

## مقدمه

سیلاب واریزه‌ای به نوعی از سیلاب گفته می‌شود که غلظت حج می‌رسوب در آن به بالای ۵ درصد برسد (بنی‌حبیب، [۳]). سیلاب‌های واریزه‌ای به طور معمول در مناطق کوهستانی رخ می‌دهند جایی که رسوبات ناپایدار کافی بر روی شیب‌های تند برای وقوع این نوع سیلاب‌ها موجود باشد. این سیلاب‌ها ابتدا در دامنه‌های تند، با سقوط یا لغزش خاک اشباع (خاکی که روان است) آغاز شده و گاهی تا ۳۵ مایل بر ساعت یا بیشتر سرعت می‌گیرد (اداره تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا، [۲۰]). از جمله سیلاب‌های واریزه‌ای در ایران می‌توان به سیل تجریش در سال ۱۳۶۶، سیل بندر گز در سال ۱۳۷۵، سیل ماسوله در سال ۱۳۷۷، و سیلاب‌های سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ در گلستان اشاره نمود (بنی‌حبیب، [۴]). با توجه به امکان وقوع این نوع سیلاب‌ها در کشور و خسارات بالای آن‌ها، باید با اتخاذ تدابیری خسارت ناشی از اینگونه سیلاب‌ها را کاهش داد.

روشهای مختلفی برای مهار سیل وجود دارد، از آن جمله می‌توان به مخازن ذخیره‌ای و تأخیری، اشاره نمود. انتخاب روش مناسب، بستگی به شرایط محلی پروژه، اهمیت مناطق تحت حفاظت پروژه و شرایط اقتصادی کشور دارد (بنی‌حبیب، [۳]). مخازن تأخیری بر روی مسیل‌ها و رودخانه‌های کوچک یا متوسط می‌توانند ساخته شوند و برای رودخانه‌های بزرگ کارایی ندارند (رمایتر، [۱۸]). جانسون و ریچاردسون [۱۳] سه عامل مهم در طراحی سدهای تأخیری را ارتفاع سد، فاصله بین شکاف‌ها و محل قرار گرفتن سد عنوان داشتند. اگر چه مخازن تأخیری در کوتاه مدت می‌توانند عملکرد خوبی از لحاظ مهار سیلاب داشته باشند، ولی حتی مخازنی که به خوبی طراحی شده باشند نیز باید با احتیاط مورد استفاده قرار گیرند. غلظت بالای رسوب رودخانه‌ها، بویژه هنگام طغیان ممکن است به عنوان عامل محدود کننده‌ای در استفاده از سدهای تأخیری باشد، زیرا عملکرد این گونه سدها به شدت متأثر از حجم ذخیره‌ی مخزن می‌باشد. با پر شدن مخزن سد، به طور عملی توانایی سد برای تسکین سیلاب با مشکل مواجه می‌شود (بنی‌حبیب، [۳]). بنابراین در رودخانه‌های با غلظت بالای رسوب استفاده از سدهای تأخیری شکافدار توصیه می‌شود.

سدهای شکافدار دارای یک یا چند باز شدگی عمودی باریک از پی سد تا سرریز می‌باشند. سد تأخیری شکافدار رسوب بیشتری را از خود عبور داده و بنابراین، مخازن اینگونه سدها نسبت به

## مدل شبیه‌سازی دوبعدی سیلاب واریزه‌ای در مخازن سدهای تأخیری شکافدار

محمد ابراهیم بنی‌حبیب<sup>۱</sup> و فرزانه نظریه<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۲۹

## چکیده

سیلاب‌های واریزه‌ای جریان‌هایی با غلظت بالا هستند که بیشتر در مناطق کوهستانی با شیب زیاد رخ می‌دهند. از جمله سازه‌های مهار اینگونه سیلاب‌ها، سدهای تأخیری شکافدار هستند. در پژوهش مدل شبیه‌سازی دو بعدی جریان واریزه‌ای در مخزن سد تأخیری شکافدار ارائه شده است. برای گسسته‌سازی معادله‌هایی حاکم بر مسئله، از الگوی تفاضل محدود صریح مک کورمک استفاده شده و معادله‌هایی برای اعمال شرط مرزی سد شکافدار ارائه شده است. به دلیل در دسترس نبودن داده‌هایی میدانی سیلاب‌های واریزه‌ای در مخازن سدهای تأخیری شکافدار، مدل عددی این پژوهش با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. بررسی نتایج حاصل از مدل عددی، حاکی است که الگوی مورد استفاده و شرایط مرزی و اولیه پیشنهادی توانسته پرش هیدرولیکی متحرک سیلاب واریزه‌ای را در مخزن سد شکافدار بصورت دوبعدی شبیه‌سازی نماید. در نهایت، مقایسه نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی تایید می‌کند که مدل عددی می‌تواند آبنمود خروجی از سد شکافدار را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

**کلید واژه‌ها:** جریان واریزه‌ای، سد تأخیری شکافدار، شبیه‌سازی دو بعدی

۱-نویسنده مسئول و دانشیار دانشگاه تهران-پردیس ابوریحان. پست الکترونیک: banihabib@ut.ac.ir

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

سدهای تأخیری معمولی، دیرتر با رسوب پر شده و عمر بیشتری خواهند داشت (بنی حبیب، [۶]). کاربرد سدهای تأخیری شکافدار در حوضه‌های کوهستانی پر رسوب نیازمند بررسی عملکرد این سازه‌ها در شرایط سیلاب‌های واریزه‌ای می‌باشد. مدل عددی شبیه سازی جریان کمک موثری به ارزیابی عملکرد سد تأخیری پیش از ساخت آن‌ها می‌تواند داشته باشد.

از جمله مدل‌های عددی شبیه‌سازی جریان واریزه‌ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. مدل تجاری FLO-2D که در دانشگاه ایالت کلرادو ساخته شده است، در این مدل معادله‌های حاکم بر جریان با استفاده از تفاضل محدود حل می‌شوند و سیال بکار برده شده در آن از نوع بینگهام می‌باشد (ابرین و همکاران، [۱۶])، از قابلیت‌های این مدل توانایی ارتباط با GIS است. مدل DFEM از چند مدل رئولوژی<sup>۱</sup> برای شبیه سازی جریان استفاده می‌کند و توسط موسسه تحقیقات فدرال سوئیس ارایه شده است (ریکنمان، [۱۷]). مدل TREN2-2D در گروه عمران و مهندسی محیط زیست ایتالیا CUDAM ساخته شده است، و برای تعیین نقشه مناطق پر خطر اطراف آبراه‌ها کاربرد دارد (آرمانینی و همکاران، [۱]). از دیگر مدل‌ها می‌توان به ALCO\_2D (جلاردی و همکاران، [۱۰])، J-DFM 1-D (رمایتر، [۱۸]) و CEMAGREF (مالت، [۱۵]) و رمایتر، [۱۸]) اشاره نمود. این مدل‌ها جریان واریزه‌ای را بطور قابل قبولی شبیه سازی می‌کنند. اما توانایی آنها در ارزیابی عملکرد سازه‌های مهار سیلاب بویژه سد تأخیری شکافدار بررسی و اثبات نشده است.

از جمله پژوهش‌هایی که به ارزیابی اثر سازه‌های مهار سیلاب بر جریان واریزه‌ای پرداخته‌اند می‌توان به پژوهش‌های انجام گرفته توسط آرمانینی و همکاران (آرمانینی و همکاران، [۲]) اشاره نمود، وی با ترکیب معادله مایر-پیتر و معادله شزی، رابطه‌ای برای محاسبه شیب انتقال<sup>۲</sup> بدست آورد. سپس با استفاده از معادلات پیوستگی، انرژی و اتلاف انرژی رابطه‌ای برای تغییرات تراز بستر در اثر احداث سد تأخیری شکافدار ارایه نمود. یانفان [۲۱] با ارایه مدلی به بررسی اثر سازه‌هایی نظیر سدهای رسوب‌گیر<sup>۳</sup> و سنگ‌چین<sup>۴</sup> بر سیلاب واریزه‌ای پرداخته است. در این مدل معادله‌های حاکم به وسیله شبکه نامنظم جداسازی شده و به روش تفاضل محدود صریح با الگوی<sup>۵</sup> لیب-فلاگ<sup>۶</sup> حل می‌شوند. مدل عددی دو بعدی بنی حبیب و مختاری [۷] برای شبیه‌سازی جریان واریزه‌ای در مخزن سد تأخیری با خروجی تحتانی از نوع روزنه ارایه شده است. مدل کاناکو شبیه سازی جریان واریزه‌ای را در رودخانه‌ها و در مخزن سد تأخیری بصورت یک بعدی و در دشت بصورت دو بعدی انجام میدهد (ناکاتانی و همکاران، [۱۷]). مدل ارائه شده توسط شرشتا [۱۹]

1. Rehology
2. Transport Slop
3. Sabo Dam
4. Revetment
5. Scheme
6. Leap-Flog

رسوبگذاری جریانهای واریزه‌ای همراه با تکه‌های چوب و الوار در مخزن سد شکافدار را شبیه سازی می‌کند. در پژوهش‌های انجام گرفته توسط بنی حبیب و بهرام [۵] با استفاده از تحلیل ابعادی، رابطه‌ای برای تعیین نیمرخ رسوب در مخزن سدهای شکافدار بر پایه کارهای آزمایشگاهی ارایه شده است. اما هیچ یک از این مدل‌ها برای شبیه سازی دو بعدی جریان با غلظت بالا در مخزن سد تأخیری شکافدار طراحی نشده‌اند، همچنین مدل‌های پژوهش‌های ساخته شده نیز بجز کاری که توسط بنی حبیب و مختاری (بنی حبیب و مختاری [۷]) برای سد تأخیری معمولی (دارای روزنه) ساخته شده توانایی شبیه سازی دو بعدی جریان واریزه‌ای در مخزن سد تأخیری را ندارند. بنابراین با توجه به اهمیت بررسی عملکرد سدهای تأخیری شکافدار در برابر جریان‌های واریزه‌ای، ساخت مدلی که توانایی شبیه‌سازی جریان در مخازن سدهای شکافدار را داشته باشد ضروری است. در این مقاله همراه با ارایه مدل عددی دو بعدی، نتایج شبیه سازی عبور جریان از مخزن سدهای تأخیری شکافدار بحث شده است.

### مواد و روش‌ها

۱- معادلات حاکم: معادله‌های حاکم با انتگرال‌گیری معادلات ناوراستوکس روی عمق جریان استخراج می‌گردند. شکل ماتریسی معادله‌های دو بعدی بقای جرم و اندازه حرکت به شرح رابطه یک نوشته می‌شود (چادری، [۸]):

$$U_t + E_x + F_y + S = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱) مشتق جزئی ماتریس U در زمان،  $E_x$  مشتق جزئی ماتریس E در راستای محور x و  $F_y$  مشتق جزئی ماتریس F در راستای محور y می‌باشند. ماتریس‌های U، E، F و S به ترتیب مطابق روابط (۲) تا (۵) تعریف می‌گردند:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \cos \theta_{xy} \\ uvh \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \cos \theta_{xy} \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh(\sin \theta_x - s_{fx}) \\ -gh(\sin \theta_y - s_{fy}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

در روابط بالا  $h$  عمق جریان،  $u$  مولفه سرعت در راستای  $x$ ،  $v$

مولفه سرعت در راستای  $y$ ،  $g$  شتاب ثقل،  $\theta_x$  و  $\theta_y$  زاویه شیب بستر در راستای محورهای  $x$  و  $y$  و  $\theta_y$  نشان دهنده بیشترین زاویه شیب بستر، می‌باشند.  $s_{fx}$  و  $s_{fy}$  شیب متناظر با تنش برشی در جهت‌های  $x$  و  $y$  هستند. واحد کلیه کمیت‌ها در سیستم متریک می‌باشد.

در این پژوهش برای محاسبه شیب متناظر با تنش برشی از مفهوم ضریب سرعت  $\phi$  مطابق رابطه (۶) استفاده شده است. ضریب سرعت عاملی بدون بعد است که بیان کننده نسبت سرعت جریان  $u$  به سرعت برشی  $u^*$  می‌باشد. این عامل تابع عوامل مختلفی از جمله غلظت حجج می‌جریان می‌باشد. این ضریب برای جریان‌ها و ارزیابی در محدوده یک تا ده قرار دارد (بنی حبیب [۳]).

$$\phi = \frac{u}{u^*} \quad (۶)$$

فرم دیگر معادله (۶) بصورت معادله (۷) می‌باشد:

$$u = \phi \sqrt{gRS} \quad (۷)$$

در این رابطه  $\phi$  ضریب بدون بعد سرعت،  $R$  شعاع هیدرولیکی که تابعی از عمق جریان می‌باشد،  $S$  شیب آبراهه به درصد و  $g$  شتاب ثقل است.

ضریب  $\phi$  در این پژوهش بر اساس برابری حجم سیلاب ورودی به مخزن در دو مدل فیزیکی و ریاضی واسنجی شده است. سرعت سیلاب ورودی به مخزن در مدل ریاضی، در هر گام زمانی با قرار دادن عمق سیلاب برداشت شده در آزمایش در رابطه (۷)، محاسبه شده و از حاصلضرب سرعت در سطح مقطع جریان و زمان، حجم سیلاب ورودی به مخزن در مدل ریاضی محاسبه می‌شود. در نهایت سیلاب اندازه گیری شده در آزمایشگاه باید با سیلاب مدل ریاضی برابر باشد، که این برابری با تغییر  $\phi$  حاصل می‌شود. در نهایت با توجه به مفهوم ضریب سرعت، شیب معادل تنش برشی از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌گردد.

$$s_{fx} = \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{\phi^2 gh} \quad (۸)$$

$$s_{fy} = \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{\phi^2 gh} \quad (۹)$$

۲- تعیین عوامل جریان: برای حل معادله‌های جریان دو بعدی (انتگرال گیری شده در عمق) از روش عددی مک کورمک استفاده گردیده است. این الگو متشکل از یک زنجیره دومرحله‌ای پیش‌بینی کننده<sup>۱</sup> و تصحیح‌کننده می‌باشد. متغیرهای جریان در مرحله زمانی  $k$  مشخص بوده و مقادیر آنها در مرحله زمانی  $k+1$  باید محاسبه شوند. بنابراین برای تقریب معادله (۱) در نقطه  $i$  و  $j$  شبکه، معادلات تفاضل محدود زیر را می‌توان به شرح روابط (۹) و (۱۰)

نوشت (چادری، [۸]).

پیش‌بینی‌کننده برای  $2 \leq i \leq M$  و  $2 \leq j \leq N$ :

$$U_{i,j}^* = U_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \nabla_x E_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta y} \nabla_y F_{i,j}^k - \Delta t S_{i,j}^k \quad (۱۰)$$

تصحیح‌کننده برای  $2 \leq i \leq M-1$  و  $2 \leq j \leq N-1$ :

$$U_{i,j}^{**} = U_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \nabla_x E_{i,j}^* - \frac{\Delta t}{\Delta y} \nabla_y F_{i,j}^* - \Delta t S_{i,j}^* \quad (۱۱)$$

که در آن  $U^*$  و  $U^{**}$  مقادیر میانی  $U$  می‌باشند. مقادیر جدید بردار  $U$  در زمان  $k+1$  از رابطه (۱۲) بشرح زیر بدست می‌آید:

$$U_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2} (U_{i,j}^* + U_{i,j}^{**}) \quad (۱۲)$$

این الگو ابتدا از تفاضل مکانی پس‌رو<sup>۲</sup>  $(\nabla_x, \nabla_y)$  برای پیش‌بینی یک حل میانی از اطلاعات معلوم در مرحله زمانی  $k$  استفاده می‌کند. تفاضل‌های محدود پیش‌رو<sup>۳</sup>  $(\Delta_x, \Delta_y)$  در مرحله دوم برای تصحیح مقادیر پیش‌بینی شده بکار می‌روند. این عملگرها بصورت روابط (۱۳) و (۱۴) بشرح زیر تعریف می‌شوند (چادری، [۸]):

$$\Delta_x U_{i,j} = U_{(i+1,j)} - U_{(i,j)} \quad (۱۳)$$

$$\nabla_x U_{i,j} = U_{(i,j)} - U_{(i-1,j)} \quad (۱۴)$$

مقادیر متغیرهای اصلی از مقادیر محاسبه شده در هر مرحله زمانی به شرح روابط (۱۵) تا (۱۷) به دست می‌آیند:

$$h^{k+1} = h^{k+1} \quad (۱۵)$$

$$u^{k+1} = \frac{(uh)^{k+1}}{h^{k+1}} \quad (۱۶)$$

$$v^{k+1} = \frac{(vh)^{k+1}}{h^{k+1}} \quad (۱۷)$$

۳- شرایط مرزی و اولیه شبیه سازی جریان سیلابی: معادله‌های تفاضل محدود ذکر شده در نقاط میانی شبکه بکار می‌روند. برای شروع محاسبه‌ها، شرایط مرزی در کلیه گره‌های مرزی و شرایط اولیه، برای کلیه گره‌های محیط شبیه سازی، تعیین شدند.

۳-۱ شرایط اولیه شبیه‌سازی: از آنجا که اگر در شروع برنامه هیچ گونه جریانی از قبل در فلوم وجود نداشته باشد، به معنی مساوی بودن عمق و سرعت جریان با صفر است، که خود باعث غیر عادی<sup>۴</sup> شدن جواب معادله‌های (تقسیم بر صفر، جواب بی‌نهایت) می‌شود، بنابراین با در نظر گرفتن عمق و سرعت بسیار کم به عنوان شرایط اولیه در کلیه گره‌های شبکه از این خطا جلوگیری شده است. در پژوهشی که توسط فنما و چادری [۹] به منظور شبیه سازی شکست سد با الگوی مک کورمک انجام گرفته مشخص شد که اگر نسبت

2. Back Ward Difference
3. Forward Difference
4. Singular

1. Predictor

$$(vh)_{i,j}^* = (vh)_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (uvh)_{i,j}^k + (uvh)_{i+1,j}^k \right\} \quad (20)$$

$$- \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ \left( v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i,j}^k - \left( v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i,j-1}^k \right\}$$

$$+ gh_{i,j}^k \Delta t (S_{0y} - S_{fy})_{i,j}^k$$

در معادله‌های فوق  $h_{i,j}^*$  عمق جریان،  $(h)_{i,j}^*$  دبی جریان در راستای محور  $x$  و  $(h)_{i,j}^*$  دبی جریان در راستای محور  $y$ ، در مرحله پیش‌بینی برای گره مرزی  $(i, j)$  در گام زمانی  $k$  می‌باشد. در معادلات (۱۸) تا (۲۰) مقادیر در همه نقاط  $(i-1, j)$  با مقادیر در نقاط  $(i+1, j)$  جایگزین شده و علامت مولفه عمودی سرعت  $u$  جابه‌جا شده است.

۲-۳-۴- شرط مرزی در محل شکاف سد: با توجه به نسبت عرض آبراهه به عرض شکاف سد در محل شکاف سد دو حالت جریان رخ می‌دهد. در حالت اول عرض شکاف زیاد بوده و سرعت جریان در محل شکاف از سرعت جریان بحرانی بزرگتر می‌شود، در نتیجه جریان در شکاف سد، فوق بحرانی باقی می‌ماند. در حالت دوم عرض شکاف به اندازه کافی کم بوده و سرعت بحرانی مربوط به این عرض شکاف از سرعت جریان بالادست آن بیشتر می‌شود. بنابراین در شکاف سرعت بحرانی رخ می‌دهد، در این شرایط انرژی ویژه برابر حداقل مقدار آن خواهد بود (آرمانینی و لارچر [۶]).

از آنجا که در اثر تنگ شدگی ناگهانی شکاف سد میزان انرژی به دلیل ایجاد گردابه‌هایی، کاهش پیدا می‌کند، بر این اساس آرمانینی و لارچر [۶] رابطه‌ای (۲۱) را برای محاسبه افت انرژی ارایه نموده‌اند:

$$\frac{\Delta E}{h_u} = \frac{Fr_u^2}{2} \left[ 1 - \frac{2}{3} (Fr_u R)^{-2/3} \right]^2 \quad (21)$$

در رابطه فوق  $\Delta E$ : تلفات انرژی،  $h_u$ : عمق جریان،  $F_u$ : عدد فرود جریان واقع در بالا دست شکاف و  $R$ : نسبت عرض آبراهه به عرض شکاف است. با توجه به کم بودن عرض آبراهه نسبت به عرض شکاف در سد شکافدار، به طور غالب جریان در شکاف سد بحرانی می‌باشد. بنابراین عمق جریان در شکاف برابر دو سوم انرژی ویژه در محل شکاف می‌باشد (حسینی و ابریش می [۱۲]). در این پژوهش میزان انرژی در شکاف با کسر افت انرژی از انرژی بالا دست و از رابطه (۲۱) بدست آمده است. بنابراین شرایط مرز در محل شکاف بر اساس روابط (۲۲) و (۲۳) بدست آمده‌اند:

عمق جریان در پایاب بر عمق جریان در مخزن کمتر از ۰/۲۵ در نظر گرفته شود این الگو بخوبی جواب نمی‌دهد (فنما و چادری [۹]). بنابراین در این پژوهش عمق جریان در شرایط اولیه حدود ۰/۲۵ عمق جریان ورودی اولیه در نظر گرفته شده است. سرعت جریان ورودی از رابطه (۷) بدست آمده است.

در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب برای کاربرد موفق هر روش عددی، به ویژه سامانه‌های هذلولی که در آن خطاهای به وجود آمده در مرزها در سرتاسر شبکه منتشر می‌شوند اهمیت دارد. شرایط مرزی اعمال شده در این پژوهش شامل شرط مرزی ورودی در بالادست مخزن سد، شرط مرزی جامد (دیواره‌های صلب کنار و بدنه سد) و شرایط مرزی در محل شکاف سد بوده‌اند.

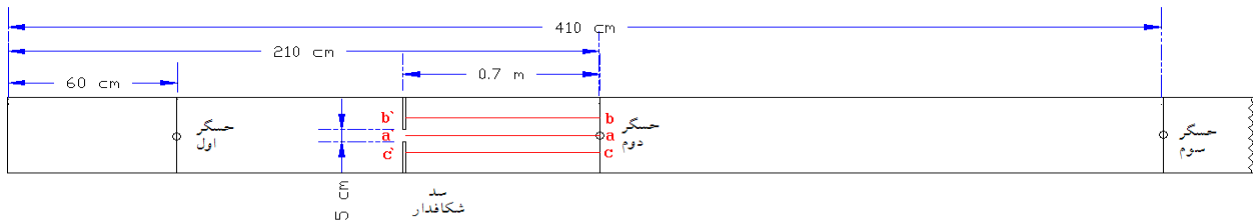
۳-۲- شرط مرزی ورودی در بالا دست مخزن سد: عمق جریان ورودی به مخزن سد با توجه به داده‌های آزمایشگاهی مشخص بوده و برای محاسبه سرعت جریان ورودی نیز از رابطه (۷) استفاده شده است

۳-۳- شرط مرز جامد: در دیواره سد (جهت عمود بر جریان) همچنین دیواره چپ و راست فلوم مرز جامد تعریف شده است. این نوع مرز را می‌توان توسط مرز انعکاسی در الگوی مک‌کورمک انجام داد. در این روش نقاط فرضی در دیواره جامد با نقاط همسایه داخلی جایگزین می‌گردند. انعکاس غیر متقارن با تغییر علامت مولفه عمودی سرعت در نظر گرفته می‌شود. برای نشان دادن روش، یک مرز صلب در جهت محور  $y$  را با میدان محاسباتی در جهت مثبت  $x$  در نظر بگیرید. برای تعریف مرز صلب در نقطه  $(i, j)$ ، نقطه فرضی  $(i-1, j)$  در نظر گرفته می‌شود که اطلاعات آن با استفاده از اطلاعات نقطه  $(i+1, j)$  جایگزین شده است. برای مرحله پیش‌بینی کننده، معادلات تفاضل که با استفاده از شکل ابقایی بدست آمده‌اند به شکل روابط (۱۸) تا (۲۰) می‌باشند.

$$h_{i,j}^* = h_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (uh)_{i,j}^k + (uh)_{i+1,j}^k \right\} - \quad (18)$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ (vh)_{i,j}^k + (vh)_{i,j-1}^k \right\} \quad (19)$$

$$(uh)_{i,j}^* = (uh)_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ \left( u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i,j}^k - \left( u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \right)_{i+1,j}^k \right\} - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ (uvh)_{i,j}^k - (uvh)_{i,j-1}^k \right\} + gh_{i,j}^k \Delta t (S_{0x} - S_{fx})_{i,j}^k$$



شکل ۱- طرح فلوم و محورهای مورد بررسی روی فلوم

Figure 1. Plan view of flume and investigated axis

نوسانات ناشی از خطاهای برش بوده و ربطی به فیزیک پدیده مورد بررسی ندارند. در این پژوهش برای رفع این نوسانهای از لزجت مصنوعی جامسون استفاده شده است (چادری، [۸]). لزجت مصنوعی نوسانهای در مناطق با تغییرات بسیار شدید را آرام ساخته، در حالیکه تأثیری در مناطق غیر متلاطم نمی گذارد.

۶- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده: مدل فیزیکی استفاده شده در این پژوهش مشتمل بر پنج بخش عمده: الف) فلوم شیب پذیر به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۷/۶، ۰/۳ و ۰/۲۵ متر، ب) سد شکافدار، ج) سطح سنجهای اولتراسونیک، د) مخزن رسوب، ه) نقطه سنج رقومی می باشد. در این آزمایش سد شکافدار در فاصله ۱۴۰ سانتی متری از پایین دست فلوم کار گذاشته شده است. شیب فلوم ۲۴/۵ درجه، ارتفاع سد ۲۵ سانتی متر، عرض شکاف سد برابر ۵ سانتی متر و قطر رسوبهای برابر ۱ میلی متر در نظر گرفته شده اند. این قطر رسوب برای شبیه سازی سیلاب واریزه ای به دلیل چسبندگی نبودن و همچنین عدم ایجاد گرفتگی در شکاف سد انتخاب شده است. سطح سنجهای اولتراسونیک اول، دوم و سوم به ترتیب در فاصله ۶۰، ۲۱۰ و ۴۱۰ سانتی متری از پایین دست فلوم برای تعیین تراز آب نصب گردیده است. سطح سنج اول در پایین دست سد و سطح سنج دوم و سوم در بالا دست مخزن قرار گرفته اند. شکل (۱) پلان فلوم مورد استفاده در این آزمایش را نشان می دهد. در این شکل محورهایی که متغیرهای جریان (عمق، سرعت و عدد فرود) در آنها مورد بررسی قرار می گیرند نشان داده شده است. محورهای 'bb' و 'cc' در فاصله ۹ سانتی متری و محور 'aa' در فاصله ۱۵ سانتی متری از دیواره کناری فلوم قرار دارند.

انجام آزمایشها بدین صورت بود، که ابتدا رسوبهای با وزن مشخص در مخزن رسوب چیده شده و به حالت اشباع رسانیده می شوند. سپس به میزان پنج لیتر آب روی لایه اشباع اضافه می شود. بالادست فلوم تا ارتفاع ۳/۱۵ متر بالا برده شده تا شیب ۲۴/۵ حاصل شود. در این مرحله دریچه مخزن کنترل به طور ناگهانی باز شده و جریان به همراه رسوب به سمت سد شکافدار حرکت داده شد و مقداری از رسوبات پشت سد تجمع پیدا می کنند. حسگرهای عمق سنج در طول کل آزمایش در هر دهم ثانیه در سه نقطه عمق

$$h_d = \frac{2}{3} \left[ h_u + \frac{u_u^2}{2g} - \Delta E \right] \quad (22)$$

$$u_d = \sqrt{gh_d} \quad (23)$$

در روابط (۲۲) و (۲۳)،  $h_d$  و  $u_d$  عمق و سرعت جریان در شکاف سد می باشند،  $u_u$  سرعت جریان در بالادست سد می باشد. ۴- شرط پایداری الگوی عددی: برای پایداری الگوی مک کورمک باید معیار کورانت-فردریش-لوی  $CFL$ ، در کلیه گرهها کوچکتر یا مساوی عدد یک باشد. بنابراین گام زمانی توسط شرط زیر به شرح رابطه (۲۴) محدود می شود (چادری، [۸]):

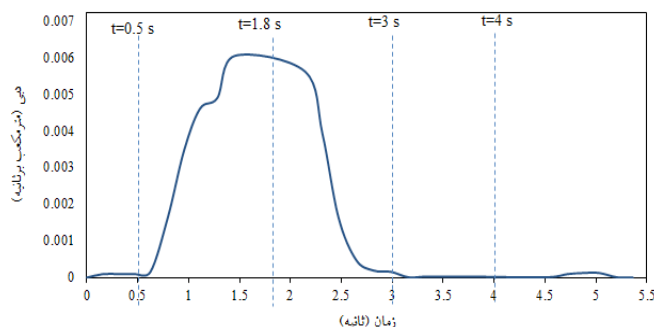
$$CFL = \frac{\Delta t}{\min[dx, dy]} \max[|u| + \sqrt{gh}] \quad (24)$$

$$(|v| + \sqrt{gh}) \leq 1$$

۵- نوسانهای ناشی از ناپیوستگی جریان: از جمله خطاهایی که ممکن است در حل عددی یک معادله هیپربولیک بوجود آید. خطای مربوط به پخش عددی<sup>۱</sup> و پراکنش عددی<sup>۲</sup> است. وجود پخش عددی در یک فرآیند فیزیکی باعث عدم یکنواختی در توزیع ویژگیهای فیزیکی و کاهش غیر واقعی اندازه موج می شود. علت آن وجود مشتقات مکانی زوج در ترمهای خطای قطع رشته<sup>۳</sup> در تقریبهای مرتبه فرد است. وجود پراکنش عددی باعث ایجاد نوسانهای غیر واقعی در شکل موج می شود که علت آن ترمهای خطای قطع رشته حاوی مشتقات زمانی مرتبه فرد در تقریبهای مرتبه زوج است (چادری، [۸]).

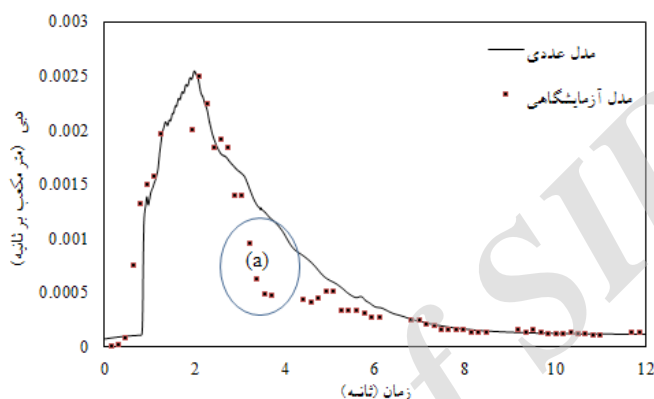
در الگوی مک کورمک نیز که از مرتبه دوم می باشد در نزدیکی ناپیوستگیهای سطح آب، نوسانات عددی ایجاد می شود که این

1. Courant- Friedrichs- Lewy
2. Numerical diffusion
3. Numerical dispersion
4. Truncation error



شکل ۲ - نمودار بده جریان ورودی

Figure 2. Inlet hydrograph to the slit dam reservoir



شکل ۳- آبنگار خروجی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی

Figure 3. Numerical and experimental outlet hydrograph

که سیلاب در مدل آزمایشگاهی نسبت به مدل عددی زودتر فروکش می‌کند و مدل عددی در این قسمت بده جریان را بیشتر از مقدار واقعی آن تخمین زده است. از شکل کلی آبنگار می‌توان چنین استنباط نمود که مدل عددی توانسته است روند کلی تغییرات آبنگار خروجی را شبیه سازی نماید، که حاکی از توانایی مدل عددی در شبیه سازی جریان در مخزن سد شکافدار است.

۳- بررسی تغییرات ویژگی‌های جریان در محل شکاف سد: شکل‌های ۴- الف، ب و ۴- ج به ترتیب تغییرات عدد فرود، عمق و سرعت جریان را در زمان‌های مشخص شده در شکل (۲) روی محور aa' (شکل ۱) نشان می‌دهند. تغییرات عدد فرود در این محور نشان دهنده رخداد پرش هیدرولیکی در داخل مخزن سد می‌باشد. پس از پرش هیدرولیکی و تبدیل جریان به زیر بحرانی، پدیده خفگی جریان رخ می‌دهد، یعنی عمق جریان باز هم افزایش می‌یابد تا انرژی ویژه در قبل از شکاف به اندازه‌ای افزایش پیدا کند که عبور جریان از محل شکاف با حداقل انرژی ویژه انجام گیرد. بنابراین جریان در محل شکاف بحرانی خواهد بود. نزدیک بودن عدد فرود به یک در محل شکاف تایید کننده این امر می‌باشد.

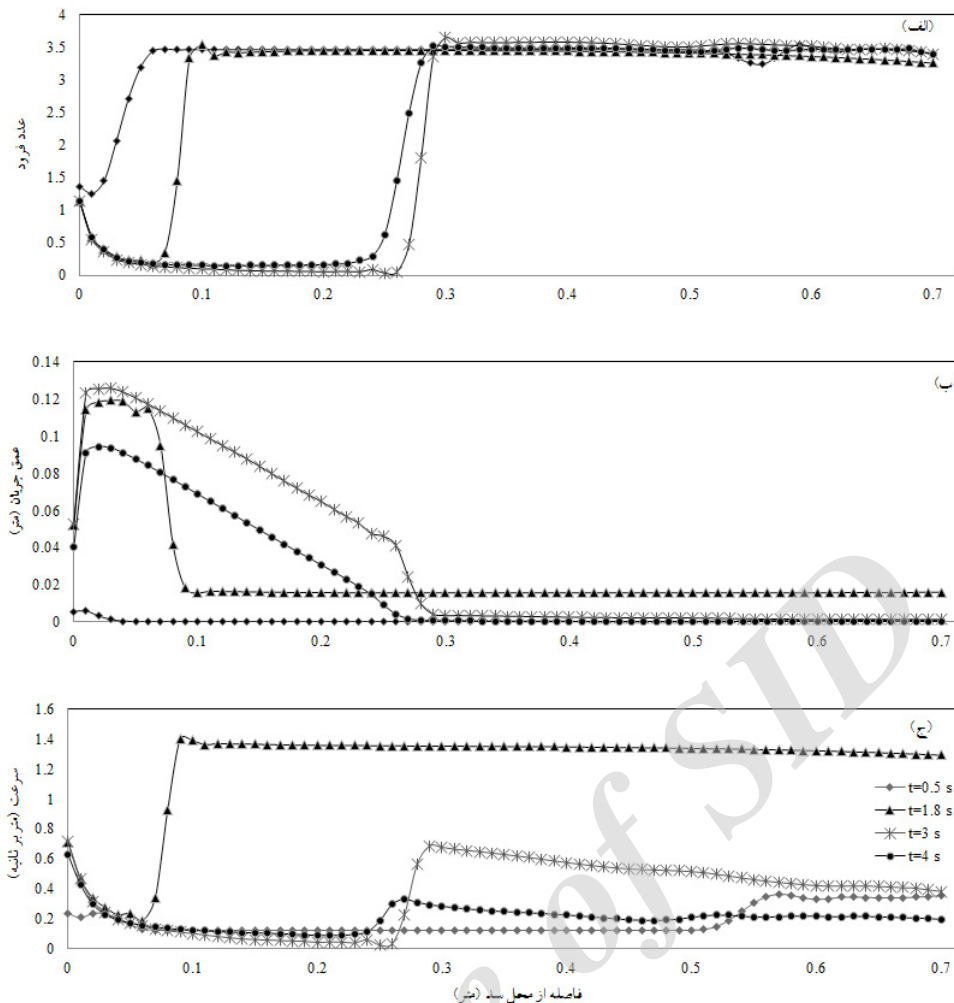
آب را با دقت دهم میلی‌متر اندازه‌گیری می‌کنند. نتایج این مدل با مدل ریاضی مقایسه شده است.

### نتایج

۱- آبنگار ورودی به مدل: آبنگار سیلاب ورودی به مخزن سد با توجه به شرایط مرزی بالادست مطابق شکل (۲) می‌باشد. برای رسم این آبنگار مقدار ضریب بدون بعد  $\phi$  برابر  $5/6$ ، واسنجی شده است. در این پژوهش همچنین ضرائب لزجت مصنوعی در راستای محور  $x$  و  $y$  برابر  $0/45$  و  $0/3$  بدست آمده‌اند.

چهار زمان نشان داده شده بر روی آبنگار شکل (۲) زمان‌هایی است که متغیرهای جریان در آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. این زمان‌ها شامل  $t = 0/5$  ثانیه زمان شروع اوج گیری سیلاب،  $t = 8/1$  ثانیه زمان اوج سیلاب،  $t = 3$  ثانیه زمان فروکش سیلاب و  $t = 4$  ثانیه زمان انتهای سیلاب است.

۲- مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی: به منظور بررسی توانایی مدل در شبیه سازی جریان خروجی سد شکافدار، آبنگار خروجی حاصل از دو مدل عددی و آزمایشگاهی مقایسه گردید (شکل ۳). شیب شاخه نزولی دو آبنگار در ناحیه a (شکل ۳) نشان می‌دهد

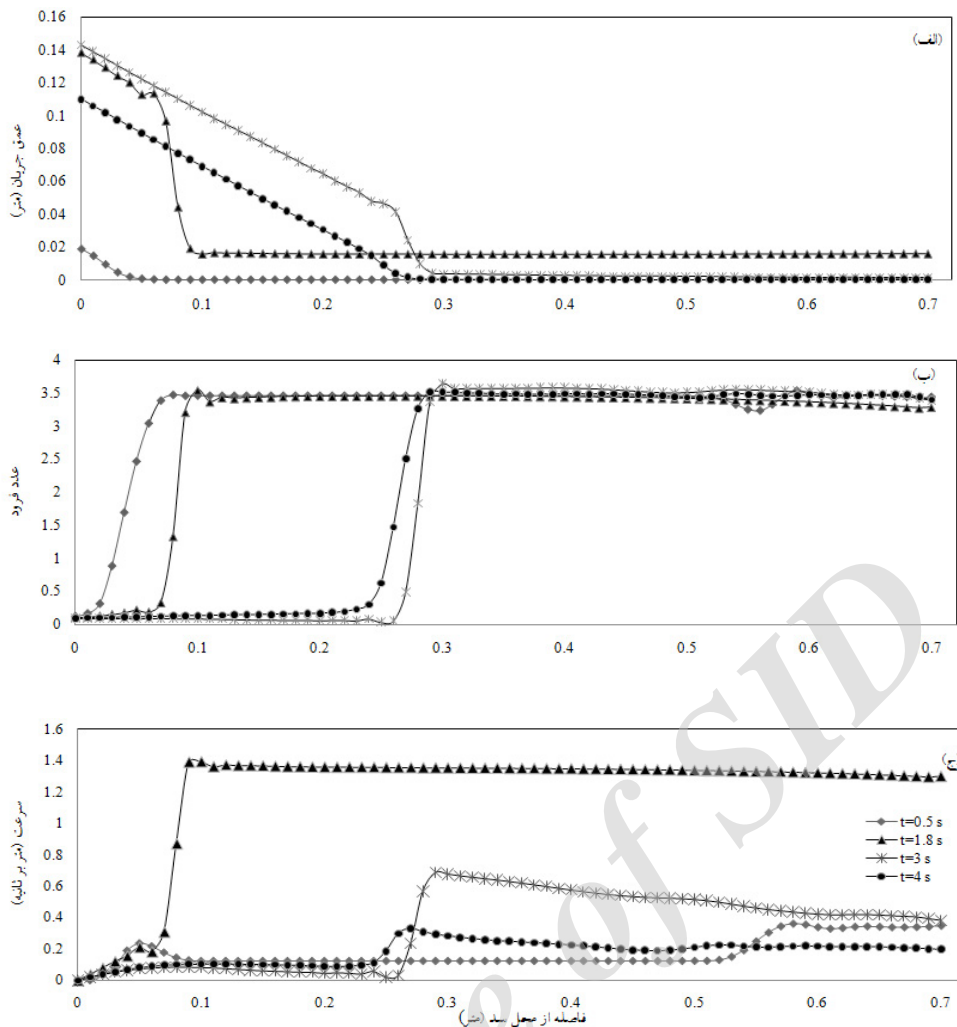


شکل ۴ - نمودار تغییرات (الف) عدد فرود، (ب) عمق جریان و (ج) سرعت جریان درمحل شکاف سد  
Figure 4. (a) Froude number, (b) Flow Depth, (c) flow velocity in the slit section

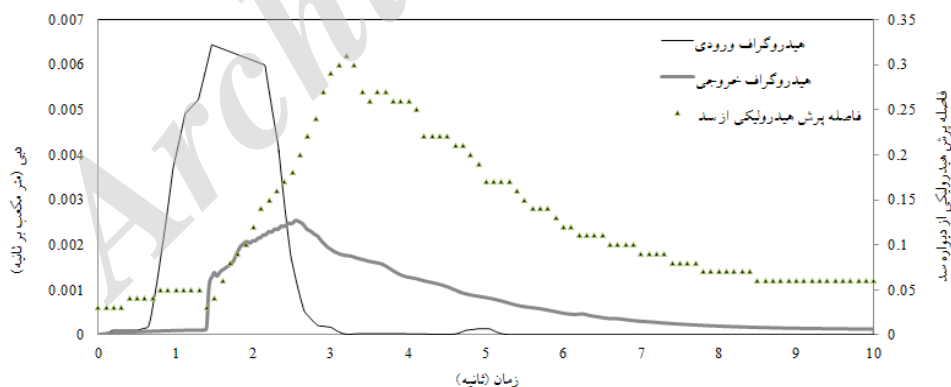
شکل ۴- الف تغییرات طولی عدد فرود جریان در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل شیب زیاد فلوم (۲۴/۵ درجه) جریان در زمان گذشتن از حسگر دوم، فوق بحرانی بوده و در بالادست سد شکافدار جریان در کلیه زمان‌های نشان داده شده به استثنای زمان  $t = 0/5$  ثانیه، زیر بحرانی می‌باشد. بنابراین قبل از شکاف سد پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. در زمان  $t = 0/5$  همانطور که بر روی شکل (۱) مشخص گردیده بده جریان کم بوده و هنوز شاخه صعودی آبنگار جریان شروع نشده است، لذا شکاف سد برای عبور این بده جریان کافی بوده و انباشت جریان در مخزن رخ نداده و بعلا شیب زیاد فلوم، جریان بصورت فوق بحرانی از شکاف سد عبور نموده و پرش هیدرولیکی متحرک در این زمان رخ نداده است. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود مدل توانسته است پرش هیدرولیکی متحرک را بخوبی شبیه‌سازی نماید. با نزدیک شدن بده اوج سیلاب به سد، محل پرش هیدرولیکی به سمت بالادست حرکت می‌کند، سپس با گذشتن حجم عمده سیلاب از خروجی سد

شکل ۴- الف تغییرات طولی عدد فرود جریان در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل شیب زیاد فلوم (۲۴/۵ درجه) جریان در زمان گذشتن از حسگر دوم، فوق بحرانی بوده و در بالادست سد شکافدار جریان در کلیه زمان‌های نشان داده شده به استثنای زمان  $t = 0/5$  ثانیه، زیر بحرانی می‌باشد. بنابراین قبل از شکاف سد پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. در زمان  $t = 0/5$  همانطور که بر روی شکل (۱) مشخص گردیده بده جریان کم بوده و هنوز شاخه صعودی آبنگار جریان شروع نشده است، لذا شکاف سد برای عبور این بده جریان کافی بوده و انباشت جریان در مخزن رخ نداده و بعلا شیب زیاد فلوم، جریان بصورت فوق بحرانی از شکاف سد عبور نموده و پرش هیدرولیکی متحرک در این زمان رخ نداده است. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود مدل توانسته است پرش هیدرولیکی متحرک را بخوبی شبیه‌سازی نماید. با نزدیک شدن بده اوج سیلاب به سد، محل پرش هیدرولیکی به سمت بالادست حرکت می‌کند، سپس با گذشتن حجم عمده سیلاب از خروجی سد

شکل ۴- الف تغییرات طولی عدد فرود جریان در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل شیب زیاد فلوم (۲۴/۵ درجه) جریان در زمان گذشتن از حسگر دوم، فوق بحرانی بوده و در بالادست سد شکافدار جریان در کلیه زمان‌های نشان داده شده به استثنای زمان  $t = 0/5$  ثانیه، زیر بحرانی می‌باشد. بنابراین قبل از شکاف سد پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. در زمان  $t = 0/5$  همانطور که بر روی شکل (۱) مشخص گردیده بده جریان کم بوده و هنوز شاخه صعودی آبنگار جریان شروع نشده است، لذا شکاف سد برای عبور این بده جریان کافی بوده و انباشت جریان در مخزن رخ نداده و بعلا شیب زیاد فلوم، جریان بصورت فوق بحرانی از شکاف سد عبور نموده و پرش هیدرولیکی متحرک در این زمان رخ نداده است. همان گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود مدل توانسته است پرش هیدرولیکی متحرک را بخوبی شبیه‌سازی نماید. با نزدیک شدن بده اوج سیلاب به سد، محل پرش هیدرولیکی به سمت بالادست حرکت می‌کند، سپس با گذشتن حجم عمده سیلاب از خروجی سد



شکل ۵- تغییرات (الف) عدد فرود (ب) عمق جریان (ج) سرعت جریان در محور کناری  
 Figure 4.(a) Froude number , (b) flow Depth, (c) flow velocity in side axis

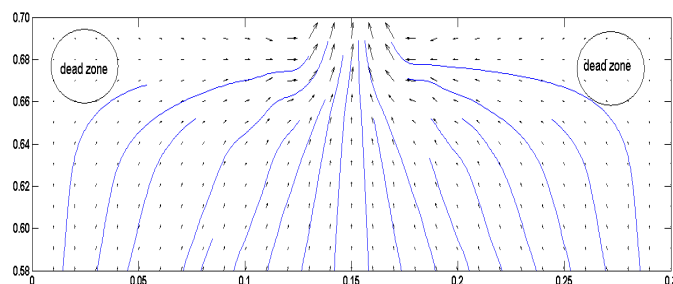


شکل ۶- نمودار تغییرات محل پرش هیدرولیکی با پیشروی جریان  
 Figure 6. Changing location of hydraulic jump with flow propagation

مخزن رسم شده است. در بالادست این محدوده سرعت جریان به طور تقریباً یکنواخت می باشد.

به منظور بررسی تأثیر سد تأخیری شکافدار بر روی جریان توزیع دو بعدی عدد سرعت، در شکل (۷) در زمانی که ورودی جریان به مخزن سد حداکثر است، یعنی ۰ ثانیه در محدوده ۱۰ سانتی متری





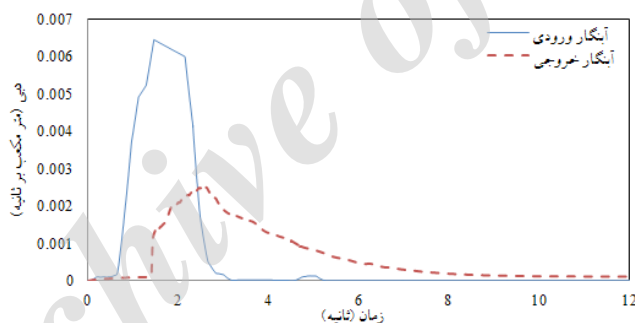
شکل ۷- توزیع دو بعدی سرعت در زمان  $t = 2$  ثانیه

Figure 7. Flow velocity in two dimensional at  $t=2$  second



شکل ۸- تصور رسوبگذاری جریان پس از آزمایش

Figure 8. Sediment deposition at silt dam reservoir after experiment



شکل ۹- آبنگار ورودی به مخزن و آبنگار خروجی از مخزن

Figure 9. Inlet and outlet hydrograph at silt dam reservoir

آبنگار مدت زمانی که سیلاب در مخزن سد برای رسوبگذاری توقف می‌کند افزایش می‌یابد پس غلظت جریان خروجی از سد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین سد شکافدار با کاهش بده اوج و غلظت جریان خروجی خسارت ناشی از سیلاب واریزه‌ای را کاهش می‌دهد.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی سیلاب واریزه‌ای در داخل مخزن سد تأخیری شکافدار، از الگوی صریح مک‌کورمک استفاده شده و شرایط اولیه و مرزی مناسب برای شبیه‌سازی دو بعدی سیلاب واریزه‌ای در مخزن سد شکافدار پیشنهاد شده است. شبیه

بر اساس شکل (۷) جریان در نزدیکی سد از حالت یکنواخت و یک بعدی خارج گردیده در دو طرف بالادست سد فضای مرده جریان با سرعت چرخش پایین تشکیل می‌شود که می‌تواند موجب رسوبگذاری در دو طرف شکاف سد در مخزن شود نتایج آزمایشگاهی از رسوبگذاری نیز مطابق شکل (۸) مؤید این موضوع است.

شکل شماره (۹) دو آبنگار ورودی و خروجی به مخزن سد را در یک نمودار نشان می‌دهد، وجود سد شکافدار باعث کاهش بده اوج و افزایش زمان پایه آبنگار ورودی شده است. همانگونه که شکل (۹) نشان می‌دهد بده اوج خروجی به حدود ۴۰ درصد بده اوج سیلاب ورودی کاهش پیدا کرده است. با افزایش زمان پایه

3- Banihabib, M. E. 1997. Flood Control by Detention Basins, Flood Control Workshop, River Engineering Committee, Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. 1:17 (in Persian).

4- Banihabib, M.E. 2003. Mud and Debris Floods. Proceeding of Flash Flood Prevention & Mitigation, Gorgan, Iran. 1:8. (in Persian).

5- Banihabib, M.E. and Bahram, A. 2009. Experimental analyses of sedimentation in the slit dam Reservoir. World Environmental and Water Resources Congress. Kansas City. Missouri, CD-ROM, 5845:5856

6- Banihabib M.E., Hassanzadeh Y. and Hassan Isfahani, L. 2007. Comparative evaluation of sedimentation method of slit dams reservoir and ordinary detention dam by HEC-RAS model. 4th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering, Karaj Natural sciences school of Tehran University, Iran. 1:12 ( in persian).

7- Banihabib, M.E. and Mokhtari, A. H. 2001. Numerical simulation in detention dams during a high concentrated flow. 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics. Arizona. USA.1:6

8- Chaudry, M.H. 1993. Open-Channel Flow. Prentice Hall, New Jersey, 483p.

9- Fennema, R.J., and Chaudhry, M.H. 1989. Implicit methods for two-dimensional unsteady free-surface flows, Jour. Of Hydraulic Research, International Assoc. for Hydraulic Research, 27(3):321:332

10- Gharangik, A. M., and Chaudhry, M. H. 1991. Numerical Simulation of Hydraulic Jump, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers. 117( 9): 1195-1211.

11- Ghilardi, P., Natale, L. and Savi, F. 2001. Modeling debris flow propagation and deposition. Physics and Chemistry of the Earth (C). 26( 9): 651-65

12- Hosseini, S.M., and Abrishami, J. 1999. Open channel hydraulics, Imam Reza Press, Mashhad, 615p. (in Persian).

13- Johnson, Peggy A. and Mc Cuen, Richard H. 1989. Slit dam design for debris flow mitigation. J. Hydraulic Engineering. 115(9):1293-1296.

14- Liu, M. and Liu, Y. L. 2011. Numerical Simulation of Hydraulic Jump. Advanced Materials Research. V( 374 – 377):( 643-646)

15- Malet, J.P. 2003. Les glissements de type écoulement

سازی مدل عددی با مدل فیزیکی آزمایشگاهی مقایسه شده و بطور کلی نتایج زیر حاصل گردیده است:

الگوی مورد استفاده به خوبی توانسته است پرش هیدرولیکی ناشی از تغییر رژیم جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی و جابجایی محل پرش هیدرولیکی با پیشروی سیلاب را در بالا دست سد شکافدار شبیه سازی نماید. در تحقیق انجام گرفته توسط لیو نیز نشان داده شد که الگوی مک کورمک توانایی شبیه سازی پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی را دارا می باشد (لیو و همکاران [۱۴]). اما در تحقیق گارانجیک و چادری نشان داده شد که فرم درجه دو الگوی مک کورمک توانایی تعیین محل دقیق پرش هیدرولیکی را ندارد (گارانجیک و چادری [۱۱]). در این پژوهش امکان تعیین محل دقیق پرش هیدرولیکی در مدل آزمایشگاهی در هر گام زمانی میسر نبود بنابراین در مورد توانایی مدل پیشنهادی در تعیین محل دقیق پرش هیدرولیکی نمی توان اظهار نظر نمود ولی روند جابجایی محل پرش هیدرولیکی با پیشروی سیلاب در داخل مخزن سد شکافدار، توسط مدل ریاضی قابل بررسی شده است.

شرایط مرزی پیشنهادی برای شبیه سازی جریان در محل شکاف توانسته رفتار جریان در مخزن سد تأخیری شکافدار، یعنی تشکیل مناطق مرده در گوشه های مخزن سد و وقوع جریان بحرانی در محل شکاف سد را بخوبی شبیه سازی نماید.

بنی حبیب و مختاری نیز در پژوهشی که از الگوی مک کورمک برای شبیه سازی جریان واریزای در مخزن سد تأخیری معمولی استفاده می کرد به این نتیجه رسیدند که این الگو برای شبیه سازی جریان واریزه ای مناسب می باشد (بنی حبیب و مختاری [۷]). نتایج مقایسه مدل ریاضی با مدل فیزیکی حاکی از دقت مناسب مدل پیشنهادی در شبیه سازی جریان در مخازن سدهای شکافدار است. لذا این پژوهش، نتایج تحقیق در مورد سد سد تأخیری معمولی را به سد شکافدار تعمیم داده است.

## پیشنهادات

بررسی شبکه ای با ابعاد متفاوت در نقاط مختلف، بطوری که در نزدیکی شکاف سد شبکه فشرده تر باشد.

بررسی استفاده از محدود کننده های جریان<sup>۱</sup> بجای لزجت مصنوعی برای کاهش نوسانات ناشی از خطای حل عددی.

## منابع

1- Armanini, A., Fraccarollo, L. and Rosatti, R. 2009. Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels. Computers & Geosciences. 35: 993–1006.

2- Armanini, A. and Larcher M. 2001. Rational criterion for designing opening of slit check dam. Hydraulic Engineering ASCE. 127(2): 94-104.

1. limiter

19- Shrestha, B.B. 2009. Study on Mitigation Measures against Debris Flow Disasters with Driftwood. PhD Thesis. Kyoto University, Japan. 192p.

20- USGS. U.S Geological Survey. 2011. WWW.USGS.ORG

21- Yanfan, Y. 2007. A Debris flow Simulation Model for Evaluation of Protection Structures. Journal of Mountain science vol. 4: 193-202.

dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique. Doctoral Thesis. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364p (In Italian)

16- O'Brien, J.S., Julien, P.Y. and Fullerton, W. T. 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of Hydraulic Engineering, 119( 2):244-266,.

17- Remaitre, A. 2006. Morphologie et dynamique des laves torrentielles: Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). Doctoral Thesis. Université de Caen, 487 p. (In Italian)

18- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdeil B.W. and Hubl, J. 2006. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. Computational Geosciences. Vol.10:241–264.

Archive of SID

*Abstract***Two-dimensional Simulation of Debris Flow in the Reservoir of Slit Detention Dam**M. Ebrahim Banihabib<sup>1</sup> and F. Nazarieh<sup>2</sup>

Received:2011/09/27 Accepted : 2012/09/19

In Debris floods are high concentrated flow that occurs in steep mountain areas. Slit dam is one of the structures designed for controlling these kinds of floods. A two dimensional model is proposed for simulation of debris flow in slit dam reservoirs. In this model, the finite difference MacCormack explicit scheme is used for discretization of governing equations, and a formula is proposed for the slit dam boundary condition. Due to the lack of observed data of debris floods in slit detention dam reservoirs, the numerical model is compared with an experimental model. The model results show that the applied scheme using the proposed initial and boundary condition is capable to simulate the two dimensional movable hydraulic jump in slit dam reservoirs. Finally, the comparison of numerical results and experimental data confirms that the numerical model is fairly capable to simulate the outflow hydrograph of slit dam.

**Keywords:** *Debris flow, Detention slit dam, Two dimensional simulation*

1. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Abureihan, University of Tehran, Tehran, Iran. Corresponding author Email: banihabib@ut.ac.ir

2. Graduate student of M.Sc. Water Engineering, College of Abureihan, University of Tehran, Tehran.