دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره اول، ۱۳۹۸
۱۵۰-۱۳۱
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2019.15253.3043

بررسی تأثیر ضریب شکل مخزن بر امواج ناشی از شکست سد با استفاده از روش‌های پرش قورباغه و لکس در مختصات منحنی‌الخط

زهرا مهرموسوی[1]، *رسول قبادیان[2] و میترا جوان[3]

[1]دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، [2]دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه،
[3]استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲٤ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲۷

چکیده

سابقه و هدف: پیش‌بینی مؤلفه‌های هیدرولیکی عمق و سرعت به‌دلیل تأثیرگذار بودن در شدت فاجعه شکست سد، برای مهندسین هیدرولیک همواره دارای اهمیت بوده است. در گذشته پژوهش‌های بسیاری به‌منظور بررسی و پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی امواج ناشی از شکست سد با استفاده از روش‌های عددی انجام پذیرفته است. پژوهش حاضر به‌منظور گسترش دامنه پژوهش‌ها در حل عددی عوامل تأثیرگذار در پدیده شکست سد انجام شد. در این پژوهش مدل کامپیوتری جامع در مختصات منحنی‌الخط برای انتقال فضای فیزیکی غیرمستطیلی به فضای محاسباتی توسعه داده شده است که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح و استفاده هم‌زمان از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس بر روی مش جابه‌جاشده معادلات حاکم بر آب‌های کم‌عمق در مسأله شکست سد را حل می‌نماید. این عمل با افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبات و ایجاد ارتباط بیش‌تر بین آن‌ها باعث می‌شود گرادیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی هموارشده و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کم‌تر شود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش معادله‌های موردنظر، معادله‌های حاکم بر آب‌های کم‌عمق می‌باشند که با توجه به عدم توانایی سیستم مختصات کارتزین در انعکاس مرزهای نامنظم دامنه فیزیکی، در سیستم مختصات منحنی‌الخط بر روی شبکه جابه‌جاشده منفصل شده‌اند. روش منفصل‌سازی، روش صریح می‌باشد که به‌صورت هم‌زمان از الگوریتم‌های پرش قورباغه‌ای و لکس بهره می‌جوید.

یافته‌ها: به‌منظور صحت‌سنجی مدل حاضر، مقایسه نتایج آن با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا با نتایج سایر مدل‌های عددی توسط پژوهشگران قبلی برای چندین مورد ارائه شده است. از جمله این موارد شکست ایدئال در کانال با عمق پایاب است که در این حالت نتایج دبی و عمق آب برای شکست سد در کانال افقی به طول ۱۰۰ متر با دقت بالا شبیه‌سازی‌شده است. هم‌چنین شبیه‌سازی شکست سد با مخزن ذوزنقه‌ای با قاعده بزرگ ۲/۰٤ متر، قاعده کوچک ۰/۵۱ متر و ارتفاع ۲/۰۲ متر در کانال با بستر خشک صورت گرفته است و نتایج مدل در دبی و عمق همخوانی

* مسئول مکاتبه: rsghobadian@gmail.com

مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. از جمله دیگر موارد بررسی شده در این پژوهش، شبیه‌سازی شکست نامتقارن در مخزن با طول و عرض یک متر برای سه حالت ضریب شکل مختلف ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ می‌باشد که هیدروگراف دبی و اشل برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی‌شده است. با افزایش ضریب شکل مقادیر دبی و تراز سطح آب به‌دلیل افزایش حجم مخزن افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش مدل عددی در سیستم مختصات منحنی‌الخط با در نظر گرفتن معادلات آب‌های کم‌عمق و استفاده از روش‌های پرش‌قورباغه و لکس به‌صورت هم‌زمان برای پدیده شکست سد ارائه شده است. در شبیه‌سازی شکست ایدئال بر روی بستر با عمق پایاب مدل حاضر توانایی تقریب حل تحلیلی را با دقت بالا دارد. در شبیه‌سازی شکست در مخزن ذوزنقه‌ای بر روی بستر خشک نتایج مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی لازم را دارد. هم‌چنین به‌منظور هدف اصلی پژوهش به بررسی نتایج مدل عددی حاضر برای شبیه‌سازی شکست جزئی نامتقارن سد با ضرایب شکل مختلف (۱، ۱/۲۵ و ۱/۵) مخزن در بستر خشک پرداخته شده است که مشاهده گردید تراز سطح آب با تغییر ضرایب شکل به مقادیر ۱/۲۵ و ۱/۵ در پی تغییر شکل دیواره‌های مخزن نسبت به مخزن ساده با ضریب شکل یک، به‌ترتیب به مقدار ۱۷/۹۸ و ۲۶/۲۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین مقدار دبی در واحد عرض نیز برای مخزن با ضریب شکل ۱/۲۵ و ۱/۵، نسبت به مخزن با ضریب شکل یک به‌ترتیب به مقدار ۲۷/۴۲ و ۴۱/۳۲ درصد افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: روش عددی پرش قورباغه و لکس، شکست سد، ضریب شکل مخزن، مختصات منحنی‌الخط

مقدمه

مطالعات روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد با توجه به خطرات جبران‌ناپذیر آن، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. برای این منظور، پیش‌بینی مؤلفه‌های هیدرولیکی عمق و سرعت به‌دلیل تأثیرگذار بودن در شدت فاجعه شکست، برای مهندسین هیدرولیک همواره دارای اهمیت بوده است. معادلات حاکم، معادلات آب‌های کم‌عمق[1] می‌باشند (این معادلات حاصل دوبعدی‌سازی معادلات ناویراستوکس[2] هستند و برای مدل‌سازی رفتار جریان‌هایی که عمق ناچیزی نسبت به ابعاد دیگر خود دارند، ارائه شده‌اند) (۱۴). با توجه به حساسیت موضوع، پژوهش‌های بسیاری در گذشته بر روی مسأله شکست سد انجام گرفته که در ادامه به مواردی چند اشاره می‌شود. اولین حل صریح شکست سد به نقل از هوآیو و همکاران (۲۰۱۲)، توسط ریتر در سال (۱۹۸۲) ارائه شد که معادلات سنت‌ونانت[3] را با صرف‌نظر از مقاومت هیدرولیکی ناشی از اصطکاک در یک کانال مستطیلی افقی نامحدود(بزرگ) با ارائه نتایج قابل‌قبول حل کرد (۸).

مدل‌های دوبعدی آب‌های کم‌عمق به لحاظ سادگی نسبی و دقت خوبی که در حد نیازهای مهندسی دارند، در طراحی‌ها و مطالعات، از جمله مطالعات شکست سد مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرند (۱۰).

در پژوهشی توسط چیان و دانگ (۲۰۰۷) رودخانه با استفاده از کانال دارای خم با بستر صاف و عرض یکنواخت در سیستم مختصات منحنی‌الخط بر مبنای معادلات آب‌های کم‌عمق دوبعدی مدل‌سازی

1- Shallow water flow equations
2- Navier-Stokes
3- Saint. Venant equations

شده است. معادلات حاکم در دامنه محاسباتی مستطیلی با استفاده از روش تفاضل محدود گودناو[1] (به‌دلیل توانایی آن در به دام انداختن پرش هیدرولیکی ناشی از جریان شکست سد) گسسته‌سازی شده‌اند. مقایسه نتایج به‌دست آمده توسط ایشان با نتایج آزمایشگاهی میلر و چادری برای کانال شبه‌دایره نشان از تطابق نتایج دارد (١٦). در پژوهشی توسط وود و وانگ (٢٠١٥) بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان شکست سد در کانال با خم ٩٠ درجه، با تمرکز بر توسعه حل معادلات آب‌های کم‌عمق در مختصات منحنی‌الخط، با استفاده از روش عددی 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 تی- وی- دی مک‌کورمک[2] بهتر نشان داده شده است و یا در بررسی شکست سد در کانال با زاویه ٤٥ 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 ٩٠ درجه را به دام می‌اندازد (١٥). توانایی شبیه‌سازی عددی جریان شکست سد با حضور مانع در مسیر جریان با استفاده از مدل‌های عددی هیدرودینامیکی میانگین‌گیری شده در عمق (TELEMAC-2D) و سه‌بعدی (FLOW-3D, OpenFOAM) توسط روب و واسکوئز (٢٠١٥) بررسی شده است، نتایج نشان از تطابق خوب مدل‌های ارائه شده با نتایج داده‌های آزمایشگاهی دارد، لازم به ذکر است مدل‌های سه‌بعدی نسبت به مدل میانگین‌گیری شده در عمق با تقریب بهتری عمل می‌کند (١١). مدل تفاضل محدود توسط روش الگوریتم پرش قورباغه با دقت مرتبه دوم در سیستم شبکه جابه‌جا شده بر مبنای معادلات آب‌های کم‌عمق برای شبیه‌سازی مسأله شکست سد توسط ژانگ و لین (٢٠١٦) 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 (١٧).

شبیه‌سازی دوبعدی سیلاب واریزه‌ای در مخازن سدهای تأخیری شکافدار با استفاده از الگوی تفاضل محدود مک‌کورمک، توسط بنی‌حبیب و نظریه (٢٠٠٧) انجام پذیرفت. مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی نشان از تطابق خوب آبنمود خروجی از سد شکافدار در مدل عددی و آزمایشگاهی دارد (٢). مدل‌سازی دوبعدی شکست سد با درنظرگرفتن معادلات آب‌های کم‌عمق به‌عنوان معادلات حاکم، در مختصات کارتزین توسط قبادیان (٢٠١٥) به روش تفاضل محدود صریح و استفاده توأم از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس از جمله دیگر بررسی‌های در این زمینه است. نتایج پژوهش اذعان دارد که مدل با دقت مناسب جریان ناشی از شکست سد را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حل تحلیلی شبیه‌سازی می‌کند (٦).

با توجه به این نکته که عوامل هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، ژئوتکنیکی و هندسی مختلفی، وجود دارند که بر خصوصیات جریان خروجی شکست سد و در ادامه بر روی شدت تخریب آن تأثیر می‌گذارند، لزوم انجام این پژوهش، نیاز به گسترش دامنه پژوهش‌ها در حل عددی عوامل تأثیرگذار در پدیده شکست سد می‌باشد. بنابراین در این بررسی تأثیر ضریب شکل مخزن به‌صورت عددی در پدیده شکست سد مورد توجه قرار گرفته است. هم‌چنین با

1- Godunov
2- TVD Mac-Cormack

توجه به این‌که بیش‌تر قلمروهای فیزیکی غیرمستطیلی هستند و اعمال قلمرو محاسباتی مستطیلی (مختصات کارتزین) بر چنین قلمروهایی به نوعی میان‌یابی برای اعمال شرایط مرزی نیاز دارد که خطاهای قابل‌ملاحظه‌ای را موجب می‌شود، به‌گونه‌ای که در برخورد با هندسه پیچیده باید در نزدیکی مرز، میدان جریان را به‌صورت پلکانی در نظر گرفت و برای افزایش دقت باید ابعاد شبکه در محل مرز کوچک باشد تا خطا به حداقل مقدار خود کاهش پیدا کند. هم‌چنین در تمام پله‌های ایجادشده باید شرایط مرزی اعمال گردد که خود از مشکلات 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 فضای فیزیکی توسط دستگاه مختصات منحنی‌الخط به فضای محاسباتی منتقل شده است. در مدل‌های منحنی‌الخط اگرچه فرمول‌بندی در مقایسه با انواع فرمول‌ها پیچیده‌تر است و معادلات پیچیده می‌شوند، اما میدان محاسباتی ساده‌تر شده و از قابلیت‌های بالاتری برای بررسی مسأله شکست سد برخوردارند. بنابراین در این پژوهش سعی شده است مدل کامپیوتری جامع در مختصات منحنی‌الخط توسعه داده شود که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح و استفاده هم‌زمان از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس بر روی مش جابه‌جاشده معادلات حاکم بر آب‌های کم‌عمق در مسأله شکست سد را حل نماید. این عمل با افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبات و ایجاد ارتباط بیش‌تر بین آن‌ها باعث می‌شود گرادیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی هموار شده و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کم‌تر شود.

مواد روش‌ها

معادلات حاکم: همان‌طور که در قبل بیان شد، در مهندسی هیدرولیک معادلات آب‌های کم‌عمق به‌عنوان معادلات حاکم برای مطالعه پدیده شکست سد کاربرد دارند. این معادلات به شکل دوبعدی با فرض اولیه توزیع فشار هیدرواستاتیک و هم‌چنین سیال غیرقابل تراکم از متوسط‌گیری معادلات سه‌بعدی ناویر–استوکس در عمق حاصل می‌شوند (۱). معادلات دوبعدی آب کم‌عمق برای سیال تراکم‌ناپذیر در دستگاه مختصات کارتزین در راستای محورهای x و y با به‌صورت زیر ارائه می‌شوند (رابطه‌های ۱ تا ۳): (۵ و ۱۲):

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\beta\frac{\partial}{\partial x}(\frac{U^2}{h-d})+\beta\frac{\partial}{\partial y}(\frac{UV}{h-d})-fV=-g(\eta-d)\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{(h-d)}{\rho_w}\frac{\partial P_s}{\partial x}+\frac{1}{\rho_w}(\tau_{sx}-\tau_{bx})+\bar{\varepsilon}(h-d)\left[\frac{\partial^2(U/(h-d))}{\partial y^2}+\frac{\partial^2(U/(h-d))}{\partial x^2}\right] \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\beta\frac{\partial}{\partial x}(\frac{UV}{h-d})+\beta\frac{\partial}{\partial y}(\frac{V^2}{h-d})+fU=-g(h-d)\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{(h-d)}{\rho_w}\frac{\partial P_s}{\partial y}+\frac{1}{\rho_w}(\tau_{sy}-\tau_{by})+\bar{\varepsilon}(h-d)\left[\frac{\partial^2(V/(h-d))}{\partial x^2}+\frac{\partial^2(V/(h-d))}{\partial y^2}\right] \qquad (۳)$$

که در این معادلات:

$$f=2\omega\sin\phi,\;\; \tau_{bx}=\frac{\lambda}{8}\rho_w\frac{U\sqrt{U^2+V^2}}{(\eta-d)^2},\;\; \frac{1}{\lambda}=\frac{C^2}{8g},\;\; C=\frac{(h-d)^{1/6}}{n},\; \overline{\varepsilon}=0.7\times u^*(h-d),\; u^*=\sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_w}}$$

$$\tau_{sx}=C_f\rho_a W_x W_s,\;\; \beta=(1+\frac{g}{C^2\kappa^2}),\;\; \tau_{by}=\frac{\lambda}{8}\rho_w\frac{V\sqrt{U^2+V^2}}{(h-d)^2},\;\; \tau_{sy}=C_f\rho_a W_y W_s$$

$$C_f=1.25\times10^{-3}W_s^{-0.2}\;\; for\;\; W_s\le 1\; m/s,\;\; C_f=0.5\times10^{-3}W_s^{0.5}\;\; for\;\; 1<W_s<15\; m/s$$

$$C_f=2.6\times10^{-3}\;\; for\;\; W_s\ge 15\; m/s$$

که در آن‌ها: U دبی در واحد پهنا در جهت x، V دبی در واحد پهنا 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 مؤلفه‌های سرعت باد در جهات x و y، ω سرعت زاویه‌ای چرخش زمین، ϕ طول جغرافیایی، κ ثابت ون- کارمن، u^* سرعت برشی، λ ضریب دارسی ویزباخ، C ضریب شزی، n ضریب زبری مانینگ، $\overline{\varepsilon}$ لزجت گردابی میانگین در عمق که در این پژوهش به‌منظور تسریع انجام محاسبات از مدل آشفتگی صفر معادله‌ای برآورد شده است، هر چند دقت محاسبات مقداری کاهش خواهد یافت.

انتقال معادلات حاکم به سیستم مختصات منحنی‌الخط: با توجه به عدم توانایی سیستم مختصات کارتزین در انعکاس مرزهای نامنظم دامنه فیزیکی، در پژوهش حاضر تکنیک سیستم منحنی‌الخط به‌کار برده شده است. سیستم مختصات منحنی‌الخط اولین بار توسط تامسون با محورهای قراردادی ξ و η تعریف شد (۱۵). با توجه به مطالب ذکر شده، معادلات حاکم (رابطه‌های ٤ تا ٦) در دستگاه مختصات منحنی‌الخط به‌صورت زیر خواهند بود (۹):

$$h_t+\frac{1}{J}\left(y_\eta U_\xi-y_\xi U_\eta\right)+\frac{1}{J}\left(x_\xi V_\eta-x_\eta V_\xi\right)=0 \qquad (٤)$$

$$U_t+\beta\frac{1}{J}\begin{bmatrix} y_\eta\left(\frac{U^2}{h-d}\right)_\xi-y_\xi\left(\frac{U^2}{h-d}\right)_\eta+ \\ x_\xi\left(\frac{UV}{h-d}\right)_\eta-x_\eta\left(\frac{UV}{h-d}\right)_\xi \end{bmatrix}-fV=\frac{-(h-d)}{J}\begin{bmatrix} g\left(y_\eta h_\xi-y_\xi h_\eta\right)+ \\ \frac{\left(y_\eta P_\xi-y_\xi P_\eta\right)}{\rho_w} \end{bmatrix}+\frac{1}{\rho_w}\left(\tau_{sx}-\tau_{bx}\right)+\overline{\varepsilon}\left(\eta-d\right)$$
$$\times\left\{\frac{1}{J^2}\left\{C_1\times\left(\frac{U}{h-d}\right)_{\xi\xi}-2C_2\times\left(\frac{U}{h-d}\right)_{\xi\eta}+C_1\times\left(\frac{U}{h-d}\right)_{\eta\eta}\right\}+\frac{1}{J^3}\left\{\begin{matrix}\left(\frac{U}{h-d}\right)_\xi\left[x_\eta\left(A_1+B_1\right)-y_\eta\left(A_2+B_2\right)\right] \\ +\left(\frac{U}{h-d}\right)_\eta\left[y_\xi\left(A_2+B_2\right)-x_\xi\left(A_1+B_1\right)\right]\end{matrix}\right\}\right\} \qquad (٥)$$

$$A_1=\left(y_\eta^2 y_{\xi\xi}-2y_\xi y_\eta y_{\xi\eta}+y_\xi^2 y_{\eta\eta}\right),\ A_2=\left(y_\eta^2 x_{\xi\xi}-2y_\xi y_\eta x_{\xi\eta}+y_\xi^2 x_{\eta\eta}\right) B_1=\left(x_\eta^2 y_{\xi\xi}-2x_\xi x_\eta y_{\xi\eta}+x_\xi^2 y_{\eta\eta}\right)$$
$$B_2=\left(x_\eta^2 x_{\xi\xi}-2x_\xi x_\eta x_{\xi\eta}+x_\xi^2 x_{\eta\eta}\right), C_1=\left(x_\eta^2+y_\eta^2\right),\ C_2=\left(y_\xi y_\eta+x_\xi x_\eta\right) \quad (۵-ب)$$

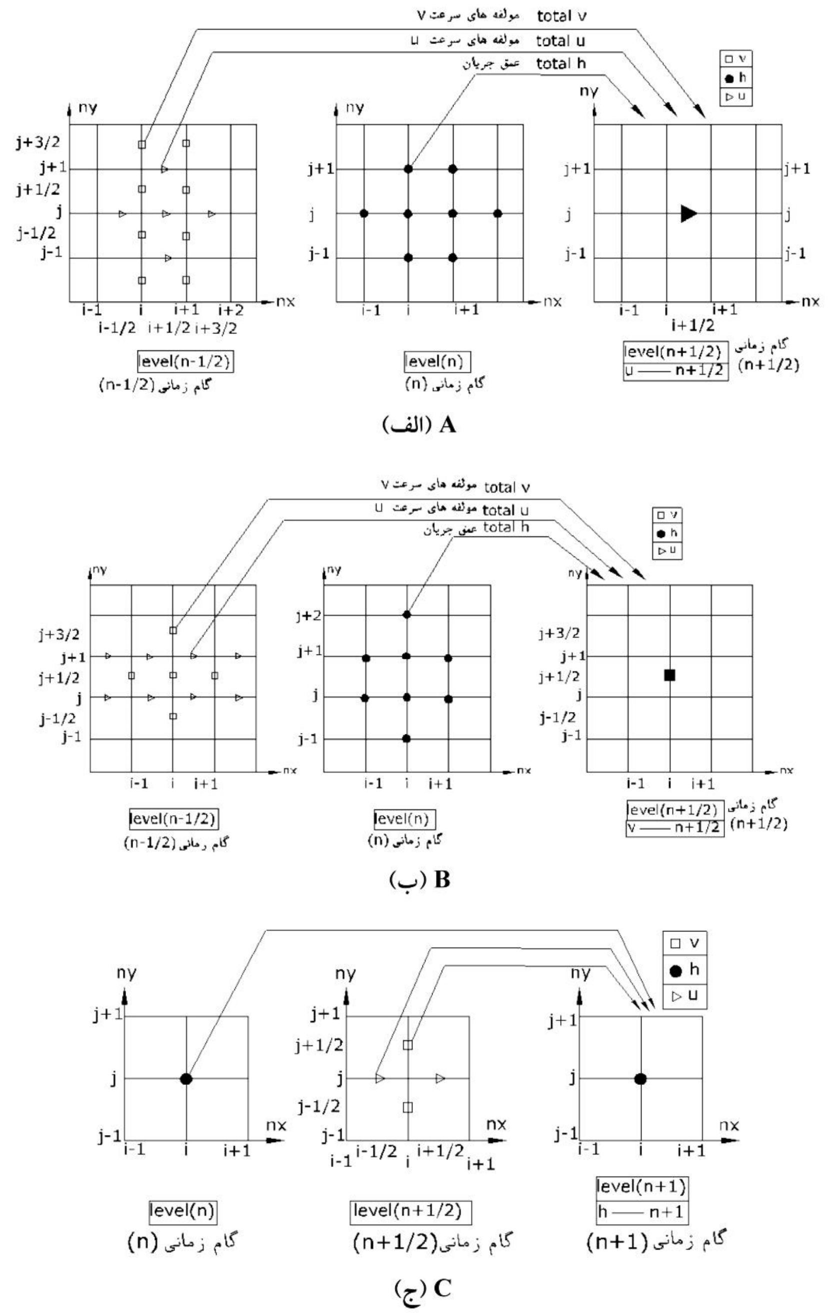
$$V_t+\beta\frac{1}{J}\begin{bmatrix} y_\eta\left(\frac{UV}{h-d}\right)_\xi - y_\xi\left(\frac{UV}{h-d}\right)_\eta + \\ x_\xi\left(\frac{V^2}{h-d}\right)_\eta - x_\eta\left(\frac{V^2}{h-d}\right)_\xi \end{bmatrix}+fU=\frac{-(h-d)}{J}\left[g\left(x_\xi h_\eta-x_\eta h_\xi\right)+\frac{\left(x_\xi P_\eta-x_\eta P_\xi\right)}{\rho_w}\right]+\frac{1}{\rho_w}\left(\tau_{sx}-\tau_{bx}\right)+\bar{\varepsilon}(\eta-d)$$
$$\times\left\{\frac{1}{J^2}\left\{C_1\times\left(\frac{V}{h-d}\right)_{\xi\xi}-2C_2\times\left(\frac{V}{h-d}\right)_{\xi\eta}+C_1\times\left(\frac{V}{h-d}\right)_{\eta\eta}\right\}\frac{1}{J^3}\left\{\left(\frac{V}{h-d}\right)_\xi\begin{bmatrix}x_\eta(A_1+B_1)\\-y_\eta(A_2+B_2)\end{bmatrix}+\left(\frac{V}{h-d}\right)_\eta\begin{bmatrix}y_\xi(A_2+B_2)\\-x_\xi(A_1+B_1)\end{bmatrix}\right\}\right\} \quad (۶)$$

که در معادلات بالا J ژاکوبین $\left(J=x_\xi y_\eta-y_\xi x_\eta\right)$ و x_ξ، y_ξ، η_x، η_Y مشتق‌های تبدیل، متریک‌های انتقال و یا به‌صورت ساده‌تر متریک نامیده می‌شوند.

شبکه‌سازی قلمرو محاسباتی معادلات حاکم: حل معادلات جبری حاکم نیازمند ایجاد شبکه در قلمرو مورد نظر خواهد بود. بنابراین در داخل قلمرو و روی مرزهای آن مجموعه‌ای از نقاط شبکه باید مشخص شود. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، بیش‌تر قلمروها غیرمستطیلی هستند و ایجاد شبکه برای آن در مختصات کارتزین ایجاد مشکل خواهد کرد و بنابراین 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 می‌کند (۹). در این مقاله ابتدا با یک برنامه کامپیوتری شبکه میدان محاسباتی در مختصات کارتزین ایجاد شده است تا مختصات نقاط در قلمرو فیزیکی به‌دست آید و سپس توسط یک برنامه کامپیوتری دیگر با تبدیل مختصات در دستگاه کارتزین (x,y) به مختصات منحنی‌الخط (ξ,η) شبکه‌بندی میدان محاسباتی انجام شده و در آن مقادیر متریک‌ها و ژاکوبین‌ها در محل گره‌ها محاسبه می‌شوند.

منفصل‌سازی معادلات حاکم به روش تفاضل محدود (پرش قورباغه و لکس) بر روی مش جا به جا شده: در این پژوهش معادلات حاکم بر روی یک شبکه از نقاط در مختصات منحنی‌الخط که با فواصل $\Delta\xi$ و $\Delta\eta$ از یکدیگر قرار دارند به روش جابجا شده منفصل شده‌اند. روش منفصل‌سازی، روش صریح پرش قورباغه‌ای است که از الگوریتم لکس نیز بهره می‌جوید. معادله مومنتم در جهت ξ در (i+1/2, j, n+1/2)، معادله مومنتم در جهت η در (i, j+1/2, n+1/2) و معادله پیوستگی در (i, j, n+1) منفصل می‌شوند که نمادهای i, j برای مکان و n برای زمان به‌کار می‌رود (شکل ۱). برای نمونه نحوه منفصل‌سازی هر یک از ترم‌های معادله مومنتم در جهت ξ (رابطه ۵) در گره (i+1/2, j) شکل ۱- الف در ادامه آورده شده است (رابطه‌های ۱۰ تا ۱۷). منفصل‌سازی رابطه پیوستگی و معادله مومنتم در جهت η به روش مشابه انجام شده که به‌دلیل کاهش حجم مقاله از ارایه آن صرف‌نظر شده است.

$$U_t=\frac{U_{i,j}^{n+1/2}-\bar{U}_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t},\quad \bar{U}_{i+1/2,j}^{n-1/2}=0.25\times U_{i-1/2,j}^{n-1/2}+0.5\times U_{i+1/2,j}^{n-1/2}+0.25\times U_{i+3/2,j}^{n-1/2} \quad (۱۰)$$



شکل ۱- (الف)، گسسته‌سازی U مومنتم (ب)، گسسته‌سازی V مومنتم (ج)، گسسته‌سازی معادله پیوستگی.

Figure 1. a) Discretization U-momentum b) Discretiz V-momentum c) Discretization of the continuity equation.

$$\beta\frac{1}{J}\left[y_\eta\left(\frac{U^2}{h-d}\right)_\xi-y_\xi\left(\frac{U^2}{h-d}\right)_\eta\right]=\beta\frac{y_\eta}{J}\left[\frac{\left(\frac{U^2}{h-d}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{3}{2},j}-\left(\frac{U^2}{h-d}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j}}{\xi_{i,j+1}-\xi_{i,j-1}}\right]-\beta\frac{y_\xi}{J}\left[\frac{\left(\frac{U^2}{h-d}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j+1}-\left(\frac{U^2}{h-d}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j-1}}{\eta_{i+1,j}-\eta_{i,j}}\right] \quad (۱۱)$$

$$\beta\frac{1}{J}\left[x_\xi\left(\frac{UV}{h-d}\right)_\eta - x_\eta\left(\frac{UV}{h-d}\right)_\xi\right] = \frac{x_\xi}{J}\left[\frac{\left(\frac{U^{n-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1}\bar{V}^{n-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1}}{\frac{1}{2}(h-d)_{i,j+1}+\frac{1}{2}(h-d)_{i-1,j+1}}\right)}{\eta_{i+1,j}-\eta_{i,j}} + \frac{\left(\frac{U^{n-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j-1}\bar{V}^{n-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j-1}}{\frac{1}{2}(h-d)_{i,j-1}+\frac{1}{2}(h-d)_{i-1,j-1}}\right)}{\eta_{i+1,j}-\eta_{i,j}}\right] \tag{۱۲}$$

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

$$\bar{V}^{n-1/2}_{i+1/2,j+1} = \frac{1}{4}\left[V^{n-1/2}_{i,j+1/2}+V^{n-1/2}_{i,j+3/2}+V^{n-1/2}_{i+1,j+1/2}+V^{n-1/2}_{i+1,j+3/2}\right],\quad \bar{V}^{n-1/2}_{i+1/2,j-1} = \frac{1}{4}\left[V^{n-1/2}_{i,j-1/2}+V^{n-1/2}_{i,j-3/2}+V^{n-1/2}_{i+1,j-1/2}+V^{n-1/2}_{i+1,j-3/2}\right] \tag{۱۲- ب}$$

$$fV = f\times\frac{1}{4}\left[V^{n-1/2}_{i,j}+V^{n-1/2}_{i,j-1}+V^{n-1/2}_{i-1,j}+V^{n-1/2}_{i-1,j-1}\right] \tag{۱۳}$$

$$\frac{-g(h-d)}{J}\left(y_\eta h_\xi - y_\xi h_\eta\right) = \left[\frac{-g(h-d)_{i,j}+g(h-d)_{i-1,j}}{2}\right]\times$$
$$\left[\frac{y_\eta}{J}\left(\frac{h_{i,j}-h_{i-1,j}}{\xi_{i,j}-\xi_{i-1,j}}\right)^n - \frac{y_\xi}{J}\left(\frac{\left(\frac{h_{i,j+1}+h_{i-1,j+1}}{2}\right)^n-\left(\frac{h_{i,j-1}-h_{i-1,j-1}}{2}\right)^n}{\eta_{i,j+1}-\eta_{i.j-1}}\right)\right] \tag{۱۴}$$

$$\frac{-(h-d)}{J}\left[\frac{\left(x_\xi P_\eta - x_\eta P_\xi\right)}{\rho_w}\right]=$$
$$\left[\frac{-g(h-d)_{i,j}+g(h-d)_{i-1,j}}{2}\right]\times\left[\frac{x_\xi\left(\frac{\left(\frac{P_{i,j+1}+P_{i-1,j+1}}{2}\right)^n-\left(\frac{P_{i,j-1}-P_{i-1,j-1}}{2}\right)^n}{\eta_{i,j+1}-\eta_{i.j-1}}\right)}{J}-\frac{x_\eta}{J}\left(\frac{P_{i,j}-P_{i-1,j}}{\xi_{i,j}-\xi_{i-1,j}}\right)^n\right] \tag{۱۵}$$

$$\frac{1}{\rho_w}\left(\tau_{sx}-\tau_{bx}\right) = \frac{\tau^n_{sxi,j}}{\rho_w} - \frac{\lambda}{8}\frac{U^{n-1/2}_{i,j}\times\sqrt{\left(U^{n-1/2}_{i,j}\right)^2+\left(\bar{V}^{n-1/2}_{i,j}\right)^2}}{\left[\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j}+\frac{1}{2}(h-d)_{i,j}\right]} \tag{۱۶}$$

$$\overline{\varepsilon}(h-d)\times\left\{\begin{array}{l}\dfrac{1}{J^2}\left\{C_1\times\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\xi\xi}-2C_2\times\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\xi\eta}+C_1\times\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\eta\eta}\right\}\\ +\dfrac{1}{J^3}\left\{\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\xi}\begin{bmatrix}x_\eta\left(A_1+B_1\right)\\ -y_\eta\left(A_2+B_2\right)\end{bmatrix}+\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\eta}\begin{bmatrix}y_\xi\left(A_2+B_2\right)\\ -x_\xi\left(A_1+B_1\right)\end{bmatrix}\right\}\end{array}\right\}=\overline{\varepsilon}\left[\frac{1}{2}(h-d)_{i+1,j}+\frac{1}{2}(h-d)_{i,j}\right]$$

$$\times\left[\begin{array}{l}\dfrac{1}{J^2}\left\{C_1\times\left(\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\xi\xi}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j}-2C_2\times\left(\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\xi\eta}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j}+C_1\times\left(\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\eta\eta}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j}\right\}\\ +\dfrac{1}{J^3}\left\{\left(\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\xi}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j}\left[x_\eta\left(A_1+B_1\right)-y_\eta(A_2+B_2)\right]+\left(\left(\dfrac{U}{h-d}\right)_{\eta}\right)^{n-1/2}_{i+\frac{1}{2},j}\left[y_\xi\left(A_2+B_2\right)-x_\xi(A_1+B_1)\right]\right\}\end{array}\right] \tag{۱۷}$$

روابط مرزی و پایداری: در مرزهای باز ورودی، در شرایط جریان زیربحرانی دبی جریان مشخص و در حالت فوق بحرانی، دبی و عمق جریان مشخص به‌عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای مرز باز خروجی عمق جریان مشخص و گرادیان صفر برای سرعت‌های عمود بر مرز به‌عنوان 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 مؤلفه سرعت موازی با مرز برابر عمق و سرعت نقاط همسایه داخلی مرز و مؤلفه سرعت عمود بر مرز تقارن صفر در نظر گرفته شد. در نقاط فرضی خارج از دیوار صلب سرعت عمودی و عمق با تغییر علامت نقاط همسایه داخلی جایگزین شده‌اند که انعکاس غیرمتقارن حاصل می‌شود (شرط گرادیان 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 می‌سازد، مرزهای انعکاسی در مدل به‌این‌ترتیب 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:

$$v=V\sin\left(2\theta-\alpha\right),\ u=Vcos(2\theta-\alpha) \tag{۱۸}$$

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 مؤلفه عمودی سرعت در نقطه مجازی و u مؤلفه مماسی سرعت در نقطه مجازی است. از آن‌جائی‌که مدل تهیه‌شده در این پژوهش بر مبنای روش صریح است بنابراین شرط پایداری آن عدد کورانت کم‌تر از یک می‌باشد.

$$C_r=\sqrt{g\left(h-d\right)}\,\frac{\Delta t}{min\left(\Delta\xi,\Delta\eta\right)} \tag{۱۹}$$

نتایج و بحث

به‌منظور صحت‌سنجی مدل حاضر نتایج آن با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا با نتایج سایر مدل‌های عددی توسط پژوهشگران قبلی برای چندین مورد ارائه‌شده در ادامه مقایسه شد. با توجه به اهمیت عدم وابستگی جواب مسأله به‌اندازه مش در شبیه‌سازی عددی، اندازه مش بهینه با استفاده از روش سعی و خطا تعیین گردید بدین‌گونه که مدل برای مش‌های

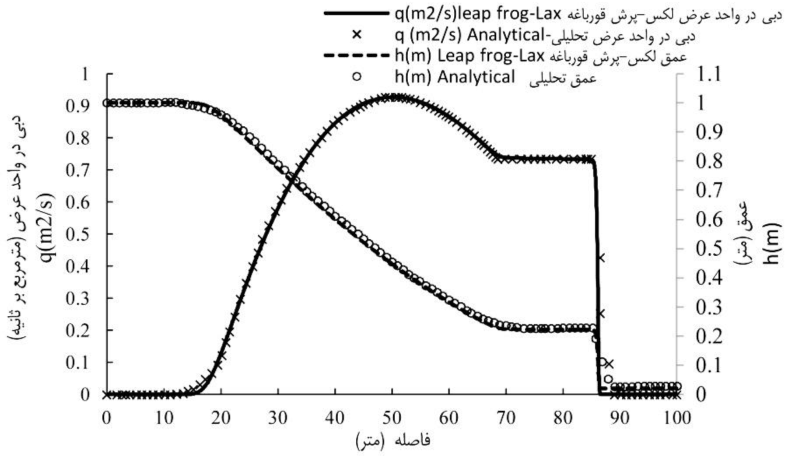
مختلف از بزرگ به کوچک اجرا و سپس مقادیر سرعت یا دبی و پروفیل‌های سطح آب به‌ازای مش‌های مختلف با هم مقایسه شدند و بزرگ‌ترین اندازه مش که بعد از آن با ریز کردن اندازه شبکه تغییرات سرعت و رقوم سطح آب کم‌تر از ۱۰ درصد اختلاف داشت به‌عنوان مش بهینه در نظر گرفته شد.

شکست ایدئال در کانال با عمق پایاب: در این مرحله کانالی افقی به طول ۱۰۰ متر بدون اصطکاک با وجود عمق جریان در پایین‌دست محل سد شبیه‌سازی‌شده است. سد در وسط کانال قرار دارد. در ابتدای محاسبات عمق جریان در مخزن سد یک متر و در پایین‌دست دو سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ منحنی‌های عمق جریان (h) و دبی در واحد عرض (q) ۱۰ ثانیه پس از شکست سد نشان داده شده است همچنین در این شکل نتایج مدل حاضر با جواب حل تحلیلی استوکر (۱۹۵۷) مقایسه شده است. با توجه به نتایج برآورد خطا در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، نتایج مدل حاضر برای عمق جریان در محل شکست، به حل تحلیلی نزدیک است. هم‌چنین ضرایب همبستگی و شیب خط رگرسیون برای پارامترهای مورد محاسبه در این جدول نشان می‌دهد مدل با دقت مناسبی کالیبره شده و توانایی شبیه‌سازی عمق و دبی آب را دارد. چنان‌که مقدار دبی اوج در محل شکست در مدل عددی و در روش تحلیلی مقداری برابر ۰/۹۲۷ و عمق آب در مدل عددی حاضر برابر ۰/٤٤۹ و در روش تحلیلی مقداری برابر با ۰/٤۵ دارد. متوسط خطای نسبی به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{h_m - h_p}{h_m}\right| \qquad (۲۰)$$

که در آن، N تعداد داده‌ها، h_m مقدار عمق آب اندازه‌گیری‌شده و h_p مقدار عمق آب برآورد شده است. متوسط جذر مربعات خطا نیز به‌طور مثال برای عمق آب به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMS = \frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(h_m - h_p\right)^2} \qquad (۲۱)$$



شکل ۲- مقایسه نتایج شکست ایدئال در کانال با عمق پایاب برای مدل عددی حاضر و حل تحلیلی در شبیه‌سازی عمق (h) و دبی در واحد عرض (q) ۱۰ ثانیه پس از شکست سد، استوکر (۱۹۵۷).

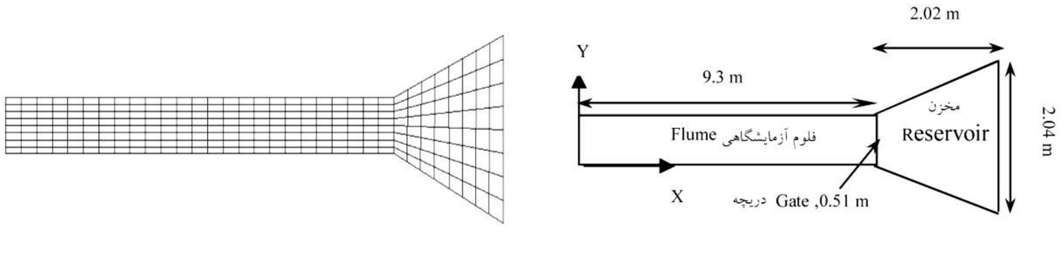
Figure 2. Comparison of the results of the ideal failure in the channel with the tail water depth for the present numerical model and analytical solution in the simulation of depth (h) and flow discharge in unit width (q) 10 seconds after the failure of dam, Stoker (1957).

جدول ۱- مقایسه آماری عمق و دبی محاسبه شده با مقادیر تحلیلی.

Table 1. Comparison of the depth and discharge calculated with analytical values.

پارامتر parameter	ضریب تبیین R^2 Coefficient of determination	شیب خط رگرسیون Slope regression line	متوسط خطای مطلق Ave. absolute error	متوسط جذر مربعات Ave. squared squares
دبی (مترمربع بر ثانیه) Discharge(m^2/s)	0.9995	0.9988	0.0039	0.0000735
عمق (متر) Depth(m)	0.9999	1.006	0.0078	0.0000795

شکست سد با مخزن ذوزنقه‌ای در کانال با بستر خشک: در ادامه برای بررسی توانایی مدل در خصوص شبیه‌سازی امواج ناشی از شکست سد در مخزن تغییر شکل یافته (مخزن ذوزنقه‌ای)، نتایج مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی میرمحمدحسینی و همکاران (۲۰۱٦) مقایسه شد (۱۰). همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، محدوده مورد مطالعه شامل مخزنی با قابلیت شکل‌دهی مختلف و فلوم مستطیل شکل با عرض ۰/۵۱ و طول ۹/۳۰ متر استفاده شده است. شبیه‌سازی در این پژوهش برای مخزن ذوزنقه با قاعده بزرگ ۲/۰٤ متر، قاعده کوچک ۰/۵۱ متر و ارتفاع ۲/۰۲ متر انجام شده است. عمق جریان در بالادست دریچه، داخل مخزن ۰/٤ متر و در پایین‌دست دریچه در فلوم شرایط بستر خشک در نظر گرفته شده است. هم‌چنین ضریب زبری معادل (λ) ۰/۰۱۵ لحاظ شده است. شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با ایجاد ۱۳٦ گره در جهت ξ و ٤۲ گره در جهت η صورت گرفته است (شکل ۳ (ب)). رقوم سطح آب محاسباتی در محل شکست و در فاصله ۸۰ سانتی‌متری از دریچه توسط مدل حاضر و مقادیر آزمایشگاهی در شکل ٤ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشهود است نتایج مدل روند مشابهی با نتایج آزمایشگاهی طی می‌کند و مقدار خطا در نواحی پیک که دارای اهمیت بیش‌تر می‌باشد قابل‌ملاحظه نیست. ضرایب همبستگی و شیب خط رگرسیون برای پارامترهای مورد محاسبه در جدول ۲ نشان می‌دهد مدل با دقت مناسبی کالیبره شده و توانایی شبیه‌سازی عمق و دبی آب را دارد. با توجه به نتایج برآورد خطا در این جدول ملاحظه می‌شود، نتایج مدل حاضر برای عمق جریان در محل شکست، به حل تحلیلی نزدیک است.

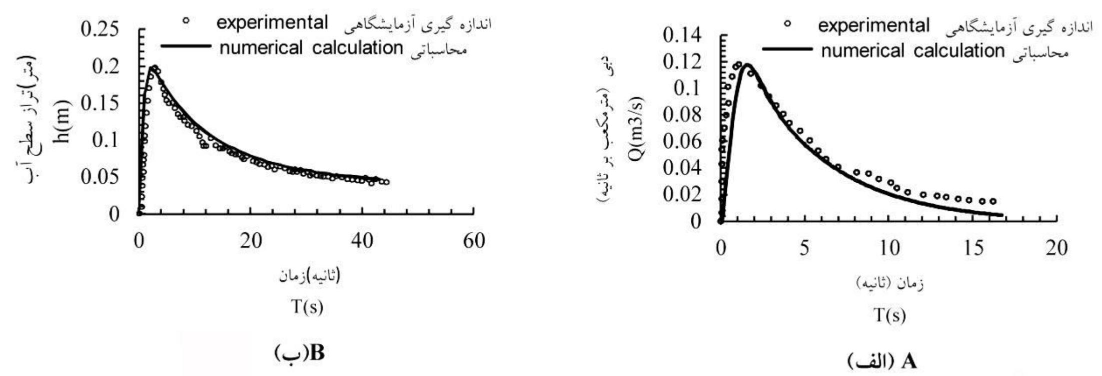


A (الف)

B (ب)

شکل ۳- محدوده مورد مطالعه، مخزن و فلوم مدل آزمایشگاهی میرمحمدحسینی (الف)، طرح شماتیک (ب)، مش‌بندی محدوده با مقیاس بزرگ‌تر (۱۰).

Figure 3. Study area, reservoir and flume of Mirmohammad Hosseini's experimental model (a), Schematic schema (b), mesh with larger scale.



شکل ٤- مقایسه (الف)، هیدروگراف دبی محاسباتی و اندازه‌گیری (ب) تراز سطح آب محاسباتی و اندازه‌گیری در فاصله ۸۰ سانتی‌متری از دریچه در مدل حاضر و مدل آزمایشگاهی میرمحمدحسینی.

Figure 4. Comparison a)experimental and calculating flow discharge hydrograph b) Computational level of water level and measurement in the distance of 80 cm from the valve in the present model and Mirmohammad Hosseini's experimental model.

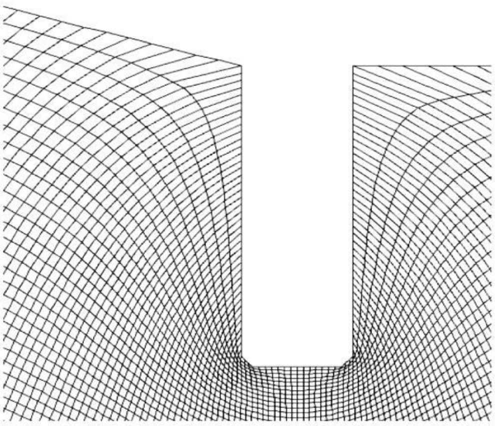
جدول ۲- مقایسه آماری عمق و دبی محاسبه شده با مقادیر آزمایشگاهی.

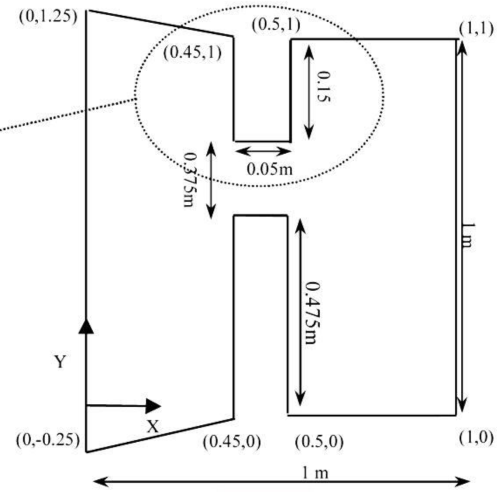
Table 2. Comparison of the depth and discharge calculated with experimental values.

متوسط جذر مربعات Ave squared squares	متوسط خطای مطلق Ave absolute error	شیب خط رگرسیون Slope regression line	ضریب همبستگی R^2 Coefficient of determination	پارامتر parameter
0.0000597	0.000405	1.037	0.972	دبی (مترمربع بر ثانیه) Discharge (m^2/s)
0.00011	0.0068	1.15	0.9966	عمق (متر) Depth (m)

شکست جزئی نامتقارن سد در بستر تر: محدوده مورد مطالعه الهام گرفته از مدل چادری (۲۰۰۷) می‌باشد که متشکل از یک کانال با طول و عرض یک متر با شکاف غیرمتقارن است، بازشدگی دریچه دارای عرض ۰/۳۷۵متر می‌باشد (٤). هم‌چنین دیوار سد دارای ضخامت ۰/۰۵ متر در جهت جریان می‌باشد. دیواره مخزن در پایین‌دست دارای عرض ثابت یک متر است. در حالی‌که برای دیواره مخزن در بالادست سه عرض ۱، ۱/۲۵، ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. تصویر شماتیک محدوده مورد مطالعه و قسمتی از شبکه محاسباتی آن در شکل ۵ ارائه شده است. چنان‌چه ضریب شکل برابر با عرض دیوار بالادست به عرض مخزن در محل شکست در نظر گرفته شود، سه ضریب شکل ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ تعریف می‌شود. عمق جریان ۰/۵ متر در مخزن و پایین‌دست خشک به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. نتایج برای مش ۱۹۱ گره در جهت ξ و ۱۲۱ گره در جهت η ارائه شده است. نیمرخ‌های عرضی سطح آب در نقاط بالادست (x=0.375 m)، محل شکست (x=0.475 m) و پایین‌دست (x=0.575 m) محل شکست به‌ازای سه ضریب شکل مذکور برای زمان یک و نیم ثانیه پس از شکست سد در شکل ٦ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای هر سه ضریب شکل روند تغییرات نیمرخ عرضی سطح آب یکسان است. به‌گونه‌ای که صرف‌نظر از ضریب شکل مخزن نیمرخ عرضی سطح آب برای مقطع عرضی داخل

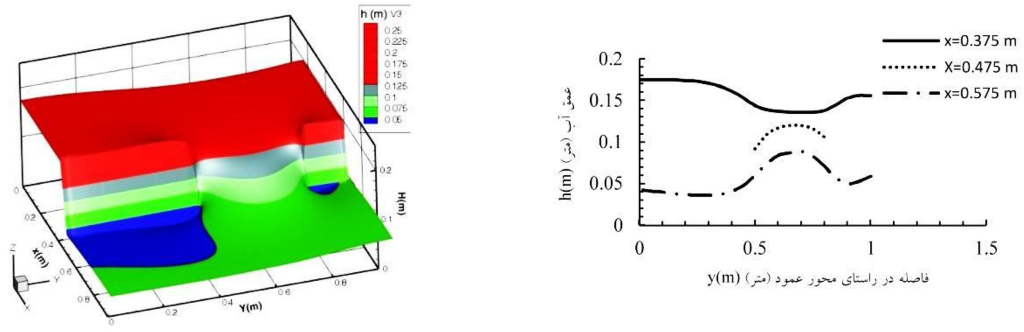
مخزن (x=0.375 m) حالت تقعر به خود می‌گیرد و کم‌ترین رقوم سطح آب در این نمودار در نزدیک به محور طولی شکست (y=0.6625 m) رخ می‌دهد. برای مقاطع عرضی منطبق بر محل دیواره شکست (x=0.475 m) و مقطع عرضی پایین‌دست محل شکست (x=0.575 m) نمودارها حالت تحدب به خود می‌گیرد و حداکثر رقوم سطح آب در این نمودارها در نزدیک محور طولی شکست مشاهده می‌شود. به‌منظور مقایسه بهتر تغییرات وابسته به زمان رقوم سطح آب در سه نقطه در داخل مخزن (x=0.375 m, y=0.6625 m) و در پایین‌دست محل شکست (x=0.575 m, y=0.6625 m) و منطبق بر محل شکست (x=0.475 m, y=0.6625 m) به‌ازای هر سه ضریب شکل مذکور در شکل ۷ نشان داده شده است. در این حالت نیز صرف‌نظر از شکل مخزن در نقطه داخل مخزن در ابتدا رقوم سطح آب به‌شدت و سپس به‌آرامی کاهش می‌یابد. برای نقطه پایین‌دست محل شکست رقوم سطح آب به‌شدت افزایش می‌یابد تا به نقطه اوج برسد و سپس شروع به کاهش می‌کند. برای نقطه منطبق بر محل شکست روند مقداری متفاوت است. در این نقطه ابتدا رقوم سطح آب به‌شدت کاهش و سپس مقداری افزایش می‌یابد. پس از رسیدن به یک نقطه اوج محلی مجدداً شروع به کاهش می‌کند. در شکل ۸ تغییرات دبی جریان در دو نقطه داخل مخزن و پایین‌دست محل شکست در مقابل زمان به‌ازای سه ضریب شکل نشان داده شده است. روند این نمودارها نیز صرف‌نظر از ضریب شکل مخزن تقریباً مشابه است. با این‌وجود دبی اوج نقطه بالادست شکست همواره از نقطه پایین‌دست بیش‌تر است.



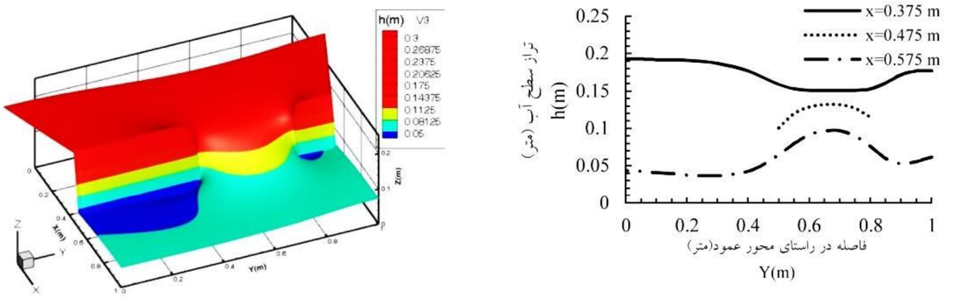


شکل ۵- (الف)، شماتیک محدوده مورد مطالعه برای ضریب شکل ۱/۵ و (ب)، مش‌بندی قسمتی از دامنه محاسباتی.

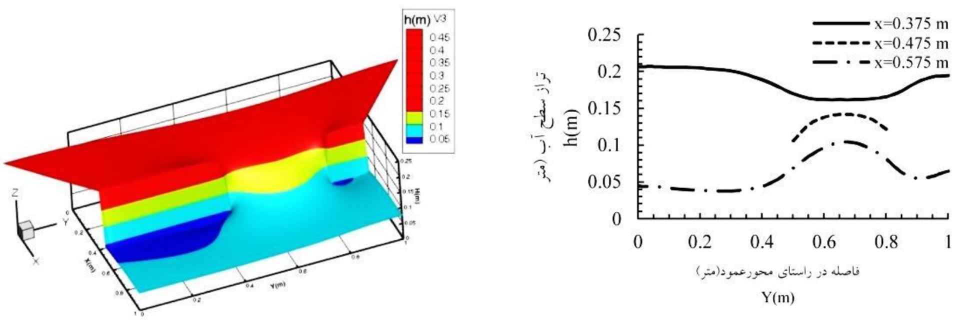
Figure 5. a) Schematic of the studied range for the factor of 1.5 and b) Mesh section of the computational domain.



A(الف)



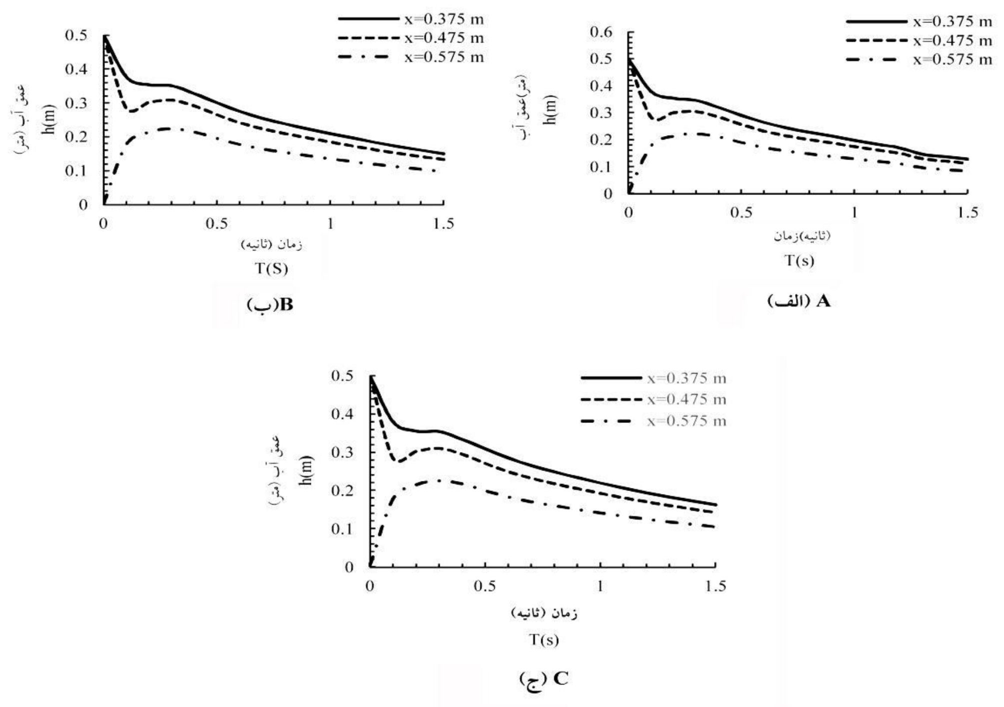
B(ب)



C (ج)

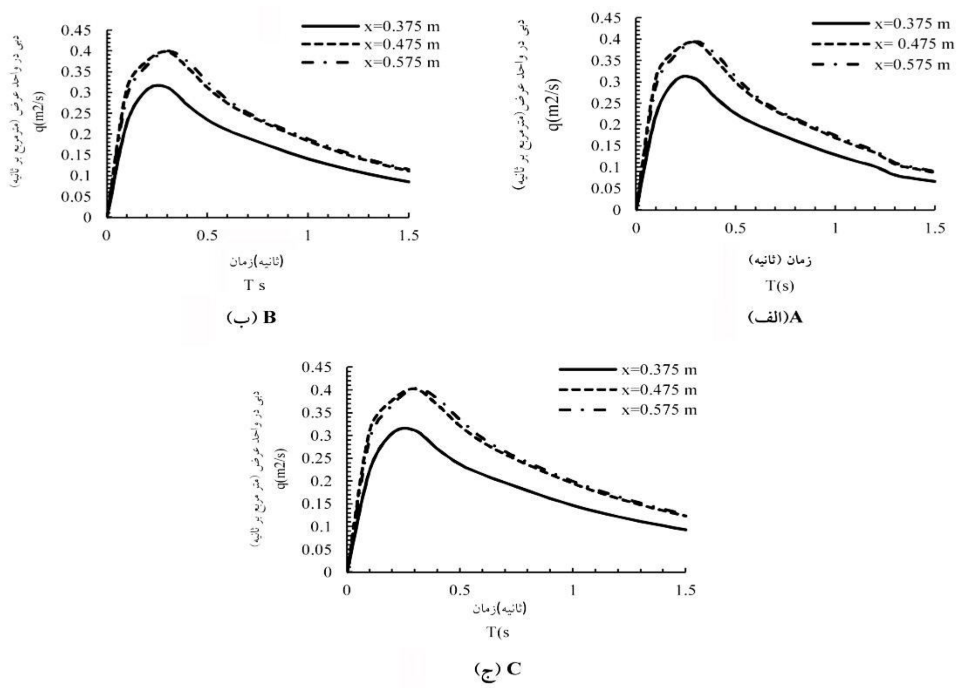
شکل ٦- تأثیر ضریب شکل مخزن بر نیمرخ عرضی سطح آب یک و نیم ثانیه پس از شکست (الف)، مخزن با ضریب شکل یک (ب)، مخزن با ضریب شکل ۱/۲۵ (ج)، مخزن با ضریب شکل ۱/۵.

Figure 6. The effect of the reservoir shape factor on the profile of the water surface 1.5 seconds after the break (a) reservoir with shape factor 1 (b) reservoir with shape factor 1.25 (c) reservoir with shape factor 1.5.



شکل ۷- تغییرات وابسته به زمان عمق جریان در نقاط با x مختلف و Y=0.6625 m بەازای ضرایب شکل مختلف (الف)، مخزن با ضریب شکل یک (ب)، مخزن با ضریب شکل ۱/۲۵ (ج)، مخزن با ضریب شکل ۱/۵.

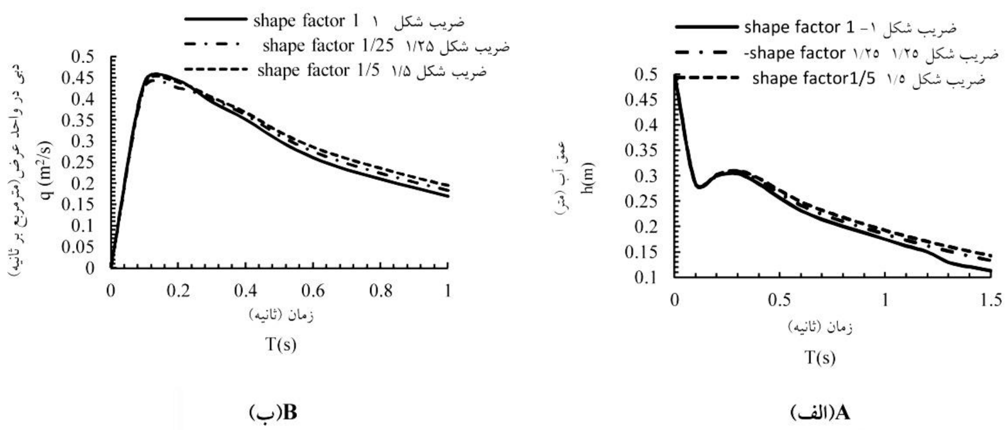
Figure 7. Flow depth-time variations in points with different x and Y=0.6625 m for different shape factor(a) reservoir with shape factor 1 (b) reservoir with shape factor 1.25 (c) reservoir with shape factor 1.5.



شکل ۸- تغییرات وابسته به زمان دبی جریان در واحد عرض در نقاط با x مختلف و Y=0.6625 m بەازای ضرایب شکل مختلف (الف)، مخزن با ضریب شکل یک (ب)، مخزن با ضریب شکل ۱/۲۵ (ج)، مخزن با ضریب شکل ۱/۵.

Figure 8. Flow discharge (in unit width)-time variations in points with different x and Y=0.6625 m for different shape factor (a) reservoir with shape factor 1 (b) reservoir with shape factor 1.25 (c) reservoir with shape factor 1.5.

مطالب فوق نشان داد که شکل مخزن تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای بر روند تغییرات دبی جریان و رقوم سطح آب نسبت به زمان در مکان‌های متناظر ندارد با این‌وجود به‌منظور مقایسه کمی بررسی تأثیر شکل مخزن، در شکل ۹ تغییرات رقوم سطح آب و دبی جریان در مقابل زمان در مرکز دیوار شکست به ازای ضرایب شکل مختلف ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود هرچند افزایش ضریب شکل نقطه اوج هیدروگراف دبی را مقداری افزایش می‌دهد ولی تأثیر فراوان آن بر روی شاخه پایین‌رونده هیدروگراف دبی می‌باشد. به‌گونه‌ای که یک و نیم ثانیه پس از شکست برای مخازن با ضریب شکل ۱/۵ و ۱/۲۵ دبی جریان به‌ترتیب ٤۱/۳۲ و ۲۷/٤۲ درصد در مقایسه با مخزن با ضریب شکل یک افزایش یافته است. روند مشابهی در هیدروگراف اشل (تغییرات رقوم سطح آب نسبت به زمان) دیده می‌شود. در این‌جا نیز بیش‌ترین تأثیر ضریب شکل مخزن بر شکل هیدروگراف اشل در شاخه پایین‌رونده آن مشهود است. به‌گونه‌ای که یک و نیم ثانیه پس از شکست برای مخازن با ضریب شکل ۱/۵ و ۱/۲۵ عمق جریان به‌ترتیب ۲٦/۲۸ و ۱۷/۹۸ درصد در مقایسه با مخزن با ضریب شکل یک افزایش یافته است. در هر دو هیدروگراف دبی و اشل با افزایش زمان پس از شکست سد تأثیر ضریب شکل بر شکل هیدروگراف‌ها بیش‌تر می‌باشد. این افزایش ناشی از آن است که بیش‌تر شدن مقدار ضریب شکل مخزن، حجم آب داخل آن را افزایش داده بنابراین مقدار آب بیش‌تری در انتهای مدت‌زمان ۱/۵ ثانیه در مخزن باقی مانده و به‌تبع آن مقدار دبی خروجی نیز افزایش یافته است.



شکل ۹- تأثیر ضریب شکل مخزن (الف)، بر تغییرات رقوم سطح آب نسبت به زمان در محل شکست (ب)، بر تغییرات دبی در واحد عرض جریان در مقابل زمان در نقطه بالادست شکست.

Figure 9. Effect of reservoir shape factor a) on variation of water surface relative to time at dam break point b) on variation in flow discharge per unit versus time at the top point of dam break.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به تنوع عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات سیلاب ناشی از شکست سد، در این پژوهش به بررسی خصوصیات سیلاب در مخزن تغییر شکل یافته با استفاده از مدل عددی دوبعدی در دستگاه مختصات منحنی‌الخط پرداخته شده است، که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح و استفاده هم‌زمان از الگوریتم پرش قورباغه و لکس بر روی مش جابه‌جاشده معادلات حاکم بر آب‌های کم‌عمق حل شدند. در نرم‌افزارهای Flow3D و یا Fluent

شکست سد به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی خواهد شد، با توجه به این‌که در این نرم‌افزارها نوسانات سرعت در زمان در نظر گرفته می‌شود، لازم است معادلات در گام‌های زمانی بسیار کوتاه حل شده و بنابراین محاسبات به زمان بسیار زیاد نیاز دارد که در شرایط پیچیده جواب‌های بهتری می‌دهد اما برای کارهای مهندسی کاهش زمان محاسبات از اولویت‌ها خواهد بود. بنابراین می‌توان بیان نمود از مزیت‌های روش مورد استفاده در این مقاله استفاده از فرمول‌بندی ساده با هزینه محاسباتی کم در مقایسه با مدل‌های سه‌بعدی می‌باشد. از طرفی با استفاده از این روش، تعداد نقاط درگیر در محاسبات افزایش می‌یابد و با ایجاد ارتباط بیش‌تر بین آن‌ها گرادیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی هموار می‌شود و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی نیز کم‌تر می‌شود. کاربرد مدل در مسایل مختلف هیدرولیکی نشان داد:

۱- در شبیه‌سازی شکست ایدئال بر روی بستر با عمق پایاب مدل عددی حاضر توانایی تقریب جواب حل تحلیلی استوکر (۱۹۵۷) را با دقت بالایی دارد (۱۳).

۲- در شبیه‌سازی شکست در مخزن ذوزنقه‌ای بر روی بستر خشک پایاب نتایج مدل عددی حاضر با نتایج به‌دست آمده از مدل فیزیکی میرمحمدحسینی و همکاران (۲۰۱۶) هم‌خوانی دارد(۱۰).

۳- در بررسی هدف اصلی پژوهش به بررسی نتایج مدل عددی حاضر برای شبیه‌سازی شکست جزئی نامتقارن سد با ضرایب شکل مختلف مخزن در بستر خشک پرداخته شده است. مشاهده گردید تراز سطح آب با تغییر ضرایب شکل در پی تغییر شکل دیواره‌های مخزن، نسبت به مخزن ساده افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین مقدار دبی در واحد عرض برای مخزن با ضریب شکل بزرگ‌تر نسبت به مخزن با ضریب شکل کم‌تر مقداری بیش‌تر است.

منابع

1. Alamatiyan, A., and Jafarzade, M. 2009. Evaluation of turbulence models in simulation of oblique standing shock waves in super-critical channel flow. J. Civil Engin. Sharif Univ. Pp: 17-27. (In Persian)
2. Bani-Habib, A., and Nazariye, F. 2012. Two-dimensional simulation of debris flow in the reservior of silt detention dam. J. Iran-Water. Manage. Sci. Engin. 11: 39. 77-87. (In Persian)
3. Bani-Hashemi, and Kiyanian, M. 2007. Two-dimensional model of gradiual dam break with fread and mac-cormack method. In 4th Civil Engineering Conference, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
4. Chaudhry, M. 2008. Open Channel Flow. University of South Carolina Press. Columbia, 523p.
5. Falconer, R.A. 1992. Research developments of flow and water quality modeling in coastal and estuarine water. Ashugate publishing Co.
6. Ghobadian, R. 2015. Two dimentional dam break modeling by explicit finite difference method. In 14th Hydraulic Conference, Zahedan University, Zahedan, Iran. (In Persian)
7. Hadian, M., and Zarati, A. 2008. Numerical models for shallow waters flows and their applications in river and coastal engineering. Amir Kabir Univ. Press, 293p. (In Persian)
8. HaoyaO, Z., Jinbao, S., Shichen, Z., and Weiwei, W. 2012. Principal Component Analysis Method Applying to Earthquake-damaged Reservoir's Comprehensive Evaluation. Proc. of International Conference of Modern Hydraulic Engineering, 9-11 Mars, Nanjing- Jiangsu Province- China.
9. Hoffmann, K.A., and Chiang, S.T. 2000. Computational Fluid Dynamics Volume I. Engineering Education System, Wichita, Kan, USA, 228p.
10. Mirmohamad Hoseyni, T., Tahershamsi, A., and Mirmohamad Hoseyni, M. 2016. Laboratory study of the effect of reservoir

shape coefficient on flood characteristics due to dam failure. J. Civil Engin. Sharif Univ. 32-2: 1/2. 119-125. (In Persian)

11. Robb, D.M., and Vasquez, J.A. 2015. Numerical simulation of dam-break flows using depth-averaged hydrodynamic and three-dimensional CFD models. J. In 22th Canadian Hydro technical Conference, Montreal, Canada.
12. Sobey, R., Harper, B., and Mitchell, G. 1980. Numerical modeling of tropical cyclone storm surge. Costal Engin. Proc. J. 725-745.
13. Stoker, J.J. 1957. Water Waves the mathematical theory with applications. Interscience Peress, New York.
14. Tarzi, A., and Kermani, M. 2014. Using a natural elemental grid method in solving equations governing free-flowing fluids. J. Hydr. 9: 4. 1-14. (In Persian)
15. Wood, M., and Wang, K. 2015. Modeling dam-break flows in channels with 90 degree bend using an alternating-direction implicit based curvilinear hydrodynamic solver. Computers & Fluids J. 114: 254-264.
16. Yu-chuan, B., and XU, D. 2007. Numerical Simulation of two-dimensional dam-break flows in curved channel. Hydrodynamics J. 19: 6. 726-735.
17. Zhang, Y., and Lin, P. 2016. An improved SWE model for simulation of dam-break flow. Water management-proceeding of institution of civil engineers J. 169: 6. 260-274.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(1), 2019
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2019.15253.3043

Effect of reservoir shape factor on dam-break waves by using of Leap-Frog and Lax methods in curvilinear coordinates

Z. Mehrmousavi[1], *R. Ghobadian[2] and M. Javan[3]
[1]Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Dept. of Water Engineering, Razi University, Kermanshah,
[2]Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Razi University, Kermanshah,
[3]Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah
Received: 06.14.2018; Accepted: 12.18.2018

Abstract

Background and Objectives: Prediction of dam break flood flow characteristic such as water depth and velocities component has always been of interest for hydraulic engineers because of its impact on the severity of the terrible dam break. In the past, many studies have been conducted to investigate the dam-break flood waves hydraulic properties by using numerical methods. Present study performed in order to expand research dominate in numerical solution and factors influencing the dam break phenomenon. In this research, a comprehensive computer model has been developed on curvilinear coordinate in which using the explicit finite difference method and simultaneous use of Leap-Frog and Lax algorithms on the staggered mesh the shallow water equations were solved to simulated dam break problem. The number of involved points in discretization scheme increase by using this method therefore the sharp geometric and hydraulic gradients smooth and the probability of oscillation and divergence decrease without the use of artificial viscosity.

Materials and Methods: The governing equations in the present research are the shallow water equations. Due to the inability of the Cartesian coordinate system to reflect the physical irregular boundaries of domain, the governing equations were discretized on the curvilinear coordinate system. The explicit method and simultaneously utilize of Leap-Frog and Lax algorithms were used to discretization of the governing equations.

Results: In order to validate the present model, the model results were compared to experimental data and the results of other numerical models have been proposed by pervious researchers in several case studies. One of these cases is the ideal dam break in rectangular wide channel with length of 100 m including tail water, the results indicated the water surface profile and flow discharge along the channel at 10 second after dam break, was simulated with a high accuracy. The second case was simulation of the dam break of a trapezoidal reservoir with a large side of 2.04 m, a small side of 0.51 m and a length of 2.02 m connected to dry bed downstream channel with length of 9.3 m and wide of 0.51. The calculated flow and stage hydrographs at dam location were closed to the experimental measured data with reasonable accuracy. The partial asymmetric dam break in wet bed is another case investigated in this study, simulation of stage and discharge hydrographs in asymmetric dam break in a reservoir with a length and width of one meter for three different shape factor of 1, 1.25 and 1.5 was performed in this case. The result indicated that by increasing the shape factor, peak points of stage and discharge hydrographs increase due to increasing of reservoir volume.

* Corresponding Author; Email: rsghobadian@gmail.com

Conclusion: In this research, a numerical model has been developed on curvilinear coordinate in which using simultaneous Leap-Frog and Lax algorithms on the staggered mesh the shallow water equations were solved to simulated dam break phenomenon. In the simulation of the ideal dam break with tail water, the present model ability to approximate the analytical solution is highly accurate. In the simulation of dam break in trapezoidal reservoirs on the dry bed, the results of the present numerical model are in agreement with experimental results, also in studying the main objective of the research, the results of the present numerical model for simulating partial asymmetric dam break with different shape factor (1, 1.25 and 1.5) of reservoir in dry bed have been investigated. It was observed that water surface profile changes by changing the shape factor to 1.25 and 1.5 after changing the shape of the walls of the reservoir compared to the reservoir with the coefficient of 1, it increases by 17.98% and 28.26%, respectively. Also, the amount of discharge flow per unit width for the reservoir with a coefficient of 1.25 and 1.5, compared to the reservoir with coefficient 1 was increased by 27.24% and 41.32%, respectively.

Keywords: Curvilinear coordinate, Dam break, Leap-Frog and Lax methods, Shape factor of reservoir