داده‌های آزمایشگاهی

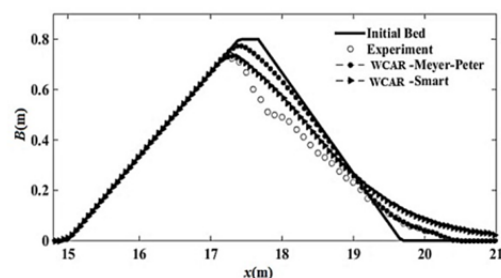


Fig.3 Comparisons between the measured data and the bed profile results computed by the WCAR approach with Meyer-Peter and Smart sediment discharge formula at $t=30s$ for dam failure due to overtopping flow

شکل 3 مقایسه بین داده اندازه‌گیری شده و نتایج پروفیل بستر به دست آمده توسط روش WCAR با فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت در $t=30s$ برای مسئله شکست سد ناشی از روگذری جریان

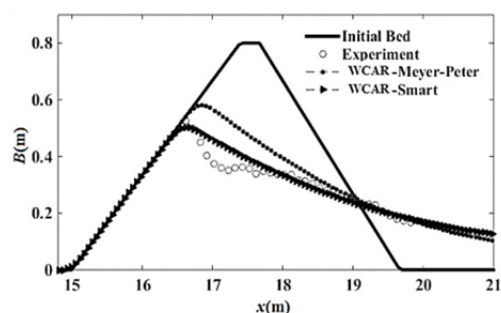


Fig.4 Comparisons between the measured data and the bed profile results computed by the WCAR approach with Meyer-Peter and Smart sediment discharge formula at $t=60s$ for dam failure due to overtopping flow

شکل 4 مقایسه بین داده اندازه‌گیری شده و نتایج پروفیل بستر به دست آمده توسط روش WCAR با فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر و اسمارت در $t=60s$ برای مسئله شکست سد ناشی از روگذری جریان

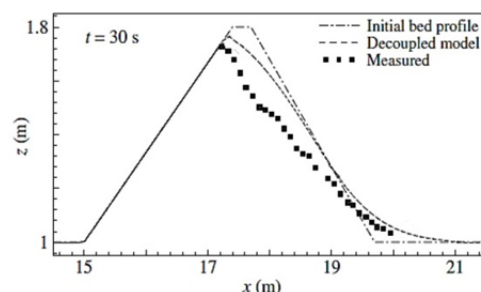


Fig.5 Comparisons between the measured data and the bed profile results computed by the Decoupled model [37] with Meyer-Peter sediment discharge formula at $t=30s$ for dam failure due to overtopping flow

شکل 5 مقایسه بین داده اندازه‌گیری شده و نتایج پروفیل بستر به دست آمده توسط روش جداشده [37] با فرمول انتقال رسوب مایر-پیتر در $t=30s$ برای مسئله شکست سد ناشی از روگذری جریان

- central-upwind scheme for a fully coupled shallow water system modeling flows over erodible bed, *Journal of Computational Physics*, Vol. 300, pp. 202-218, 2015.
- [15] C. Juez, J. Murillo, P. García-Navarro, A 2D weakly-coupled and efficient numerical model for transient shallow flow and movable bed, *Advances in Water Resources*, Vol. 71, pp. 93-109, 2014.
- [16] A. Zia, M. A. Banihashemi, Simple efficient algorithm (SEA) for shallow flows with shock wave on dry and irregular beds, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 56, No. 11, pp. 2021-2043, 2008.
- [17] A. Harten, P. D. Lax, B. van Leer, *On Upstream Differencing and Godunov-Type Schemes for Hyperbolic Conservation Laws*, pp. 53-79, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [18] E. F. Toro, *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, pp. 107-125, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [19] E. F. Toro, *Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows*, pp. 157-209, Michigan, John Wiley, 2001.
- [20] L. Fraccarollo, E. F. Toro, Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 6, pp. 843-864, 1995.
- [21] H. Mahdizadeh, H. Cheharbidi, S. Moodi, Numerical modelling of flood waves propagation in sewer networks using one- and two-dimensional modified HLLC method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 273-282, 2017. (in Persian)
- [22] H. Mahdizadeh, P. K. Stansby, B. D. Rogers, On the approximation of local efflux/influx bed discharge in the shallow water equations based on a wave propagation algorithm, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 66, No. 10, pp. 1295-1314, 2011.
- [23] R. J. LeVeque, balancing source terms and flux gradients in high-resolution godunov methods: the quasi-steady wave-propagation algorithm, *Journal of Computational Physics*, Vol. 146, No. 1, pp. 346-365, 1998.
- [24] H. Mahdizadeh, S. Sharifi, P. Omidvar, On the approximation of 2D transient pipe flow using a modified wave propagation algorithm, *Journal of Fluids Engineering*, 2018.
- [25] S. Moodi, H. Mahdizadeh, M. A. Moghaddam, Numerical modelling of water entrance into a wet tank using a modified wave propagation algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 168-176, 2017. (in Persian)
- [26] M. Barzgaran, H. Mahdizadeh, S. Pouresmaeil, A weakly coupled scheme for modelling bedload sediment transport using an augmented Riemann solver, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 409-416, 2017. (in Persian)
- [27] A. J. Grass, *Sediment Transport by Waves and Currents*, London, pp. 10,977-10,986, 1981.
- [28] C. Juez, J. Murillo, P. García-Navarro, Numerical assessment of bed-load discharge formulations for transient flow in 1D and 2D situations, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 15, No. 4, pp. 1234-1257, 2013.
- [29] E. Meyer-Peter, R. Mueller, *Formulas for Bed-Load Transport*, Sweden, pp. 39-64, 1948.
- [30] G. M. Smart, Sediment transport formula for steep channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, No. 3, pp. 267-276, 1984.
- [31] R. J. LeVeque, M. Pelanti, A class of approximate Riemann solvers and their relation to relaxation schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 172, No. 2, pp. 572-591, 2001.
- [32] R. J. LeVeque, *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, pp. 333-335, Cambridge, Cambridge University Press, 2002.
- [33] D. L. George, Augmented Riemann solvers for the shallow water equations over variable topography with steady states and inundation, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 6, pp. 3089-3113, 2008.
- [34] P. L. Roe, Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, No. 2, pp. 357-372, 1981.
- [35] B. Spinewine, Y. Zech, Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. sup1, pp. 73-86, 2007.
- [36] T. Tingsanchali, C. Chinnarasri, Numerical modelling of dam failure due to flow overtopping, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 46, No. 1, pp. 113-130, 2001.
- [37] X. Liu, B. J. Landry, M. H. García, Two-dimensional scour simulations based on coupled model of shallow water equations and sediment transport on unstructured meshes, *Coastal Engineering*, Vol. 55, No. 10, pp. 800-810, 2008.

ρ_s	چگالی رسوب (kgm^{-3})
τ_b	تنش برشی لایه رسوب (Nm^{-2})
τ_b^*	عدد شیلدز
τ_{cr}^*	تنش برشی بحرانی
φ	شار اندازه حرکت (m^3s^{-2})
ψ	دبی انتقال رسوب بی‌بعد
Δt	گام زمانی (s)
Δx	اندازه گره‌ها (m)

بالانویس‌ها

n سطح زمانی

زیرنویس‌ها

i شماره سلول محاسباتی

ε نماد سرعت‌های اینفلت

7- مراجع

- [1] J. Hudson, *Numerical Techniques for Morphodynamic Modelling*, Thesis, PhD Thesis, Department of Mathematics, University of Reading, Reading, 2001.
- [2] D. H. Zhao, H. W. Shen, G. Q. Tabios, J. S. Lai, W. Y. Tan, Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 7, pp. 863-883, 1994.
- [3] D. S. Bale, R. J. LeVeque, S. Mitran, J. A. Rossmanith, A wave propagation method for conservation laws and balance laws with spatially varying flux functions, *Journal on Scientific Computing*, Vol. 24, No. 3, pp. 955-978, 2003.
- [4] B. Camenen, M. Larson, A general formula for non-cohesive bed load sediment transport, *Journal of Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 63, No. 1-2, pp. 249-260, 2005.
- [5] Z. Cao, R. Day, S. Egashira, Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 306-321, 2002.
- [6] S. Saiedi, Coupled modeling of alluvial flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, pp. 440-446, 1997.
- [7] M. J. Castro Diaz, E. D. Fernández-Nieto, A. M. Ferreira, Sediment transport models in Shallow Water equations and numerical approach by high order finite volume methods, *Journal of Computers & Fluids*, Vol. 37, No. 3, pp. 299-316, 2008.
- [8] J. Hudson, P. K. Sweby, A high-resolution scheme for the equations governing 2D bed-load sediment transport, *Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 47, No. 10-11, pp. 1085-1091, 2005.
- [9] F. Benkhaldoun, M. Seaid, Combined characteristics and finite volume methods for sediment transport and bed morphology in surface water flows, *Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 81, No. 10, pp. 2073-2086, 2011.
- [10] A. Canestrelli, M. Dumbser, A. Siviglia, E. F. Toro, Well-balanced high-order centered schemes on unstructured meshes for shallow water equations with fixed and mobile bed, *Journal of Advances in Water Resources*, Vol. 33, No. 3, pp. 291-303, 2010.
- [11] S. Cordier, M. H. Le, T. Morales de Luna, Bedload transport in shallow water models: Why splitting (may) fail, how hyperbolicity (can) help, *Journal of Advances in Water Resources*, Vol. 34, No. 8, pp. 980-989, 2011.
- [12] J. Hudson, P. K. Sweby, Formulations for numerically approximating hyperbolic systems governing sediment transport, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 19, No. 1, pp. 225-252, 2003.
- [13] J. Murillo, P. García-Navarro, An Exner-based coupled model for two-dimensional transient flow over erodible bed, *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, No. 23, pp. 8704-8732, 2010.
- [14] X. Liu, A. Mohammadian, A. Kurganov, J. A. I. Sedano, Well-balanced