

پذیرفته شده پیش از انتشار

شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد بر مبنای حل عددی معادله‌های آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی الخط

زهرا مهرموسوی^۱، رسول قبادیان^۲ و میترا جوان^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی *نویسنده مسئول (rsghobadian@gmail.com)

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

چکیده

شبیه‌سازی شکست سد و جریان‌های سیلابی ناشی از آن همواره یکی از مسائل مهم و مورد علاقه محققین است. این موضوع تحقیق‌های بسیار زیاد آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی را به خود اختصاص داده است. بیشتر مطالعه‌های عددی که بر مبنای حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق استوار است به دنبال ارایه روش‌های بهتر برای افزایش دقت و همگرایی مسئله می‌باشند. در این تحقیق نیز به منظور شبیه‌سازی پدیده شکست سد مدل کامپیوتری بر مبنای حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی الخط توسعه داده شد. به منظور افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبه‌ها برای هموار نمودن گرادیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی و کاهش احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی، در مدل مذکور هم‌زمان از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس بر روی شبکه جابه‌جا شده استفاده شد. با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری، تحلیلی و نتایج عددی سایر محققین، توانایی مدل در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی، شکست ایده‌آل بر روی بستر تر، شکست جزئی سد و نهایتاً شکست سد در یک مسیر همگرا-واگرا بررسی شده است. در تمام موارد مدل با ارائه نتایج قابل قبول، مشخصه‌های جریان را شبیه‌سازی نمود.

کلید واژه‌ها: شکست سد، روش عددی پرش قورباغه و لکس، مختصات منحنی الخط، معادله‌های آب‌های کم‌عمق.

نامحدود(بزرگ) حل کرد (Hoayo et al., 2012).

مقدمه

روش تفاضل محدود TVD مرتبه دوم در پژوهشی توسط Ni, Wang و He (2000) برای بررسی جریان ناشی از مسئله شکست سد دوبعدی بر مبنای حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق به کار گرفته شده است. در گسسته‌سازی معادله‌ها از روش مرتبه اول (UP-Wind) و مرتبه دوم لکس-وندورف (Lax-Wendroff) همراه با یک یا دو قید محدودکننده، استفاده شده است. مدل شبیه‌ساز برای حالت دوبعدی ارتقا داده شده و نتایج آن در مدل‌سازی شکست سد جزئی رضایت بخش بوده است. Yu-chuan و XU (2007) به شبیه‌سازی عددی دوبعدی جریان شکست سد در کانال‌های منحنی شکل با استفاده از روش تفاضل محدود گودنوف (Godunov) در سیستم مختصات منحنی-الخط پرداختند. از موفقیت‌های به دست آمده در نتایج این تحقیق توانایی آن در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی جریان ناشی از شکست سد می‌باشد. تحقیق دیگری با هدف ارائه مدل عددی دوبعدی شکست سد میانگین‌گیری شده در عمق در سیستم مختصات منحنی الخط (به

شکست سد پدیده‌ای غیرخطی و وابسته به زمان و مکان است که در گروه جریان‌های غیرماندگار متغیر سریع قرار می‌گیرد. پیش‌بینی مولفه‌های هیدرولیکی آن، شامل عمق و سرعت به دلیل تاثیرگذار بودن در شدت فاجعه شکست، برای مهندسين هیدرولیک همواره حائز اهمیت بوده است. معادله‌های حاکم در علم هیدرولیک برای بررسی این پدیده، معادله‌های آب‌های کم‌عمق (shallow water) می‌باشند (با فرض فشار هیدرواستاتیک در اکثر جریان‌های آزاد و تقریب بوسینسک (Bossinesq)، که این معادله‌ها می‌تواند از معادله‌های ناویراستوکس (Navier-Stokes) به دست آید) (Chauhdry, 2007). با توجه به حساسیت موضوع، تحقیق‌های بسیاری در گذشته بر روی مسئله شکست سد انجام گرفته که در ادامه به مواردی چند اشاره می‌شود. اولین حل صریح شکست سد، به نقل از Hoayo et al. (2012) توسط ریتز (Ritter) در سال ۱۹۸۲ ارائه شد که معادله‌های سنت‌ونانت (Saint. Venant equations) را با صرف نظر از مقاومت هیدرولیکی ناشی از اصطکاک در یک کانال مستطیلی افقی

منظور شبیه‌سازی مرزهای نامنظم) توسط Liu (2012) انجام گرفته است. در روش حجم محدود به کار گرفته شده، روش سیمپل (Simplex) برای انتقال معادله‌های حاکم به دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده است. مزیت این روش عددی آن است که شبکه‌بندی منحنی‌الخط توانسته است مرزهای پیچیده دامنه محاسباتی در حل جریان‌های آشفته پیچیده را به راحتی شبیه‌سازی کند.

مدل تفاضل محدود توسط روش الگوریتم پرش قورباغه (Leap-Frog) با دقت مرتبه دوم در سیستم شبکه جابه‌جا شده بر مبنای معادله‌های آب‌های کم‌عمق برای شبیه‌سازی مسئله شکست سد توسط Lin و Zhang (2015) توسعه داده شده است. مدل مذکور در مقایسه با حل تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی قدرتمند بوده و در به دام انداختن ناپیوستگی امواج شکست سد دقت کافی را دارد.

در تحقیقی توسط Wood و Wang (2015) بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان شکست سد در کانال با خم ۹۰ درجه، با تمرکز بر توسعه حل معادله‌های آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی‌الخط، با استفاده از روش عددی دوبعدی تفاضل محدود ضمنی ADI انجام شده است. مدل ارائه شده برای موارد مختلف از جمله شکست سد در کانال همگرا- واگرا بررسی شده است که تطابق مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی نسبت به روش تی‌وی‌دی مک‌کورمک (Mac-Cormack TVD) بهتر نشان داده شده است و یا در بررسی شکست سد در کانال با زاویه ۴۵ درجه، نتایج حاصل از مدل عددی ADI به‌طور منطقی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. در حالت کلی نتایج مدل برای بالادست و در انحنای کانال رضایت‌بخش است. طرح ADI ارائه شده موج اولیه در کانال و برگشت موج از ناحیه خم ۹۰ درجه را به دام می‌اندازد.

مدل‌سازی دوبعدی شکست سد توسط Golavi (2002) بر مبنای معادله‌های آب‌های کم‌عمق با روش تفاضل محدود ضمنی بیم وارمینگ (Beam-Warming) صورت گرفت، روش مورد استفاده در این تحقیق دارای دقت مرتبه دو در زمان و دقت مرتبه یک در مکان بوده که نتایج آن نشان داد به دلیل کم بودن مرتبه دقت در مکان، در تسخیر شوک ضعیف عمل کرده است.

Bani-Hashemi و Kiyanian (2007) شبیه‌سازی مسئله شکست سد را با ارائه مدل دوبعدی به روش‌های صریح مک-کورمک و فرد (Mac-Cormack and Fread) مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان دهنده دقت مدل در شبیه‌سازی جریان فوق-بحرانی و پرش هیدرولیکی می‌باشد. مدل شبیه‌سازی دوبعدی سیلاب واریزه‌ای در مخازن سدهای تاخیری شکافدار، توسط Bani-Habib و Nazariye (2012) انجام پذیرفت، در این مدل-سازی از الگوی تفاضل محدود مک‌کورمک (Mac-Cormack) برای حالت دوبعدی استفاده شده است، مقایسه نتایج مدل با نتایج

آزمایشگاهی نشان از تطابق خوب آبنمود خروجی از سد شکافدار در مدل عددی و آزمایشگاهی دارد.

Sarveram و Shamsaee (2012) مدل عددی دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد را با استفاده از تقریب معادله‌های آب‌های کم‌عمق به روش احجام محدود و به شکل ضمنی شبه لاگرانژی (Semi-Lagrangian) ارائه دادند. نتایج نشان داد مجموع خطاهای هنجار شده مدل در حدود ۰/۳ می‌باشد که با داده‌های اندازه‌گیری مطابقت خوبی دارد.

Vosoghi-far, Parmas و Razmkhah (2014) مدل عددی دوبعدی برای پدیده شکست سد به روش حجم محدود ارایه دادند که در آن معادله آب‌های کم‌عمق به شیوه مرتبه دوم لوکال لکس فردریش (Local-Lax-Friedrich) برای تسخیر شوک یا ناپیوستگی در شرایط اولیه و ارضای خاصیت ابقایی در چهارچوب روش احجام محدود و شبکه‌بندی ورونوی (Voronoi) ارائه شده است. مدل ارائه شده قادر به مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده با در نظر گرفتن اثر شیب و تسخیر موج شوک است.

مدل‌سازی دوبعدی شکست سد در مختصات کارترین توسط Ghobadian (2015) به روش تفاضل محدود صریح و استفاده توأم از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس (Leap-frag and Lax) از جمله دیگر بررسی‌های در این زمینه است. نتایج تحقیق اذعان می‌دارد که مدل با دقت مناسبی جریان ناشی از شکست سد را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل تحلیلی شبیه-سازی می‌کند.

همان‌گونه که اشاره شد، برای حل معادله‌های حاکم بر پدیده شکست سد، مدل‌های مختلف عددی ارائه شده است که بیشترین این مدل‌ها در مختصات کارترین به پیش‌بینی شکست سد می‌پردازند. اگرچه ساده‌ترین فرم معادله‌های حاکم در مختصات کارترین به دست می‌آید اما در برخورد با محدوده‌های پیچیده لازم است در نزدیکی مرز، میدان جریان به‌صورت پلکانی در نظر گرفته شود. علاوه بر این، برای افزایش دقت محاسبه‌ها بایستی ابعاد شبکه در محل مرز محدوده کوچک باشد تا خطا به حداقل مقدار خود کاهش پیدا کند. همچنین در تمام پله‌های ایجاد شده بایستی شرایط مرزی اعمال گردد که خود از مشکل‌های اصلی این روش است، چراکه مدل عددی باید بتواند در تمامی این مرزها شرط مرزی مناسب را اعمال کند (Hadian and Zarati, 2008). با در نظر گرفتن این مطلب که بیشتر محدوده‌های فیزیکی غیر مستطیلی هستند، اعمال قلمرو محاسباتی مستطیلی (مختصات کارترین) بر چنین محدوده‌هایی و میان‌یابی برای اعمال شرایط مرزی خطاهایی با بیشترین حساسیت‌ها را موجب می‌شود. برای غلبه بر این مشکل از انتقال فضای فیزیکی به فضای محاسباتی توسط دستگاه مختصات منحنی‌الخط (Curvilinear) استفاده می‌شود (Hafman and Chiang, 1996). منفصل‌سازی معادله-های حاکم در سیستم مختصات منحنی‌الخط بر روی شبکه جابه-

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{h-d} \right) + \beta \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{h-d} \right) + fU =$$

$$(3) -g(h-d) \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{(h-d)}{\rho_w} \frac{\partial P_s}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{by}) +$$

$$\bar{\varepsilon}(h-d) \left[\frac{\partial^2 (V/(h-d))}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (V/(h-d))}{\partial y^2} \right]$$

که در این معادله‌ها:

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (4)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\lambda}{8} \rho_w \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{(\eta - d)^2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{C^2}{8g}, \quad C = \frac{(h-d)^{1/6}}{n}$$

$$\bar{\varepsilon} = 0.7 \times u^* (h-d) \quad (6)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}}$$

$$\tau_{sx} = C_f \rho_a W_x W_s \quad (7)$$

$$\beta = \left(1 + \frac{g}{C^2 k^2} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{by} = \frac{\lambda}{8} \rho_w \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{(h-d)^2} \quad (9)$$

$$\tau_{sy} = C_f \rho_a W_y W_s$$

$$(10) \quad C_f = 1.25 \times 10^{-3} W_s^{-0.2} \text{ for } W_s \leq 1 \text{ m/s}$$

$$C_f = 0.5 \times 10^{-3} W_s^{0.5} \text{ for } 1 < W_s < 15 \text{ m/s}$$

$$C_f = 2.6 \times 10^{-3} \text{ for } W_s \geq 15 \text{ m/s}$$

در روابط فوق: U دبی در واحد عرض در جهت x ، V دبی در واحد عرض در جهت y ، $h = h(x, y, t)$ رقوم سطح آب، $d = d(x, y, t)$ رقوم بستر، $\tau_s = \tau_s(x, y, t)$ تنش برشی ناشی از باد، $\tau_b = \tau_b(x, y, t)$ تنش برشی ناشی از زبری بستر، $P_s = P_s(x, y, t)$ فشار اتمسفر، f پارامتر کوریولیس، g شتاب ثقل، ρ_w جرم حجمی آب، ρ_a جرم حجمی هوا، β ضریب اندازه حرکت، W_s تندی باد، W_x و W_y مولفه‌های سرعت باد در جهات X و Y ، ω سرعت زاویه-ای چرخش زمین، ϕ عرض جغرافیایی، κ ثابت ون-کارمن، u^* سرعت برشی، λ ضریب دارسی ویزباخ، C ضریب شزی، n ضریب زبری مانینگ، $\bar{\varepsilon}$ لزجت گردابی میانگین در عمق.

ب- انتقال معادله‌های حاکم به سیستم مختصات منحنی الخط

با توجه به عدم توانایی سیستم مختصات کارتزین در انعکاس مرزهای نامنظم دامنه فیزیکی، در تحقیق حاضر روش سیستم مختصات منحنی الخط به کار برده شده است. این سیستم اولین بار توسط تامسون با محورهای قراردادی ξ و η تعریف شد (Wood and Wang, 2015). با توجه به مطالب ذکر شده، معادله‌های

جا شده هرچند که در مقایسه با سایر سیستم‌های مختصات از پیچیدگی خاصی برخوردار است و معادله‌های منفصل شده ساختار پیچیده و حجیم‌تری به خود می‌گیرند با این وجود در شبیه‌سازی جریان (همانند پدیده شکست سد) در میدان‌های محاسباتی پیچیده مورد نظر این تحقیق از قابلیت بالاتری برخوردار هستند. بدین منظور در این تحقیق مدل کامپیوتری جامع در مختصات مذکور توسعه داده شده است که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح و به‌کارگیری هم‌زمان الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس بر روی شبکه جابه‌جا شده به عنوان یک نوآوری معادله‌های حاکم بر آب-های کم‌عمق در مسئله شکست سد حل گردیدند. این عمل با افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبات و ایجاد ارتباط بیشتر بین آن‌ها بدون استفاده از مستهلک‌کننده‌های مصنوعی باعث می‌شود گردان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی هموار شده و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کمتر شود. در ادامه کاربرد مدل در مسایل مختلف هیدرولیکی علاوه بر شکست سد مورد بررسی قرار گرفت.

مواد روش‌ها

الف- معادله‌های حاکم

همان‌طور که در قبل بیان شد، در مهندسی هیدرولیک معادله‌های آب‌های کم‌عمق به عنوان معادله‌های حاکم، برای مطالعه بسیاری از پدیده‌های فیزیکی از جمله شکست سد کاربرد دارند. این معادله‌ها به شکل دوبعدی با فرض اولیه توزیع فشار هیدرواستاتیک و هم‌چنین سیال غیرقابل تراکم از متوسط‌گیری معادله‌های سه بعدی ناویر-استوکس در عمق حاصل می‌شوند (Alamati and Jafarzadeh, 2009). معادله‌های دوبعدی آب کم‌عمق برای سیال تراکم‌ناپذیر در دستگاه مختصات کارتزین (Cartesian) در راستای محورهای x و y به صورت روابط (1) الی (3) ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{h-d} \right) + \beta \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{h-d} \right) - fV =$$

$$-g(\eta-d) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{(h-d)}{\rho_w} \frac{\partial P_s}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) +$$

$$(2) \quad \bar{\varepsilon}(h-d) \left[\frac{\partial^2 (U/(h-d))}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (U/(h-d))}{\partial x^2} \right]$$

$$h_i + \frac{1}{J} (y_\eta U_\xi - y_\xi U_\eta) + \frac{1}{J} (x_\xi V_\eta - x_\eta V_\xi) = 0 \quad (11)$$

$$U_i + \beta \frac{1}{J} \left[\begin{array}{l} y_\eta \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_\xi - y_\xi \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_\eta + \\ x_\xi \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\eta - x_\eta \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\xi \end{array} \right] - fV = \frac{-(h-d)}{J} \left[\begin{array}{l} g(y_\eta h_\xi - y_\xi h_\eta) + \\ \frac{(y_\eta P_\xi - y_\xi P_\eta)}{\rho_w} \end{array} \right] +$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{J^2} \left\{ C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\xi} - 2C_2 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\eta} + C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right\} \\ \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \bar{\varepsilon}(\eta-d) \times \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{U}{h-d} \right)_\xi [x_\eta(A_1 + B_1) - y_\eta(A_2 + B_2)] \\ + \left(\frac{U}{h-d} \right)_\eta [y_\xi(A_2 + B_2) - x_\xi(A_1 + B_1)] \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$(13) V_i + \beta \frac{1}{J} \left[\begin{array}{l} y_\eta \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\xi - y_\xi \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\eta + \\ x_\xi \left(\frac{V^2}{h-d} \right)_\eta - x_\eta \left(\frac{V^2}{h-d} \right)_\xi \end{array} \right] + fU = \frac{-(h-d)}{J} \left[\begin{array}{l} g(x_\xi h_\eta - x_\eta h_\xi) + \\ \frac{(x_\xi P_\eta - x_\eta P_\xi)}{\rho_w} \end{array} \right] +$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{J^2} \left\{ C_1 \times \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\xi\xi} - 2C_2 \times \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\xi\eta} + C_1 \times \left(\frac{V}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right\} \\ \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + \bar{\varepsilon}(\eta-d) \times \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{V}{h-d} \right)_\xi [x_\eta(A_1 + B_1) - y_\eta(A_2 + B_2)] + \left(\frac{V}{h-d} \right)_\eta [y_\xi(A_2 + B_2) - x_\xi(A_1 + B_1)] \end{array} \right\} \end{array} \right\}$$

ضرایب موجود در روابط (۱۲) و (۱۳) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$A_1 = (y_\eta^2 y_{\xi\xi} - 2y_\xi y_\eta y_{\xi\eta} + y_\xi^2 y_{\eta\eta}), A_2 = (y_\eta^2 x_{\xi\xi} - 2y_\xi y_\eta x_{\xi\eta} + y_\xi^2 x_{\eta\eta}), B_1 = (x_\eta^2 y_{\xi\xi} - 2x_\xi x_\eta y_{\xi\eta} + x_\xi^2 y_{\eta\eta}) \quad (14)$$

$$B_2 = (x_\eta^2 x_{\xi\xi} - 2x_\xi x_\eta x_{\xi\eta} + x_\xi^2 x_{\eta\eta}), C_1 = (x_\eta^2 + y_\eta^2), C_2 = (y_\xi y_\eta + x_\xi x_\eta)$$

بندی میدان محاسباتی انجام شده و در آن مقادیر متریکها و ژاکوبینها در محل گرهها محاسبه می شوند.

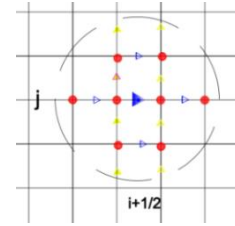
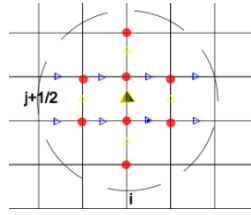
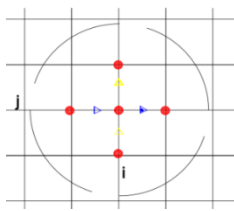
د- منفصل سازی معادله های حاکم به روش تفاضل

محدود (پرش قورباغه و لکس) بر روی مش جابه جا شده
در این تحقیق معادله های حاکم بر روی یک شبکه از نقاط در مختصات منحنی الخط که با فواصل $\Delta\xi$ و $\Delta\eta$ از یکدیگر قرار دارند به روش جابه جا شده منفصل شده اند. روش منفصل سازی، روش صریح پرش قورباغه ای (Leap-Frog) است که از الگوریتم لکس (Lax) نیز بهره می جوید. معادله مومنتم در جهت ξ در گره $(i+1/2, j, n+1/2)$ ، معادله مومنتم در جهت η در گره $(i, j, n+1/2)$ و معادله پیوستگی در گره $(i, j, n+1)$ ؛ منفصل می شوند که نمادهای j, i برای مکان و n برای زمان به کار می رود (شکل ۱). برای نمونه نحوه منفصل سازی هر یک از ترمهای معادله مومنتم در جهت ξ (رابطه ۱۲) در گره $(i+1/2, j)$ شکل (۱- الف) در ادامه آورده شده است. منفصل سازی رابطه پیوستگی و معادله مومنتم در جهت η به روش مشابه انجام شده که به دلیل کاهش حجم مقاله از ارایه آن صرف نظر شده است.

که در معادله های بالا J ژاکوبین $(J = x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta)$ و $x_\xi, y_\xi, x_\eta, y_\eta$ مشتق های تبدیل، متریک های انتقال و یا به صورت ساده تر متریک نامیده می شوند.

ج- شبکه سازی قلمرو محاسباتی معادله های حاکم

حل معادله های جبری حاکم، نیازمند ایجاد شبکه در قلمرو مورد نظر خواهد بود. بنابراین در داخل قلمرو و روی مرزهای آن مجموعه ای از نقاط شبکه باید مشخص شود. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، بیشتر قلمروها غیرمستطیلی هستند و ایجاد شبکه برای آن در مختصات کارتزین ایجاد مشکل خواهد کرد و لذا انتقال فضای فیزیکی به فضای محاسباتی با دستگاه مختصات کلی صورت گرفته و شبکه غیرمستطیلی موجود در فضای فیزیکی را به شبکه یکنواخت مستطیلی در فضای محاسباتی تصویر می کند (Hafman and Chiang, 1996). در این مقاله ابتدا با یک برنامه کامپیوتری شبکه میدان محاسباتی در مختصات کارتزین ایجاد شده است تا مختصات نقاط در قلمرو فیزیکی به دست آید و سپس توسط یک برنامه کامپیوتری دیگر با تبدیل مختصات در دستگاه کارتزین (x, y) به مختصات منحنی الخط (ξ, η) ، شبکه-



ج

ب

الف

شکل ۱- الف) گرهایی که U مومنتم بر آن منفصل می شود ب) گرهایی که V مومنتم بر آن منفصل می شود ج) گرهایی که پیوستگی h بر آن منفصل می شود.

$$U_i = \frac{U_{i+1/2,j}^{n+1/2} - \bar{U}_{i+1/2,j}^{n-1/2}}{\Delta t} \quad (۱۵)$$

$$\beta \frac{1}{J} \left[y_\eta \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_\xi - y_\xi \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_\eta \right] = \beta \frac{y_\eta}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+3/2,j}^{n-1/2} - \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+1/2,j}^{n-1/2}}{\xi_{i,j+1} - \xi_{i,j-1}} \right] - \beta \frac{y_\xi}{J} \quad (۱۶)$$

$$\left[\frac{\left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+3/2,j+1}^{n-1/2} - \left(\frac{U^2}{h-d} \right)_{i+1/2,j-1}^{n-1/2}}{\eta_{i+1,j} - \eta_{i,j}} \right]$$

$$\beta \frac{1}{J} \left[x_\xi \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\eta - x_\eta \left(\frac{UV}{h-d} \right)_\xi \right] = \frac{x_\xi}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i+3/2,j+1} - \left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i+1/2,j+1}}{\eta_{i+1,j} - \eta_{i,j}} + \frac{\left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i+3/2,j-1} - \left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i+1/2,j-1}}{\eta_{i+1,j} - \eta_{i,j}} \right]$$

$$- \frac{x_\eta}{J} \left[\frac{\left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i+3/2,j} - \left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i+3/2,j}}{\xi_{i,j+1} - \xi_{i,j-1}} + \frac{\left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i-1/2,j} - \left(\frac{U^{n-1/2} V^{n-1/2}}{h-d} \right)_{i-2,j}}{\xi_{i,j+1} - \xi_{i,j-1}} \right] \quad (۱۷)$$

$$fV = f \times \frac{1}{4} \left[V_{i,j}^{n-1/2} + V_{i,j-1}^{n-1/2} + V_{i-1,j}^{n-1/2} + V_{i-1,j-1}^{n-1/2} \right] \quad (۱۸)$$

$$\frac{-g(h-d)}{J}(y_{\eta}h_{\xi} - y_{\xi}h_{\eta}) = \left[\frac{y_{\eta}}{J} \left(\frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\xi_{i,j} - \xi_{i-1,j}} \right)^n - \frac{y_{\xi}}{J} \right] \left[\frac{-g(h-d)_{i,j} + g(h-d)_{i-1,j}}{2} \right] \times \left[\frac{\left(\frac{h_{i,j+1} + h_{i-1,j+1}}{2} \right)^n - \left(\frac{h_{i,j-1} - h_{i-1,j-1}}{2} \right)^n}{\eta_{i,j+1} - \eta_{i,j-1}} \right] \frac{-(h-d)}{J} \left[\frac{(x_{\xi}P_{\eta} - x_{\eta}P_{\xi})}{\rho_w} \right] = \quad (19)$$

$$(\star) \left[\frac{-g(h-d)_{i,j} + g(h-d)_{i-1,j}}{2} \right] \times \left[\frac{x_{\xi} \left(\frac{\left(\frac{P_{i,j+1} + P_{i-1,j+1}}{2} \right)^n - \left(\frac{P_{i,j-1} - P_{i-1,j-1}}{2} \right)^n}{\eta_{i,j+1} - \eta_{i,j-1}} \right)}{J} - \frac{x_{\eta} \left(\frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\xi_{i,j} - \xi_{i-1,j}} \right)^n}{J} \right] \quad (20)$$

$$\frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) = \frac{\tau_{sxi,j}}{\rho_w} - \frac{\lambda}{8} \frac{U_{i,j}^{n-1/2} \times \sqrt{\left(U_{i,j}^{n-1/2} \right)^2 + \left(\bar{V}_{i,j}^{n-1/2} \right)^2}}{\left[\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j} + \frac{1}{2}(h-d)_{i,j} \right]} \quad (21)$$

$$(\star\star) \left\{ \frac{1}{J^2} \left\{ C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\xi} - 2C_2 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\eta} + C_1 \times \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right\} + \frac{1}{J^3} \left\{ \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi} \left[x_{\eta} (A_1 + B_1) - y_{\eta} (A_2 + B_2) \right] + \left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta} \left[y_{\xi} (A_2 + B_2) - x_{\xi} (A_1 + B_1) \right] \right\} \right\} =$$

$$\bar{\varepsilon} \left[\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j} + \frac{1}{2}(h-d)_{i,j} \right]$$

$$\times \left[\frac{1}{J^2} \left\{ C_1 \times \left(\left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\xi} \right)_{i+1/2,j}^{n-1/2} - 2C_2 \times \left(\left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi\eta} \right)_{i+1/2,j}^{n-1/2} + C_1 \times \left(\left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta\eta} \right)_{i+1/2,j}^{n-1/2} \right\} + \frac{1}{J^3} \left\{ \left(\left(\frac{U}{h-d} \right)_{\xi} \right)_{i+1/2,j}^{n-1/2} \left[x_{\eta} (A_1 + B_1) - y_{\eta} (A_2 + B_2) \right] + \left(\left(\frac{U}{h-d} \right)_{\eta} \right)_{i+1/2,j}^{n-1/2} \left[y_{\xi} (A_2 + B_2) - x_{\xi} (A_1 + B_1) \right] \right\} \right] \quad (22)$$

$$\bar{U}_{i+1/2,j}^{n-1/2} = 0.25 \times U_{i-1/2,j}^{n-1/2} + 0.5 \times U_{i+1/2,j}^{n-1/2} + 0.25 \times U_{i+3/2,j}^{n-1/2} \quad (23)$$

$$\bar{V}_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} = \frac{1}{4} \left[V_{i,j+1/2}^{n-1/2} + V_{i,j+3/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j+1/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j+3/2}^{n-1/2} \right], \quad \bar{V}_{i+1/2,j-1}^{n-1/2} = \frac{1}{4} \left[V_{i,j-1/2}^{n-1/2} + V_{i,j-3/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j-1/2}^{n-1/2} + V_{i+1,j-3/2}^{n-1/2} \right] \quad (24)$$

سرعت‌های عمود بر مرز به عنوان شرط مرزی خروجی برای مدل تعریف شده است. در مرز خروجی و ورودی سرعت مماس بر صفحه برابر صفر در نظر گرفته شده است. در نقاط فرضی خارج از مرز تقارن عمق جریان و مولفه سرعت موازی با مرز، برابر عمق و سرعت نقاط همسایه داخلی مرز و مؤلفه سرعت عمود بر مرز

۵- شرایط مرزی و پایداری

در مرزهای باز ورودی، در شرایط جریان زیربحرانی دبی و عمق جریان مشخص و در حالت فوق‌بحرانی، دبی و عمق جریان مشخص به -عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای مرز باز خروجی، عمق جریان مشخص و گرادیان صفر برای

بالادست ۶/۴ سانتی متر و در پایین دست ۱۷ سانتی متر لحاظ شده است. گام مکانی در مدل حاضر هفت سانتی متر در جهت طول و یک سانتی متر در جهت عرض در نظر گرفته شده است. این شبیه سازی برای عدد فرود ۲/۳ به منظور مقایسه با نتایج مدل چادری (Chauhdry) انجام شده است. نتایج شبیه سازی مدل عددی چادری (Chauhdry) برای گام مکانی متغیر (۰/۱۵ تا ۰/۶ متر) و توسط روش مرتبه دوم مک کورمک (Mac-Cormack) ارائه شده است.

مقایسه نمودارها در شکل (۲) نشان می دهد که در هر دو مدل وقوع پرش در فاصله نزدیک به ۱/۵ متر از ابتدای کانال رخ داده و در فاصله ۲/۵ متر از ابتدای کانال به اتمام رسیده است. همان طور که در شکل نیز دیده می شود در مدل عددی مک کورمک (Mac-Cormack) پروفیل سطح آب در انتهای پرش و در فاصله ۲/۵ متری از ابتدای کانال دارای نوسان می باشد که با الگوریتم به کار برده شده در تحقیق حاضر و درگیر کردن تعداد نقاط بیشتر در منقل سازی این نوسانات گرفته شده و نتایج به مقادیر اندازه گیری شده بیشتر نزدیک شده و خطای کمتری دارد.

شکست ایده ال در کانال با عمق پایاب

در این مرحله کانالی افقی به طول ۱۰۰ متر بدون اصطکاک با وجود عمق جریان در پایین دست محل سد شبیه سازی شده است (سد در وسط کانال قرار دارد). در ابتدای محاسبه عمق جریان در مخزن سد یک متر و در پایین دست دو سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) منحنی های عمق جریان (h) و دبی در واحد عرض (q) ۱۰ ثانیه پس از شکست سد نشان داده شده است. نتایج مدل حاضر با جواب حل تحلیلی Stocker (1957) مقایسه شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است. به منظور مقایسه، مقادیر عمق و دبی جریان محاسبه شده در محل شکست برای مدل عددی حاضر و روش تحلیلی در جدول (۱) آورده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود مدل عددی نتایج را برای جریان در محل شکست با تقریب خوب و نزدیک به حل تحلیلی ارائه داده است.

تقارن صفر در نظر گرفته شد. در نقاط فرضی خارج از دیوار صلب سرعت عمودی و عمق با تغییر علامت نقاط همسایه داخلی جایگزین شده اند که انعکاس غیرمتقارن حاصل می شود (شرط گرایان صفر) در حالیکه سرعت مماس در نقطه فرضی برابر و هم علامت نقطه همسایه داخلی در نظر گرفته شده است. در مرزهای صلب که دیوار دامنه محاسباتی نسبت به محور افق موازی یا عمود نیست بلکه زاویه θ می سازد، مرزهای انعکاسی در مدل به این ترتیب گنجانده شده است که برآیند بردار سرعت در نقطه مجازی خارج از مرز با بردار سرعت در نقطه داخل مرز موازی دیوار باشد به عبارتی:

$$v = V \sin(2\theta - \alpha), u = V \cos(2\theta - \alpha) \quad (25)$$

که در آن θ زاویه دیوار دامنه محاسباتی نسبت به محور افق، α زاویه بردار سرعت داخل مرز نسبت به افق، V برآیند سرعت در نقاط داخلی، v مولفه عمودی سرعت در نقطه مجازی و u مولفه مماسی سرعت در نقطه مجازی. از آنجائیکه مدل تهیه شده در این تحقیق بر مبنای روش صریح است بنابراین شرط پایداری آن عدد کورانت کمتر از یک می باشد (رابطه ۲۶).

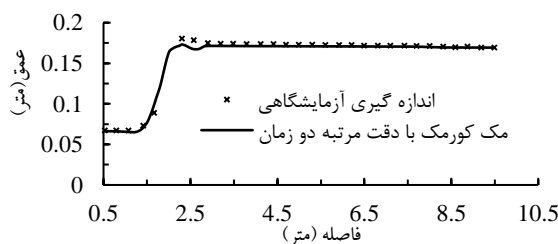
$$C_r = \sqrt{g(h-d)} \frac{\Delta t}{\min(\Delta \xi, \Delta \eta)} \quad (26)$$

نتایج و بحث

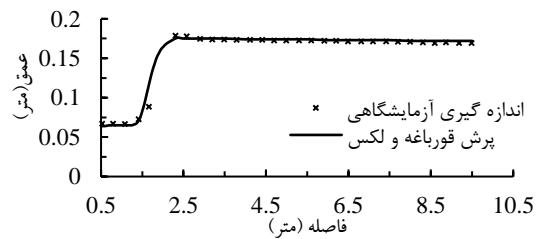
به منظور صحت سنجی مدل حاضر نتایج آن با اندازه گیری های آزمایشگاهی، تحلیلی و یا با نتایج سایر مدل های عددی ارایه شده توسط محققان قبلی مقایسه شد. در ادامه صحت سنجی مدل برای چندین مورد ارایه شده است.

شبیه سازی پرش هیدرولیکی

مقایسه شبیه سازی پرش هیدرولیکی مدل با نتایج مدل Chauhdry (2007) و اندازه گیری آزمایشگاهی در شکل (۲) نشان داده شده است. در این بررسی کانالی به طول ۱۳ متر در نظر گرفته شده است. در ابتدای محاسبات عمق جریان در



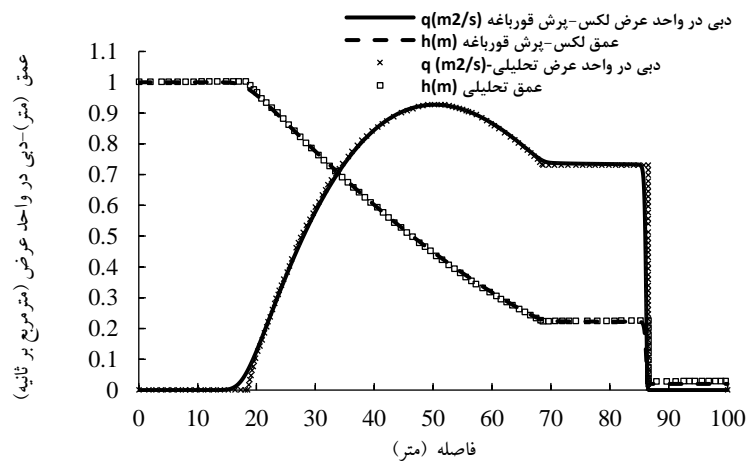
ب



الف

شکل ۲- مقایسه پروفیل پرش هیدرولیکی در الف) مدل عددی حاضر، ب) مدل چادری و اندازه گیری آزمایشگاهی

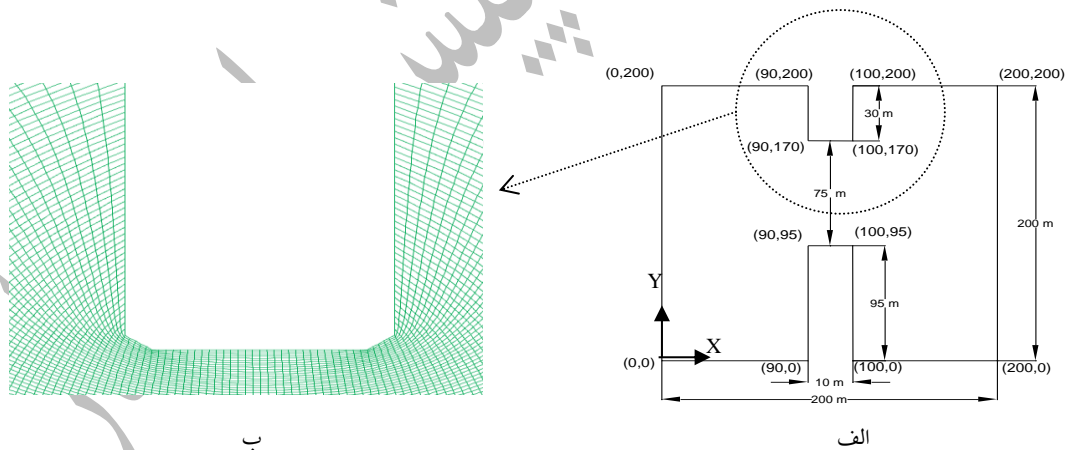
(Chauhdry, 2007).



شکل ۳- مقایسه نتایج شکست ایده آل در کانال با عمق پایاب برای مدل عددی حاضر و حل تحلیلی در شبیه سازی عمق (h) و دبی در واحد عرض (q) ۱۰ ثانیه پس از شکست سد (Stoker, 1957).

جدول ۱- مقایسه عمق و دبی جریان در محل شکست سد در روش عددی و تحلیلی

| روش | دبی جریان (مترمربع بر ثانیه) | عمق جریان (متر) |
|---------------|------------------------------|-----------------|
| تحلیلی | ۰/۹۲۷ | ۰/۴۵ |
| مدل عددی حاضر | ۰/۹۲۷ | ۰/۴۴۹ |



شکل ۴- الف) نمای شماتیک و ب) مش بندی قسمتی از دامنه محاسباتی شکست جزئی سد (الهام گرفته از کانال مورد مطالعه Chauhdry, 2007)

شکست جزئی نا متقارن سد در بستر تر

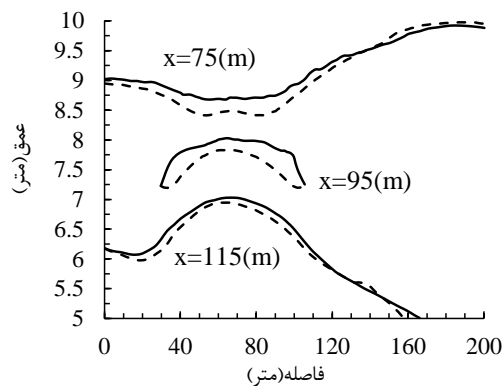
نوع مش (۳۰۱×۳۰۱) و (۴۰۱×۴۰۱) در جهت ξ و η ارایه شده است.

شکل های (۵) و (۶) پروفیل سطح آب مدل عددی حاضر را برای شکست جزئی سد در مقایسه با نتایج بدست آمده از Chauhdry (2007) نمایش می دهند. مقایسه پروفیل های عرضی سطح آب در نقاط بالادست (در فاصله طولی ۷۵ متر)، داخل (در فاصله طولی ۹۵

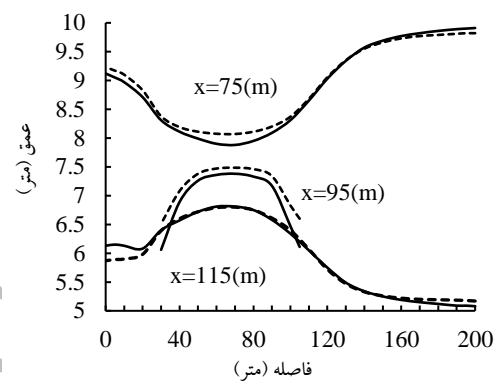
محدوده مورد مطالعه، محدوده در نظر گرفته شده توسط Chauhdry (2007) می باشد. این محدوده متشکل از یک کانال با طول و عرض ۲۰۰ متر است. شکاف غیرمتقارن و بازشدگی درپچه دارای عرض ۷۵ متر می باشد. همچنین دیوار سد دارای ضخامت ۱۰ متر در جهت جریان می باشد. تصویر شماتیک این محدوده و قسمتی از شبکه محاسباتی آن در شکل (۴) ارائه شده است. نتایج برای دو

متر) و پایین دست (در فاصله طولی ۱۱۵ متر) محل شکست در شکل (۵) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل چنانچه مش-بندی محدوده مورد مطالعه ریزتر انتخاب شود نتایج در محدوده بالادست و پایین دست محل شکست با نتایج مدل چادری تطابق بیشتری دارد و بر عکس با انتخاب مش درشت تر نتایج برای محدوده داخل محل شکست با نتایج مدل Chauhdry (2007) سازگارتر خواهد بود. نمودار تغییرات عمق جریان در مقابل زمان پس از شکست سد در دو مکان، پایین دست و در محل شکست سد در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج بدست آمده به ازای مش ریز با نتایج مدل Chauhdry (2007) در این شکل مقایسه شده است که

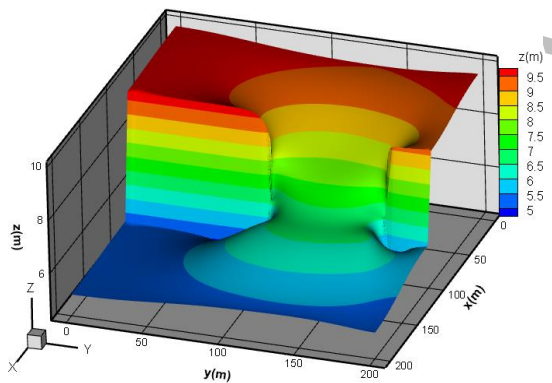
سازگاری نتایج مشهود است. از جمله دلایل اختلاف مدل حاضر با مدل های ارایه شده توسط Chauhdry (2007) می تواند ناشی از نحوه منفصل سازی معادله های حاکم و همچنین مش بندی محدوده مورد مطالعه باشد. مدل حاضر بر خلاف مدل Chauhdry (2007) در مختصات منحنی الخط توسعه داده شده و همان گونه که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است در محل شکست لازم است که برای خطوط عمود برهم پخش زدگی در نظر گرفته شود، که مقدار پخش زدگی در این تحقیق یک متر می باشد. با این کار مقداری انقباض جریان در محل شکست کمتر می شود که می تواند روی نتایج تاثیر گذار باشد.



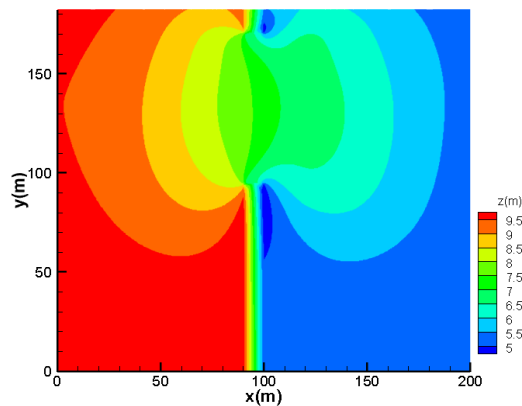
ب



الف

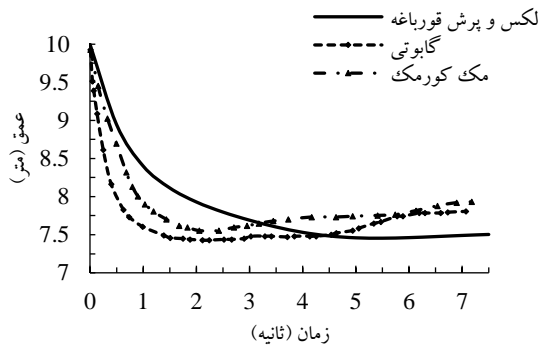


د

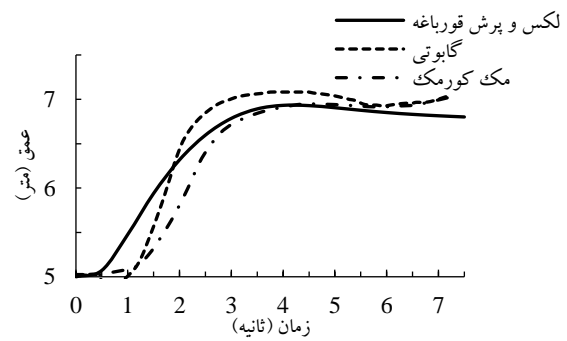


ج

شکل ۵- مقایسه پروفیل عرضی سطح آب: الف) نتایج مدل عددی حاضر (خط چین الگوریتم مش درشت، خط ممتد مش ریز ب) نتایج مدل چادری (خط چین الگوریتم گابوتی (Gabuti)، خط ممتد الگوریتم مک- کورمک (Mac-Cormack)) (Chauhdry, 2007) ج) نمای دو بعدی و د) نمای سه بعدی سطح آب هفت و نیم ثانیه پس از شکست در مدل حاضر



ب



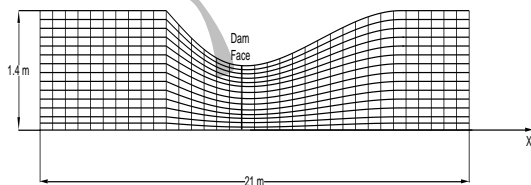
الف

شکل ۶- مقایسه تغییرات رقوم سطح آب در مقابل زمان در شکست جزئی: الف) در پایین دست محل شکست (در فاصله طولی ۱۱۵ متر) ب) در محل شکست (در فاصله طولی ۹۵ متر)

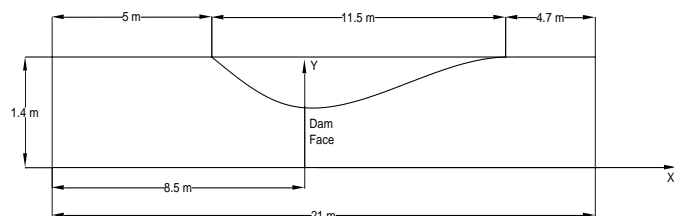
است، که نتایج به تفکیک در شکل (۸) ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، موج منفی در داخل مخزن سد و موج مثبت پایین رونده در کانال پایین دست قابل مشاهده است. پروفیل سطح آب مدل آزمایشگاهی برای زمان‌های مختلف (۲، ۴، ۶، ۱۲، ۲۰، ۶۰) ثانیه ارائه شده است که از مقاله Saulis, Bellos و Sakkas (1992) اقتباس شده است. با مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل (۸) ملاحظه می‌شود که نتایج مدل حاضر با نتایج مدل آزمایشگاهی برای حالت بدون شیب و شیبدار سازگار است. برای مقایسه مقادیر محاسبه شده عمق جریان در محل سد (در فاصله طولی ۸/۵ متر از ابتدای کانال) و مقادیر اندازه‌گیری Saulis, Bellos و Sakkas (1992) به همراه مقدار خطا در جدول (۲) ارایه شده است. با توجه به مقادیر ذکر شده در جدول میانگین خطا در نتایج مدل عددی حاضر نسبت به نتایج اندازه‌گیری Saulis, Bellos و Sakkas (1992) برای کانال بدون شیب کف، ۴/۰۲ درصد و برای کانال با شیب کف یک‌صدم، ۱/۶۵ درصد است.

شکست سد در کانال همگرا- واگرا بدون شیب و شیبدار

به منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی امواج ناشی از شکست سد در محدوده‌هایی که فیزیک آنها بیشتر با مختصات منحنی الخط مطابقت دارد نتایج آن با نتایج مدل آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) مقایسه شده است. بدین منظور کانالی به طول ۲۱ متر به پهنای ۱/۴ متر بدون اصطکاک کف و دیواره‌ها، با شیب کف صفر و یک‌صدم در نظر گرفته شده است. همان گونه که در شکل (۷-الف) نشان داده شده است یک دریاچه در محل انقباض و در فاصله طولی ۸/۵ متر از ابتدای کانال نصب شده است. عمق جریان در بالا- دست دریاچه ۰/۳ متر و در پایین دست بصورت بستر خشک در نظر گرفته شده است. مش‌بندی دامنه محاسباتی با ایجاد شبکه دارای ۴۲۱ گره در جهت ξ و ۵۷ گره در جهت η صورت گرفته است. یک نمونه از مش‌بندی محدوده البته به منظور وضوح بیشتر با شبکه درشت در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. مقایسه مدل عددی حاضر با مدل آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) برای دو حالت کانال با شیب صفر و شیب یک‌صدم صورت گرفته



ب



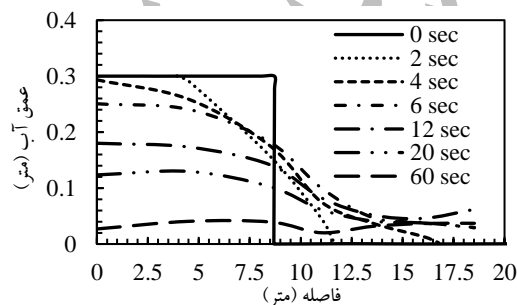
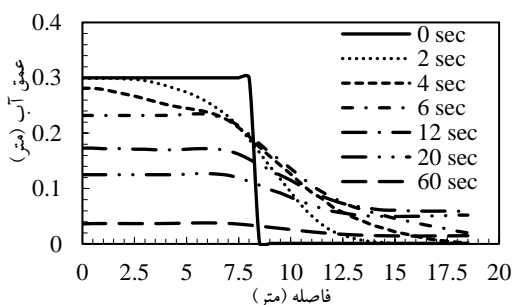
الف

شکل ۷- الف) محدوده مورد مطالعه، فلوم آزمایشگاهی همگرا-واگرا (Bellos, Saulis and Sakas, 1992) ب) نمونه مش بندی محدوده مورد نظر

جدول ۲- رقوم سطح آب (متر) محاسبه شده توسط مدل عددی حاضر و نتایج اندازه گیری Saulis, Bellos (1992) و

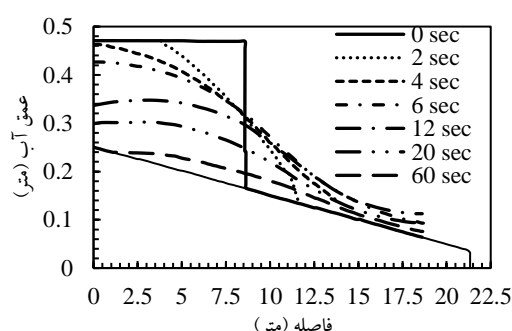
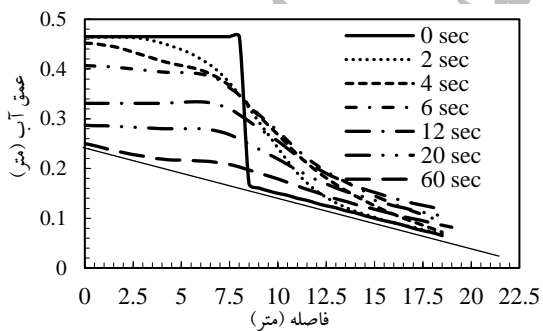
Sakkas در محل شکست

| ۶۰ ثانیه | ۲۰ ثانیه | ۱۲ ثانیه | ۶ ثانیه | ۴ ثانیه | ۲ ثانیه | روش مورد استفاده برای بدست آوردن پروفیل سطح آب |
|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--|
| ۰/۰۳۹۲ | ۰/۱۰۲ | ۰/۱۴۱ | ۰/۱۸۱ | ۰/۱۷۴ | ۰/۱۵۶ | نتایج اندازه گیری (کانال بدون شیب) Bellos, Saulis and Sakkas (1992) |
| ۰/۰۳۴۱ | ۰/۱۰۶ | ۰/۱۴۳ | ۰/۱۸۱ | ۰/۱۷۵ | ۰/۱۶۵ | نتایج مدل عددی حاضر (کانال بدون شیب) |
| ۱۲/۸ | ۳/۹۲ | ۱/۴۲ | ۰/۰ | ۰/۵۷ | ۵/۷۶ | درصد خطا (کانال بدون شیب) |
| ۰/۱۹۵ | ۰/۲۴۸ | ۰/۲۹۶ | ۰/۳۲۰ | ۰/۳۱۶ | ۰/۳۱۴ | نتایج اندازه گیری (کانال با شیب کف یکصدم) Bellos, Saulis and Sakkas (1992) |
| ۰/۱۹۷ | ۰/۲۴۹ | ۰/۲۹۵ | ۰/۳۲۸ | ۰/۳۲۶ | ۰/۳۲۲ | نتایج مدل عددی حاضر (کانال با شیب کف یکصدم) |
| ۱/۰۲ | ۰/۴ | ۰/۳۳ | ۲/۵ | ۳/۱۶ | ۲/۵۴ | خطا (کانال با شیب کف یکصدم) |



ب- نتایج مدل حاضر برای شبیه سازی امواج ناشی از شکست سد در فلوم آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) (شیب کف کانال صفر)

الف- نتایج اندازه گیری مدل آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) (شیب کف کانال صفر)



د- نتایج مدل حاضر برای شبیه سازی امواج ناشی از شکست سد در فلوم آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) (شیب کف کانال یکصدم)

ج- نتایج اندازه گیری مدل آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) (شیب کف کانال یکصدم)

شکل ۸- مقایسه نتایج مدل حاضر و نتایج اندازه گیری مدل آزمایشگاهی Saulis, Bellos و Sakkas (1992) در شبیه سازی عمق آب در شکست سد برای زمان های مختلف.

نتیجه گیری

Fluent، نوسان های سرعت در زمان در نظر گرفته می شود و لازم است معادله ها در گام های زمانی بسیار کوتاه حل شوند، بنابراین محاسبه ها به زمان بسیار زیاد نیاز دارد که در شرایط پیچیده جواب های بهتری می دهد اما برای کارهای مهندسی کاهش زمان محاسبه-

مدل های دوبعدی آب های کم عمق به لحاظ سادگی نسبی و دقت خوبی که در حد نیازهای مهندسی دارند، در طراحی ها و مطالعه ها مورد استفاده فراوان قرار می گیرند. در نرم افزارهایی که شکست سد به صورت سه بعدی شبیه سازی می شود مانند Flow 3D و یا

ها از اولویت‌ها خواهد بود. لذا می‌توان اذعان داشت از مزیت‌های روش مورد استفاده در این مقاله استفاده از فرمول‌بندی ساده با هزینه محاسباتی کم در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی می‌باشد. از سوی دیگر هنگام استفاده از مدل‌های عددی آب‌های کم‌عمق در مختصات کارتزین، در برخورد با هندسه پیچیده لازم است در نزدیکی مرز، میدان جریان به‌صورت پلکانی در نظر گرفته شود و در تمام پله‌های ایجاد شده بایستی شرایط مرزی اعمال گردد که خود از مشکل‌های اصلی این روش است چرا که مدل عددی باید بتواند در تمامی این مرزها شرط مرزی مناسب را اعمال کند. برای غلبه بر این مشکل در این تحقیق فضای فیزیکی به فضای محاسباتی منتقل شده، که این انتقال توسط دستگاه مختصات منحنی‌الخط انجام می‌گیرد. بدین منظور در این تحقیق مدل کامپیوتری در مختصات منحنی‌الخط توسعه داده شد. از روش تفاسیل محدود صریح و استفاده هم‌زمان از الگوریتم پرش قورباغه (Leap-Frog) و لکس (Lax) بر روی مش جابه‌جاشده معادله‌های حاکم بر آب‌های کم‌عمق حل شدند. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شد این عمل تعداد نقاط درگیر در محاسبات را افزایش می‌دهد و با ایجاد ارتباط بیشتر بین آنها گردان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی را هموار می‌نماید و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کمتر می‌شود. کاربرد مدل در مسایل مختلف هیدرولیکی نشان داد:

- ۱- در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی مدل حاضر، محل شروع و خاتمه پرش و همچنین نیم‌رخ سطح آب اندازه‌گیری شده در طول پرش هیدرولیکی را به‌درستی پیش‌بینی می‌نماید.
- ۲- در شبیه‌سازی شکست ایده‌آل بر روی بستر با عمق پایاب مدل عددی حاضر توانایی تقریب جواب حل تحلیلی Stoker (1957) را با دقت بالایی دارد.
- ۳- در شبیه‌سازی شکست جزئی نامتقارن بر روی بستر با عمق پایاب نتایج مدل عددی حاضر با نتایج بدست آمده از مدل‌های Chaudhry (2007) هم‌خوانی دارد. هر چند نتایج هیچ‌کدام از سه الگوریتم گابوتی (Gabuti) و مک-کورمک (Mac-Cormack) (در مدل چادری) و الگوریتم پرش قورباغه-لکس (در تحقیق حاضر) بر هم منطبق نیست ولی هر سه الگوریتم از روند کاملاً یکسانی پیروی می‌کنند.
- ۴- برای رسیدن به هدف اصلی این تحقیق، نتایج مدل در شبیه‌سازی پدیده شکست سد در کانال همگرا-واگرا بدون شیب و شبیدار با نتایج اندازه‌گیری مقاله Saulis, Bellos (1992) و Sakkas مقایسه شد. مشخص گردید مدل عددی با میانگین خطای کمتر از ۵ درصد عمق جریان در محل شکست را تخمین می‌زند.

منابع

- 1- Alamatyian, A. and Jafarzade, M., 2009. Evaluation of turbulence models in simulation of oblique standing shock waves in super-critical channel flow. *Civil Engineering of Sharif University*, pp. 17-27. (In Persian).
- 2- Bani-Habib, A. and Nazariye, F., 2012. Two-dimensional simulation of debris flow in the reservoir of silt detention dam. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 11(39), pp.77-87. (In Persian).
- 3- Bani-Hashemi. And Kiyanian, M., 2007. Two-dimensional model of gradual dam break with freud and mac-cormack method. In *4th Civil Engineering Conference, University of Tehran, Tehran, Iran*.
- 4- Bellos, C.V., Soulis, V. and Sakkas, J.G., 1992. Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30(1), pp.47-63.
- 5- Chaudhry, M.H., 2007. *Open-channel flow*. Springer Science & Business Media.
- 6- Ghobadian, R., 2015. Two dimensional dam break modeling by explicit finite difference method. In *14th Hydraulic Conference, Zahedan University, Zahedan, Iran*.
- 7- Golavi, M., 2002. Two-dimensional dam-break modeling by Beam-Warming method. M.Sc thesis. University of Tehran Iran. (In Persian).
- 8- Hadian, M. and Zarati, A. *Numerical models for shallow waters flows and their applications in river and coastal engineering*. Amir Kabir University of Technology Press. (In Persian).
- 9- Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T., 2000. Computational Fluid Dynamics Volume I. *Engineering Education System, Wichita, Kan, USA*.

- 10-Haoyao, Z., Jinbao, S., Shichen, Z. and Weiwei, S., 2012. Principal component analysis method applying to earthquake-damaged reservoir's comprehensive evaluation. *Procedia Engineering*, 28, pp.548-554.
- 11-Liu, M.Q. and Liu, Y.L., 2012. A 2D Numerical Model for Simulation of Two-Dimensional Circular Dam-Break. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 130, pp. 2993-2996). Trans Tech Publications.
- 12-Sarveram, H. and Shamsaee, A., 2012. Two-dimensional modeling of dam break flow with implicit semi-Lagrangian method. *Iran Water Research*, 7(13), pp. 21-30. (In Persian).
- 13-Stoker, J.J., 1957. *Water Waves: The Mathematical Theory with Applications*. Intersciences.
- 14-Vosoughi-far, H., Parmas,B. and Razmkhah, A, 2014. Presenting a numerical model using solving shallow-water equation to investigate the dam breaking phenomenon. In *11th Civil Conference, Urmia University, Urmia, Iran*.
- 15-Wang, J.S., Ni, H.G. and He, Y.S., 2000. Finite-difference TVD scheme for computation of dam-break problems. *Journal of hydraulic engineering*, 126(4), pp.253-262.
- 16- Wood, A. and Wang, K.H., 2015. Modeling dam-break flows in channels with 90 degree bend using an alternating-direction implicit based curvilinear hydrodynamic solver. *Computers & Fluids*, 114, pp.254-264.
- 17-Yu-chuan, B. and XU, D., 2007. Numerical Simulation of two-dimensional dam-break flows in curved channel. *Journal of Hydrodynamics*, 19 (6), pp.726-735.
- 18- Zhang, Y. and Lin, P., 2015. August. An improved SWE model for simulation of dam-break flows. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 169, No. 6, pp. 260-274). Thomas Telford Ltd.