

## شبیه‌سازی عددی انتشار موج ناشی از شکست سد به صورت دو بعدی قائم

بایرامعلی محمدنژاد<sup>۱</sup>، محمدابراهیم فاطمی کیا<sup>۲</sup>، جواد بهمنش<sup>۳\*</sup> و مجید منتصری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

شکست سد همواره به عنوان یک حادثه با مخاطرات فوق‌العاده تلقی شده و مطالعه آن در تحقیقات دانشگاهی، برنامه‌ریزی دولت و سرمایه‌گذاری در پایاب سدها اهمیت به‌سزایی دارد. در این مقاله، شکست سد و انتشار موج ناشی از آن با استفاده از روش عددی حجم محدود به صورت دو بعدی قائم شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌سازی عددی شکست سد در دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب و بر اساس اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی، مدل‌های مختلف آشفتگی شامل  $k-\varepsilon$ ،  $k-\varepsilon$  RNG،  $k-\varepsilon$  Standard، RSM، Realizable و  $k-\omega$ ، طرح‌های پیشرو مرتبه اول، پیشرو مرتبه دوم، Quick و Power Law انجام شده و پس از آزمون صحت و دقت مدل، برای شیب‌های بستر ۰، ۱٪ و ۲٪ و زبری‌های مختلف بستر شامل ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۵، ۰/۰۱۸۵، ۰/۰۱۹۸، مدل‌سازی و نتایج حاصل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان دادند که مدل عددی مورد استفاده، توانایی شبیه‌سازی شکست سد را در دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب داشته و نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نماید.

**واژگان کلیدی:** شکست سد، شبیه‌سازی عددی، موج، نرم‌افزار فلوئنت.

### ۱- مقدمه

دارد. Hassanzadeh [۷] در یک تحقیق دیگر جریان متغیر سریع غیر دائمی ناشی از شکست سد در یک کانال مستطیلی افقی بدو خشک را از نقطه نظر تئوری و تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات در دو حالت کانال صاف و زبر انجام و نتایج با راه حل تحلیلی ریتز و درسلر مقایسه شده است. وی دریافت که ناحیه پیشانی موج نسبت به مقاومت در مقابل جریان بسیار حساس بوده و سرعت واقعی آن به طور محسوسی از مقادیر تئوری ریتز کمتر است و داده‌های تجربی کانال زبر با تئوری درسلر همخوانی خوبی داشته است. Tawatchai و همکاران [۸] یک مدل هیدرودینامیکی دو بعدی در پلان را برای شبیه‌سازی موج ناشی از شکست سد برای بستر خشک و تحت شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی توسعه دادند. در یک تحقیق دیگر، حسن‌زاده و همکاران [۹] تأثیر شیب بستر را در روند تحلیل مسأله شکست سد مورد بررسی قرار داده و تغییرات سرعت موج را نسبت به زمان و مکان به صورت بی‌بعد ارائه دادند. Zhou و همکاران [۱۰] جریان شکست سد در هندسه طبیعی با توپوگرافی بستر پیچیده را به صورت عددی و با استفاده از روش گودانوف<sup>۱</sup> شبیه‌سازی نمودند.

بیش از یک قرن است که دانشمندان پدیده شکست سد را با جدیت دنبال می‌کنند. مدل‌های عددی تحلیل سیلاب ناشی از شکست سد با استفاده از معادلات آب کم عمق و غالباً به صورت یک بعدی توسعه یافته‌اند. به جرأت می‌توان گفت مطالعات اولیه در این زمینه در سال ۱۸۹۲ برای کانال‌های بدون اصطکاک توسط Ritter انجام گرفته است [۱]. پس از وی دستاوردهای Dressler برای کانال‌های زبر [۲] و نیز معادلات Stoker از اهمیت به‌سزایی برخوردار هستند [۳]. در چند دهه اخیر پیشرفت‌های چشم‌گیری در زمینه مدل‌سازی عددی پدیده شکست سد صورت گرفته است.

Bellos و همکاران [۴] یک مدل دو بعدی برای شبیه‌سازی موج سیل ناشی از شکست سد را با روش مک کورمک دو مرحله ای به کار بردند. حسن‌زاده [۵] ارتفاع و سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد محاسبه شده با روش مشخصه را با داده‌های تجربی مقایسه نموده و نتیجه گرفت که انطباق خوبی بین داده‌های تجربی و روش‌های تحلیلی وجود دارد. Zhang و همکاران [۶] یک مدل یک بعدی ضمنی را برای حل مسئله شکست سد در یک بستر خشک و تر توسعه داده و نشان دادند نتایج حاصل از مدل با داده‌های آزمایشگاهی موجود تطابق رضایت بخشی

شده در عمق می‌باشد. در مدل عددی ناپیر-استوکس سطح مشترک آب و هوا با روش حجم سیال (VOF) طراحی شده برای دو یا چند سیال مخلوط نشدنی که تنها یک سیال تراکم پذیر می‌باشد، به دست می‌آید. بنابر این، این روش برای توصیف مسئله سطح آزاد کاملاً مناسب می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که نگرش آب کم عمق، حتی اگر قادر باشد به قدر کافی جنبه‌های اصلی جریان سیال را تولید کند، جزئیات جریان در عمق و بعضی از پدیده‌های سه‌بعدی جریان را از دست می‌دهد؛ زیرا در مدت زمان کوتاه بعد از باز شدن دریچه، در واقع جریان به طور عمده تحت تأثیر شتاب ثقل بوده و فرض جریان متغیر تدریجی درست نمی‌باشد. حسن‌زاده و خجسته [۱۸]، با بررسی اثرات زبری بستر بر سرعت انتشار امواج حاصل از شکست سد، دریافتند که با افزایش زبری بستر سرعت پیشانی امواج مثبت و خشک کننده به طور محسوسی کاهش یافته و موج خشک کننده از یک سو با تأخیر زمانی نسبت به موج مثبت منتشر شده و از سوی دیگر سرعت آن به مراتب کمتر از سرعت پیشانی موج مثبت است. Chang و همکاران [۱۹] یک مدل عددی بدون شبکه را برای بررسی شکست سد توسط معادلات آب کم عمق آب (SWE) در کانال‌های باز یک بعدی با بستر خشک و مرطوب پیشنهاد دادند. این مدل عددی معادلات آب کم عمق را بر اساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) حل می‌نمود. Bellos و همکاران [۲۰] انتشار موج سیلاب ناشی از شکست یک سد بتنی را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی به این نتیجه رسیدند که مدل عددی می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیزی جریان را بر روی کف مستطیلی و بدون هیچ ملاحظه پیچیده‌ای شبیه‌سازی کند. Xue و همکاران [۲۱] جریان شکست سد را با مخازن متوالی در یک فلوام شیشه‌ای با شیب کف تند به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این بررسی یک سری سد در داخل فلوام آزمایشگاهی و روی بستر با شیب کف تند برای مقایسه خصوصیات جریان شکست سد تحت شرایط شکست آبی و کامل سدهای متوالی ایجاد شدند و تأثیر تغییرات عمق آب مخزن و فاصله سدها، بر روی پارامترهای جریان شکست بررسی شد. به علاوه، یک شکست کامل و آبی از یک سد منفرد و سدهای متوالی مطالعه شد. Chen و همکاران [۲۲] یک مدل سه بعدی بر پایه معادلات رینولدز غیر ماندگار برای شبیه‌سازی جریان شکست سد و نیروی ضربه‌ای وارد شده بر موانع یکنواخت موجود در مسیر جریان را بررسی کردند. جوزدانی و کبیری سامانی [۲۳] ضمن مدل‌سازی

Paster و همکاران [۱۱] کاربرد معادلات آب کم عمق و ناپیر-استوکس برای حل مسئله شکست سد را با استفاده از روش المان‌های محدود مقایسه کردند. Mambretti و همکاران [۱۲] برای پیش‌بینی حرکت سیلاب و جریان گل‌آلود یک مدل عددی بر پایه معادلات یک بعدی سنت و نانت توسعه دادند. این تکنیک برای تعیین نحوه انتشار و پروفیل موج جریان دو فازی گل‌آلود ناشی از شکست کامل و آبی یک سد مخزنی استفاده شده است. برای اعتبارسنجی مدل، نتایج مدل عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی جریان‌های رسوبی همگن در یک فلوام آزمایشگاهی مقایسه و انطباق رضایت بخشی بین نتایج ملاحظه شده است. حسن‌زاده و همکاران [۱۳]، جریان غیر دائمی ناشی از شکست سد و نیار تحت سناریوهای شکست فرضی روگذری جریان و رگاب را با مدل Hec-Ras تحلیل و پهنه سیلاب ناشی از شکست سد را تعیین نمودند. Roshandel و همکاران [۱۴] حل عددی معادلات آب کم عمق را با استفاده از روش حجم محدود برای شبیه‌سازی شکست سد بر روی بستر خشک و مرطوب انجام دادند و به منظور حل مسئله ریمان از حل کننده تقریبی رو استفاده نمودند. نتایج حاصل نشان داده‌اند که خسارت به امکانات پایین دست و زمین‌های کشاورزی در بستر مرطوب بیشتر از بستر خشک می‌باشد. Biscarini و همکاران [۱۵] شبیه‌سازی عددی جریان سطح آزاد ناشی از شکست سد را با دو رویکرد حل معادلات آب کم عمق و معادلات کامل سه‌بعدی ناپیر-استوکس مورد مقایسه نمودند. روش‌ها در سه حالت شکست سد در یک بستر مسطح و بدون اصطکاک، یک پله مثلثی در کف و پیچ ۹۰ درجه مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج نشان دادند که روش آب‌های کم عمق، حتی اگر به اندازه کافی قادر به نشان دادن جنبه‌های اصلی جریان باشد، اما برخی از پدیده‌های سه‌بعدی جریان را با توجه به نادیده گرفتن پارامترهای سه‌بعدی مربوط به نیروی ثقل از دست می‌دهد. Singh و همکاران [۱۶] یک مدل عددی دو بعدی را بر پایه حل معادلات آب کم عمق برای شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از شکست سد توسعه داده و مدل عددی را با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی کردند که تطابق خوبی بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی مشاهده شد. Francesco و همکاران [۱۷] شبیه‌سازی عددی جریان‌های ناشی از شکست سد و مقایسه نگرش آب کم عمق (SW) با شبیه‌سازی کامل سه‌بعدی را بررسی کردند. شبیه‌سازی سه بعدی بر اساس حل کامل معادلات ناپیر استوکس با روش حجم سیال (VOF) می‌باشد. روش عددی آب کم عمق (SW) بر پایه هیدرودینامیک جریان متوسط‌گیری

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{u_i}{x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_{x_i} + \mathcal{G} \nabla^2 u_{x_i} \quad (2)$$

که در روابط بالا،  $u_i$  مؤلفه سرعت لحظه‌ای در جهت  $x_i$ ،  $\mathcal{G}$  لزجت سینماتیکی سیال،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $g_i$  مؤلفه شتاب ثقل و  $p$  عبارت فشار در هر نقطه از سیال می‌باشد.

در تحلیل عددی جریان آشفته می‌توان از روابط فوق استفاده نمود، مشروط بر این که بتوان نوسانات نامنظم، لحظه‌ای و اتفاقی کمیت‌های میدان جریان را در هر لحظه و هر نقطه مدل نمود. اما چنانچه مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار یا هر کمیت دیگری مانند  $\phi$  به مقادیر متوسط و زمانی تفکیک شوند. در این صورت روابط زیر برقرار هستند:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (3)$$

$$p = \bar{p}_i + p_i' \quad (4)$$

$$\phi_i = \bar{\phi}_i + \phi_i' \quad (5)$$

که متوسط این کمیت‌ها بر حسب  $\phi_i$  چنین تعریف می‌گردد:

$$\bar{\phi}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \phi_i \Delta t \quad (6)$$

که در آن،  $\Delta t$  گام زمانی است که نوسانات اتفاقی آشفته را بیان می‌کند و به اندازه کافی بزرگ می‌باشد؛ ولی در مقایسه با زمان لازم برای جریان دائمی کوچک است.

با جایگزینی روابط فوق در معادلات پیوستگی، تغییری ایجاد نمی‌شود؛ ولی در معادلات مومنتم پارامتر  $u_i' u_j'$  اضافه می‌شود. معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

معادله مومنتم:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (v \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \bar{u}_i u_j') \quad (8)$$

آزمایشگاهی پدیده شکست سد، با استفاده از روش پردازش تصاویر به بررسی مشخصات هیدرولیکی سیلاب ناشی از شکست سد پرداختند. آزمایشات آن‌ها در دو حالت بستر خشک و بستر مرطوب در پایین‌دست دریچه صورت گرفته و نتایج اولیه در قالب فیلم ثبت و سپس به تصویر تبدیل شده‌اند. با توجه به پروفیل‌های پیشروی جریان دریافتند که در آزمایشات با بستر خشک در پایین‌دست، موج شکل گرفته حالت هموار دارد و بدون تشکیل جت قارچی به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. با افزایش عمق آب در پایین دست دریچه، حالت هموار موج از بین می‌رود و جریان با تشکیل نوساناتی در سطح حرکت می‌کند. با افزایش عمق آب در پایین دست دریچه، حالت هموار موج از بین می‌رود و جریان با تشکیل نوساناتی در سطح حرکت می‌کند. همچنین جت ایجاد شده با تشکیل یک پیشانی قارچی شکل به سمت پایین‌دست پیشروی می‌کند که این حالت با افزایش نسبت عمق آب در سراب به عمق آب در پایاب دریچه افزایش می‌یابد. وجود آب در کانال پایین‌دست دریچه بر تراز آب بیشینه اثر می‌گذارد، به نحوی که با افزایش عمق آب در پایاب برای آزمایشات با عمق ثابت آب در بالادست دریچه، افزایش در تراز بیشینه آب در کانال پایین‌دست دیده می‌شود. Khankandi و همکاران [۲۴] اثرات هندسه مخزن بر جریان ناشی از شکست سد را به صورت آزمایشگاهی و با شکل‌های مختلف مخزن طولانی، عریض، دوزنقه‌ای و خم ۹۰ درجه مورد بحث قرار دادند. مشاهدات نشان دادند که اثرات دو بعدی جریان در مخازن عریض و دوزنقه‌ای قابل توجه بوده ولی در مخازن طولانی و خم ۹۰ درجه جریان یک بعدی می‌باشد.

در این مقاله سعی شده است تا به کمک نرم‌افزار فلوئنت و استفاده از روش‌های عددی و حل معادلات ناویر-استوکس به شبیه‌سازی موج مثبت حاصل از شکست سد در حالت دو بعدی قائم با در نظر گرفتن مدل‌های آشفتگی مختلف و پارامترهای فیزیکی و عددی مؤثر بر این پدیده پرداخته شود.

## ۲- معادلات حاکم و روش حل آن‌ها

### ۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان‌های غیر دائمی سیالات از جمله پدیده شکست سد، همان معادلات ناویر-استوکس هستند که بر اساس قانون بقا ماده و مومنتم پایه‌گذاری می‌شوند. این معادلات برای حالت سه بعدی و برای سیال تراکم‌ناپذیر شامل معادله پیوستگی (رابطه (۱)) و معادله مومنتم به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۵]:

تعدادی از مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در مدل فلوئنت اشاره شده است.

### ۲-۲-۱- مدل‌های صفر معادله‌ای

در این مدل‌ها هیچ گونه معادله دیفرانسیلی برای کمیت‌های آشفتگی ارائه نمی‌شود. این مدل‌ها نسبتاً ساده بوده و داده‌های تجربی و آزمایشگاهی در این مدل‌ها نقش اساسی داشته و تنش‌های آشفتگی در هر جهت متناسب با گرادیان سرعت می‌باشند.

نمونه‌هایی از این مدل‌ها عبارتند از:

- لزجت گردابه‌ای ثابت
- مدل طول اختلاط
- مدل لایه برشی آزاد پرانتل

### ۲-۲-۲- مدل‌های یک معادله‌ای

در مدل‌های یک معادله‌ای، بر خلاف مدل‌های صفر معادله‌ای، از یک معادله برای انتقال کمیت آشفتگی استفاده می‌شود. این معادله در واقع ارتباط بین مقیاس سرعت نوسانی و کمیت آشفتگی است، که در آن جذر انرژی جنبشی آشفتگی ( $\sqrt{k}$ ) به عنوان مقیاس سرعت در حرکت آشفتگی مد نظر بوده و مقدار آن توسط معادله انتقال محاسبه می‌گردد. لزجت گردابه‌ای توسط رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$v_i = c_{\mu} l \sqrt{k} \quad (9)$$

که در رابطه فوق،  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی،  $l$  طول اختلاط پرانتل و  $c_{\mu}$  یک ضریب ثابت می‌باشد.

این مدل‌ها برای جریان‌های با عدد رینولدز بالا بهتر جواب می‌دهند و در تعیین زیرلایه لزج کنار دیواره ناتوان هستند [۲۵].

### ۲-۲-۳- مدل‌های دو معادله‌ای

ساده‌ترین مدل آشفتگی کامل، مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آن‌ها حل دو معادله انتقال جداگانه اجازه می‌دهد تا سرعت آشفتگی و مقیاس‌های طول به طور مستقل تعیین شوند. از کاربردی ترین مدل‌های دو معادله‌ای، می‌توان مدل  $k-\epsilon$  را نام برد که در این تحقیق از این مدل هم استفاده شده است. شکل-های متفاوتی از مدل  $k-\epsilon$  ارائه شده است. معادلات  $k-\epsilon$  برای بسیاری از جریان‌های لایه مرزی دو بعدی روی دیواره، جریان

پارامتر  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  تنش رینولدز است که بر سیال عمل کرده و اثر گردابه‌های آشفتگی را در سیال اعمال می‌کند. در اکثر جریان‌های آشفتگی، مقدار تنش رینولدز بسیار بیشتر از تنش ناشی از لزجت مولکولی  $v \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$  است. تعیین پارامتر تنش برشی رینولدز مشکل می‌باشد که بدین منظور از مدل‌های آشفتگی متفاوتی استفاده می‌گردد.

### ۲-۲-۲- مدل‌های آشفتگی

جریان آشفتگی با نوسان میدان‌های سرعت توصیف می‌شود. این نوسانات مقادیر انتقال یافته مانند مومنتم، انرژی و غلظت مواد را ترکیب نموده و باعث نوسان مقادیر انتقال یافته می‌شود. از آن جا که این نوسانات می‌توانند در مقیاس کوچک و فرکانس بالا باشند، بنابر این شبیه‌سازی مستقیم آن‌ها در محاسبات مسائل کاربردی مهندسی بسیار پرهزینه می‌باشد. در عوض، با متوسط‌گیری از معادلات حاکم می‌توان مقیاس‌های کوچک را حذف نموده و در نتیجه مجموعه‌ای اصلاح شده از معادلات، که از نظر محاسباتی ارزان‌تر هستند، را حل نمود. با این حال، معادلات اصلاح شده شامل متغیرهای مجهول اضافی بوده و برای تعیین این متغیرها نیاز به استفاده از مدل‌های آشفتگی است [۲۵].

بنابر این مدل‌های آشفتگی برای بستن تنش رینولدز آشفتگی در معادلات حاکم و به منظور حل میدان جریان آشفتگی مورد نیاز هستند. در این صورت در حالت جریان دو بعدی با وجود سه معادله (یک معادله پیوستگی و دو معادله مومنتم)، سه مجهول میدان جریان (یعنی سرعت‌های جریان در جهت  $x$  و  $z$  و فشار) معین می‌شوند. عبارات‌های آشفتگی در معادلات بر اساس یک سری معادلات جبری یا معادلات دیفرانسیل تعیین می‌شوند.

متأسفانه هیچ مدل آشفتگی واحد جهانی به عنوان مدل برتر قابل قبول برای همه مسائل وجود ندارد. انتخاب مدل آشفتگی به یکسری ملاحظات مانند فیزیک حاکم بر جریان، تجارب عملی مشخص شده برای یک کلاس خاص از مسائل، سطح دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی و مقدار زمان در دسترس برای شبیه‌سازی بستگی دارد. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل در عمل، نیاز به درک قابلیت‌ها و محدودیت‌های مختلف مدل‌های آشفتگی است.

مدل‌های آشفتگی کلاسیک بر مبنای معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر-استوکس می‌باشند. این مدل‌ها بر اساس تعداد معادلات دیفرانسیلی و فرضیات ساده کننده و جزئیات مورد انتظار از میدان جریان تقسیم‌بندی می‌شوند که در زیر به

بر خلاف مدل استاندارد، که در آن به منظور تعیین اعداد آشفتگی پراوتل از اعداد ثابت تعریف شده توسط کاربر استفاده می‌شود، یک رابطه تحلیلی به کار می‌رود. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد. به همین دلیل این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان، در میدان‌های دارای انحناء یا پیچیدگی هندسی بیشتر استفاده می‌شود.

#### ۲-۲-۶- مدل $k-\varepsilon$ محسوس (Realizable $k-\varepsilon$ )

در مدل  $k-\varepsilon$  محسوس، که به نسبت در سال‌های اخیر توسعه یافته است، دو تفاوت عمده نسبت به مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد لحاظ شده است؛ تا از ایجاد عدم پایداری در حل معادلات، به خصوص در قسمت زیرلایه ناحیه لایه مرزی که میزان کرنش تولیدی در آن زیاد می‌باشد، جلوگیری نماید. این تفاوت‌ها عبارتند از:

- مدل  $k-\varepsilon$  محسوس حاوی یک فرمول جدید برای لزجت گردابه‌ای آشفته ( $\mu_t$ ) است.

- یک معادله انتقال جدید برای نرخ اتلاف  $\varepsilon$ ، از یک معادله دقیق انتقال بر اساس میانگین مربعات نوسانات چرخش استخراج شده است.

این مدل در جریان‌های دارای لایه مرزی، جریان چرخشی، جریان تحت گرادیان معکوس فشار، جدایی جریان، جت‌های صفحه‌ای و دایره‌ای و ... نسبت به سایر مدل‌های رایج  $k-\varepsilon$  نتایج بهتری ارائه نموده است.

#### ۲-۲-۷- مدل آشفتگی $k-\omega$

مدل  $k-\omega$  استاندارد در فلوننت بر پایه مدل  $k-\omega$  ویلکوکس، که شامل اعمال اثرات اعداد رینولدز پایین، تراکم‌پذیری سیال و جدایی جریان برشی می‌باشد، بنا شده است. مدل ویلکوکس نرخ جدایی جریان برشی را به نحوی پیش‌بینی می‌کند که با نتایج اندازه‌گیری نقاط جدایی جریان، لایه‌های مخلوط و جت‌های صفحه‌ای، دوار و شعاعی بسیار تطابق خوبی داشته و به این ترتیب برای جریان‌های دیواری محدود و جریان برشی آزاد قابل کاربرد است. در مدل  $k-\omega$  متغیر (نرخ استهلاک انرژی مخصوص) به صورت  $\omega = \varepsilon/k$  تعریف شده است.

#### ۲-۲-۸- مدل تنش رینولدز $\gamma$ معادله‌ای

مدل تنش رینولدز (RSM)، شش معادله انتقال برای شش مؤلفه تنش رینولدز و یک معادله انتقال برای نرخ استهلاک انرژی جنبشی را حل می‌کند. این مدل آشفتگی به علت حل

های داخل مجاری، جریان‌های برشی آزاد، جریان‌های گردابه‌ای، لایه مرزی سه بعدی، جت‌ها و ... با موفقیت به کار رفته‌اند. با این همه کاربرد، محدودیت استفاده از این مدل در همسان بودن لزجت گردابه‌ای برای تمام تنش‌های رینولدز در این مدل می‌باشد. به همین دلیل در جریان‌های دارای انحناء و لایه برشی نازک، این مدل ضعیف می‌باشد.

در نرم‌افزار فلوننت سه حالت مختلف مدل  $k-\varepsilon$  وجود دارد:

- مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد (Standard  $k-\varepsilon$  Model)

- مدل  $k-\varepsilon$  حالت RNG (RNG  $k-\varepsilon$  Model)

- مدل  $k-\varepsilon$  محسوس (Realizable Model)

کلیه مدل‌های  $k-\varepsilon$  دارای فرم یکسانی می‌باشند. اما تفاوت

اساسی این مدل‌ها در موارد زیر است:

- روش‌های محاسبه لزجت گردابه‌ای ( $\mu_t$ )

- اعداد آشفتگی پراوتل که بر معادلات  $k$  و  $\varepsilon$  حاکم می‌باشد.

- عبارت‌های چشمه و چاه در معادله  $\varepsilon$ .

#### ۲-۲-۴- مدل $k-\varepsilon$ استاندارد

مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد فلوننت از زمان پیشنهاد لندر و اسپالدینگ تبدیل به مدلی پرکاربرد در محاسبات بسیاری از جریان‌های کاربردی مهندسی شده است. پایداری، محاسبات کم هزینه و دقت مناسب این مدل برای طیف گسترده‌ای از جریان‌های آشفته باعث محبوبیت آن در حل جریان‌های صنعتی و شبیه‌سازی انتقال حرارت شده است. این مدل نیمه تجربی بوده و استخراج معادلات آن متکی بر ملاحظات پدیده‌شناختی و تجربه‌گرایی است. در استخراج این معادلات چنین فرض شده است که جریان کاملاً آشفته بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز باشد. مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۲-۲-۵- مدل $k-\varepsilon$ حالت RNG

با توجه به این که نقاط قوت و ضعف مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد شناخته شده است، توسعه مدل به منظور بهبود عملکرد آن انجام شده است. بر این اساس دو نوع توسعه یافته از این مدل در فلوننت در دسترس می‌باشد که یکی از آن‌ها مدل  $k-\varepsilon$  حالت RNG است. در این روش آشفتگی جریان بر اساس یک تکنیک آماری دقیق به کمک روابط ریاضی به دست می‌آید. در این مدل، یک ترم اضافی در معادله  $\varepsilon$  وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسباتی در جریان کرنشی می‌گردد. این مدل نسبت به مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد، در جریان‌های چرخشی کارایی بیشتری داشته و

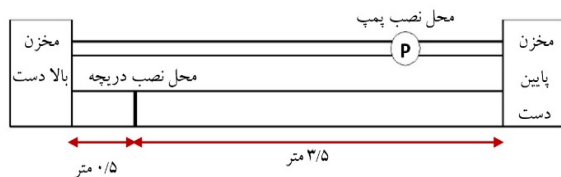
مدل تهیه می‌گردد و در انتها شرایط مرزی بر روی مدل اعمال می‌گردد و مدل تهیه شده برای فراخوانی در نرم‌افزار فلوئنت آماده می‌شود.

#### ۴- مدل‌سازی شکست سد به صورت دو بعدی قائم

در حالت دو بعدی قائم میدان حل به صورت دو بعدی و در جهات طولی ( $x$ ) و قائم ( $Z$ ) در نظر گرفته شده و پارامترهای مختلف هیدرولیکی در دو راستای  $x$  و  $Z$  محاسبه می‌شوند.

#### ۴-۱- مشخصات میدان حل

به منظور بررسی موج ناشی از شکست هیدرولیکی سد در حالت دو بعدی قائم از نتایج آزمایشگاهی شکست سد در یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی شیشه‌ای مطابق شکل (۱)، که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان قرار دارد، استفاده شده است. این فلوم ۴ متر طول داشته و عرض و ارتفاع آن  $0/3$  متر می‌باشد. برای مدل کردن پدیده شکست سد در فلوم دریچه‌ای از جنس پلکسی گلاس با ضخامت ۲۰ میلی‌متر در فاصله ۵۰ سانتیمتری از بالادست فلوم تعبیه شده است که فلوم را به دو بخش مخزن و کانال پایین-دست تقسیم می‌کند. نتایج آزمایشگاهی میزان پیشروی موج در زمان‌های مختلف از طریق روش تصویربرداری و فیلمبرداری و پردازش آن‌ها به دست آمده‌اند.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی در شبیه‌سازی پدیده شکست سد در حالت دو بعدی

#### ۴-۲- شبکه‌بندی میدان حل جریان

برای بررسی اثر ابعاد شبکه بر نتایج مدل‌سازی موج ناشی از شکست سد و تحلیل حساسیت شبیه‌سازی نسبت به ابعاد شبکه محاسباتی، ۵ اندازه شبکه با ابعاد  $0/9$ ،  $1$ ،  $1/1$ ،  $1/2$  و  $1/3$  سانتیمتری در نظر گرفته شد. در شکل (۲) نمونه شبکه‌بندی مدل نشان داده شده است.

معادلات انتقال برای تنش‌های رینولدز، تأثیر انحنای خطوط جریان و چرخش در جریان و جریان‌های ثانویه را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی در نظر می‌گیرد.

در این مقاله از سه مدل آشفتگی  $k-\omega$ ،  $k-\varepsilon$  و RSM استفاده شده و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۲-۳- روش حل معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش حجم محدود و در نظر گرفتن شرایط مختلف گسسته‌سازی معادلات شامل پیشرو مرتبه اول و دوم حل و نتایج مقایسه گردیدند.

تعیین سطح مشترک دو فاز سیال در بسیاری از مسائل هیدرولیکی مطرح بوده است. در پدیده‌های هیدرولیکی نیز تعیین سطح آزاد جریان در حل میدان جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. روش‌های گوناگونی در تعیین سطح آزاد استفاده می‌شود که نسبت به دیدگاه حاکم بر حل میدان جریان متفاوت می‌باشد.

در میدان جریان با شبکه ثابت، تعیین سطح آزاد بر اساس دیدگاه اولری نسبت به جریان مشخص می‌شود. اما در روش حجم سیال (VOF) برای هر جزء حجم سلول یک معادله دیفرانسیلی حل می‌شود که نهایتاً مقدار جزء حجم سیال در هر سلول معین می‌گردد. روش‌های توسعه یافته بر اساس VOF با توجه به دیدگاه اولری نسبت به میدان جریان، کارایی بیشتری دارند [۲۵].

#### ۳- مدل‌سازی توسط نرم‌افزار فلوئنت

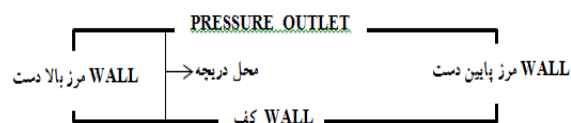
در نرم‌افزار فلوئنت از روش حجم محدود به منظور حل معادلات دینامیکی جریان سیالات استفاده شده است. نرم‌افزار شامل واسطه‌های کاربری پیچیده‌ای جهت ورود اطلاعات و تحلیل نتایج می‌باشد. نرم‌افزار از سه جزء اصلی پیش پردازنده، حل‌کننده و پس پردازنده تشکیل شده است. در قسمت پیش-پردازنده علاوه بر مدل‌سازی و تعیین هندسه و محدوده حل می‌توان شبکه یا همان مش مورد نیاز برای حل را ایجاد کرد. در قسمت حل‌کننده، مراحل مدل‌سازی انجام می‌گیرد و عملیاتی که در قسمت پس پردازنده انجام می‌گیرد، به کاربر کمک می‌کند تا شرایط حل را کنترل کند و در انتها نتایج را مورد بازبینی قرار دهد. پس از مدل‌سازی نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی باید مقایسه شوند. نرم‌افزار Gambit به عنوان نرم‌افزار پیش پردازنده برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. هندسه مدل در این نرم‌افزار ساخته شده و سپس مش مورد نیاز بر روی

دیواره، در پیش‌فرض نرم‌افزار فلوئنت منظور شده است. البته می‌توان با تعیین میزان تنش برشی، سرعت جریان چسبیده به دیوار را مشخص نمود. به عنوان یک مثال کاربردی برای شبیه‌سازی جریان لزوج حول یک خودرو، اگر در مرز ورودی، سرعت مشخص شده، لازم است تنش برشی برای سطح زمین صفر فرض گردد تا لایه مرزی روی سطح زمین تشکیل نگردد. تنش برشی و انتقال حرارت بین سیال و دیوار با استفاده از جزئیات جریان در میدان جریان محلی محاسبه می‌گردد.

- شرط مرزی فشار خروجی: برای تعیین فشار استاتیک و سایر متغیرهای اسکالر جریان در مرز خروجی استفاده می‌شود. استفاده از این شرط مرزی به جای شرط مرزی جریان خروجی، اغلب موجب بهتر شدن نرخ همگرایی در زمانی که جریان برگشتی در طول مراحل تکرار اتفاق می‌افتد، می‌گردد.

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی عددی شکست سد، مطابق شکل (۳) برای بالادست، پایین‌دست و بستر جریان از شرط مرزی دیوار و برای سطح بالای جریان از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. برای شرط مرزی دیوارها از روش تابع استاندارد دیواره استفاده و دیوارها ثابت در نظر گرفته شدند. برای اعمال اثر زبری مربوط به دیواره‌های فلوم از ضریب زبری شیشه که معادل  $0/009$  می‌باشد، استفاده گردید.

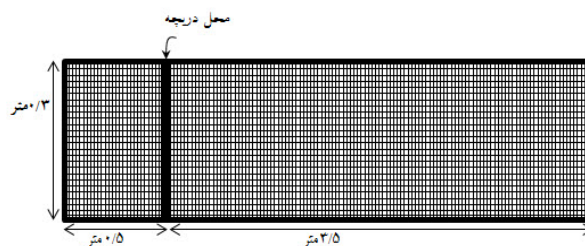
- شرط اولیه: در شرایط اولیه و در لحظه شروع محاسبات، نیم متر بالادست فلوم پر از آب ساکن با ارتفاع  $20$  سانتیمتر و پایین‌دست آن در سه حالت خشک، آب با ارتفاع  $1$  سانتیمتر و آب با ارتفاع  $2$  سانتیمتر در نظر گرفته شد.



شکل ۳- شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی

#### ۴-۴- تنظیمات مدل

برای حل جریان ناشی از شکست سد، تنظیمات مدل فلوئنت بر اساس معادلات جریان غیر دائمی و ضمنی با روش-های گسسته‌سازی مختلف معادلات و مدل‌های آشفتگی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های آشفتگی Standard  $k-\epsilon$ ، RNG  $k-\epsilon$  Realizable،  $k-\epsilon$  RSM و  $k-\omega$  مورد بررسی و بهترین مدل انتخاب شده است. از طرح‌های مختلف گسسته‌سازی معادلات نیز پیشرو مرتبه اول، پیشرو مرتبه دوم، Quick



شکل ۲- نمونه شبکه‌بندی مدل عددی فلوم آزمایشگاهی شبیه‌سازی پدیده شکست سد در حالت دو بعدی قائم

در جدول (۱) تعداد گره‌ها در هر یک از  $5$  شبکه فوق آورده شده است. همان‌طور که گفته شد هندسه مدل و شبکه محاسباتی در نرم‌افزار Gambit ایجاد می‌شود.

جدول ۱- مشخصات شبکه‌های مختلف برای میدان حل شکست

| سد                    |       |       |      |      |      |
|-----------------------|-------|-------|------|------|------|
| ابعاد شبکه (سانتیمتر) | ۰/۹   | ۱     | ۱/۱  | ۱/۲  | ۱/۳  |
| تعداد گره             | ۱۴۸۱۴ | ۱۲۰۰۰ | ۹۸۰۱ | ۸۳۲۵ | ۷۰۶۱ |

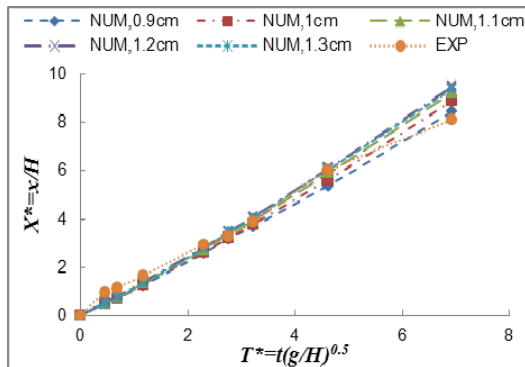
#### ۴-۳- تنظیم شرایط مرزی و شرایط اولیه در شبیه‌سازی عددی

در نرم‌افزار فلوئنت، موارد متعددی از انواع شرایط مرزی تعریف شده که با استفاده از آن‌ها می‌توان مشخصات جریان را در ورودی‌ها و خروجی‌های جریان به راحتی مشخص نمود. در نرم‌افزار فلوئنت ده نوع شرط مرزی مختلف برای مرزهای ورودی و خروجی جریان در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی فشار ورودی، سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی، فشار خروجی، فشار در بی‌نهایت، جریان خروجی، دریچه ورودی، فن ورودی، دریچه خروجی و فن خروجی، جزء ده نوع شرط مرزی ورودی و خروجی جریان می‌باشند.

سایر شرایط مرزی شامل شرط مرزی دیواره، شرط مرزی تقارن، شرط مرزی پرئودیک و شرایط مرزی تقارن محوری نیز در فلوئنت وجود دارند که بر حسب شرایط مسائل قابل استفاده هستند. در زیر خلاصه موارد کاربرد شرایط مرزی موجود در فلوئنت که در مدل‌سازی شکست سد مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ارائه شده است.

- شرط مرزی دیواره: از شرط مرزی دیواره در مرزهایی که سیال توسط یک جامد، محصور می‌گردد، استفاده می‌شود. در جریان‌های لزوج، شرط غیر لغزشی بودن جریان چسبیده به

مقایسه مقادیر عددی پیشروی پیشانی موج را در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به ازای هر ۵ شبکه انتخاب شده نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر ۵ شبکه روند پیشروی پیشانی موج همان روند موجود در داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. لازم به توضیح است که در تحلیل حساسیت شبکه از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد به دلیل دقت نتایج استفاده شده است.



شکل ۴- مقایسه شبکه‌های مختلف در شبیه‌سازی عددی شکست سد

در شکل (۴)،  $x$  مقدار پیشروی پیشانی موج بر حسب متر،  $H_0$  ارتفاع آب بالادست دریچه بر حسب متر،  $g$  شتاب ثقل بر حسب  $(m/s^2)$ ،  $t$  زمان بر حسب ثانیه،  $X^*$  طول پیشروی بی بعد و  $T^*$  زمان بی بعد شده می‌باشد.

جدول (۲) خطای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی را به ازای اندازه‌های شبکه نشان می‌دهد و همان‌طور که ملاحظه می‌شود شبکه با ابعاد ۱ سانتی‌متر کمترین خطا را دارا بوده که در مراحل بعدی مدل‌سازی از این اندازه شبکه‌بندی استفاده شده است.

جدول ۲- درصد خطای موجود در نتایج مدل عددی در مقایسه

با نتایج آزمایشگاهی برای اندازه‌های مختلف شبکه

|      |      |      |    |      |                  |
|------|------|------|----|------|------------------|
| ۱/۳  | ۱/۲  | ۱/۱  | ۱  | ۰/۹  | اندازه شبکه (cm) |
| ۱۶/۴ | ۱۶/۳ | ۱۶/۳ | ۱۶ | ۱۷/۸ | خطای نسبی (%)    |

۵-۲- تحلیل حساسیت نتایج مدل عددی نسبت به مدل‌های مختلف آشفتگی

در این تحقیق، از سه مدل آشفتگی  $k-\omega$ ،  $k-\epsilon$  و RSM استفاده شده است. شکل (۵) مقایسه مقادیر عددی پیشروی پیشانی موج را در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به ازای مدل‌های مختلف آشفتگی نشان می‌دهد.

و Power Law استفاده و بهترین گزینه برای سایر مراحل انتخاب گردید. از الگوریتم PISO برای زوج کردن جملات سرعت و فشار و برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از مدل VOF به صورت دو فازی استفاده شد.

در شبیه‌سازی عددی شکست سد، اثر زبری‌های مختلف بستر، عمق‌های مختلف پایاب سد و شیب بستر کانال بر روی حرکت موج ناشی از شکست سد در حالت دو بعدی قائم بررسی شده است.

سه وضعیت شامل بستر بدون شیب و بستر با شیب ۱٪ و ۲٪ مورد بررسی قرار گرفت.

### ۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و بحث روی نتایج

در این مقاله، ابتدا برای صحت‌سنجی مدل عددی، اندازه شبکه، مدل‌های آشفتگی و روش‌های گسسته‌سازی معادلات مورد آزمون قرار گرفته و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند که در پایان شبکه‌بندی با ابعاد متوسط، مدل تلاطمی Standard  $k-\epsilon$  و طرح پیشروی مرتبه اول به عنوان گزینه برتر برای مدل‌سازی انتخاب شدند.

برای تحلیل خطا از روش خطای نسبی و روش جذر میانگین مربعات خطا (NRMSE) به صورت نرمال شده، بر اساس روابط (۱۰) تا (۱۲) استفاده شده است. مقدار بیشینه خطا بدون در نظر گرفتن علامت آن منظور شده است.

$$\text{خطای نسبی} = \frac{\text{نتیجه آزمایشگاهی} - \text{نتیجه شبیه‌سازی عددی}}{\text{نتیجه آزمایشگاهی}}$$

که مقدار RMSE از رابطه (۱۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود: در رابطه (۱۲)،  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{nu,max} - X_{nu,min}} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{nu} - X_{exp})^2}{n}} \quad (12)$$

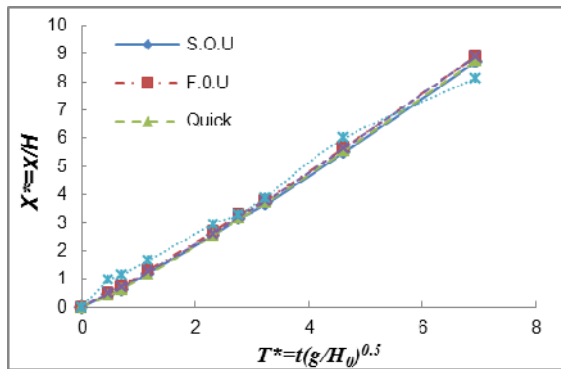
۵-۱- تحلیل حساسیت نتایج مدل عددی نسبت به اندازه شبکه

در این بخش، شبکه‌های با ابعاد ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۲ و ۱/۳ سانتیمتری برای میدان حل در نظر گرفته شدند. شکل (۴)



جدول ۴- درصد خطای نتایج مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای عبارتهای مختلف انفصال در شبیه‌سازی عددی

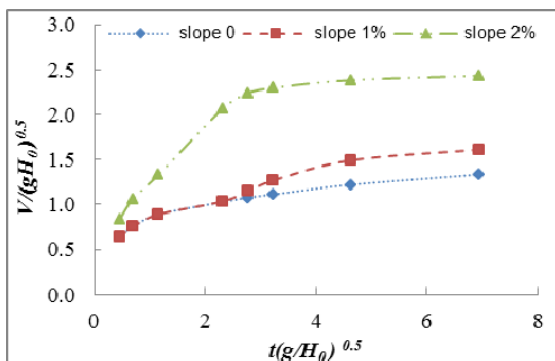
| Power Law | Quick | Second Order Upwind | First Order Upwind | عبارت انفصال  |
|-----------|-------|---------------------|--------------------|---------------|
| ۱۷        | ۲۱    | ۲۰                  | ۱۶                 | خطای نسبی (%) |



شکل ۶- مقایسه روش‌های مختلف گسسته‌سازی معادلات در شبیه‌سازی دو بعدی شکست سد

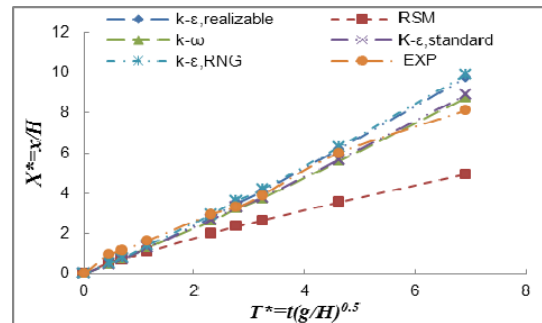
۴-۵- بررسی اثر شیب‌های مختلف بستر بر پیشروی موج ناشی از شکست سد

شیب بستر یکی از عوامل تأثیرگذار بر اثرات موج ناشی از شکست سد می‌باشد. وجود شیب در محدوده ساختگاه سد به علت افزایش سرعت حرکت موج مثبت به سمت پایین‌دست از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. از این رو سه حالت شیب بستر صفر، ۱٪ و ۲٪ مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۷) سرعت حرکت پیشانی موج را برای شیب‌های بستر صفر، ۱٪ و ۲٪ در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۷- مقایسه سرعت انتشار موج ناشی از شکست سد در شیب‌های مختلف بستر در شبیه‌سازی عددی

جدول (۳) درصد خطای نتایج عددی حاصل از مدل‌های تلاطمی مختلف را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شبیه‌سازی دو بعدی نشان می‌دهد و چون جریان ناشی از شکست سد جریانی متلاطم می‌باشد و روش  $k-\epsilon$  استاندارد بر پایه جریان کاملاً متلاطم بنا شده است، مدل  $k-\epsilon$  استاندارد کمترین خطا را دارا بوده و نتایج نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی دارد. در مراحل بعدی مدل‌سازی، از این مدل استفاده شده است.



شکل ۵- مقایسه مدل‌های تلاطمی مختلف در شبیه‌سازی شکست سد

جدول ۳- درصد خطای نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی برای مدل‌های تلاطمی مختلف

| $k-\omega$ | RSM | $k-\epsilon$ Sealizable | $k-\epsilon$ RNG | $k-\epsilon$ Standard | مدل آشفته‌گی  |
|------------|-----|-------------------------|------------------|-----------------------|---------------|
| ۱۷/۱       | ۳۵  | ۱۸                      | ۱۷/۲             | ۱۶                    | خطای نسبی (%) |

۳-۵- تحلیل حساسیت نتایج مدل عددی نسبت به روش گسسته‌سازی معادلات

عبارتهای مختلف انفصال، شامل الگوریتم پیشروی مرتبه اول<sup>۱</sup>، الگوریتم پیشروی مرتبه دوم<sup>۲</sup>، الگوریتم Quick و الگوریتم Power Law استفاده شده‌اند. شکل (۶) مقایسه مقادیر عددی پیشروی پیشانی موج را در زمان‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی به ازای روش‌های مختلف گسسته‌سازی معادلات نشان می‌دهد.

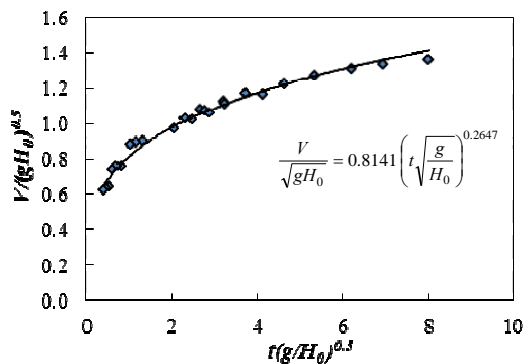
جدول (۴) خطای نتایج مدل عددی را در مقایسه با آزمایشگاهی به ازای عبارتهای مختلف انفصال نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، طرح پیشروی مرتبه اول کمترین خطا را دارا می‌باشد و با توجه به هزینه زمانی و محاسباتی کمتر این الگوریتم، در مراحل بعدی از این الگوریتم استفاده شده است.

1- First Order Upwind  
2- Second Order Upwind

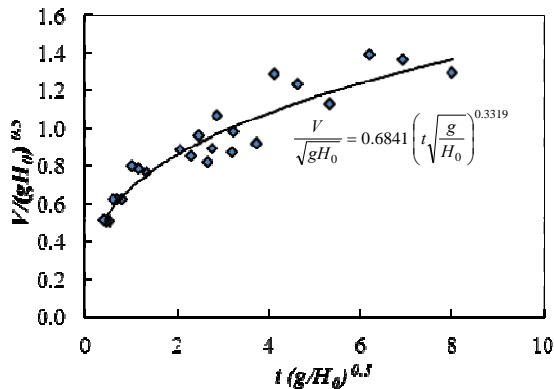
$$\frac{V}{\sqrt{gH_0}} = 0.8141 \left( t \sqrt{\frac{g}{H_0}} \right)^{0.2647} \quad (13)$$

$$\frac{V}{\sqrt{gH_0}} = 0.6841 \left( t \sqrt{\frac{g}{H_0}} \right)^{0.3319} \quad (14)$$

در این روابط،  $V$  سرعت پیشانی موج بر حسب متر بر ثانیه،  $H_0$  عمق آب بالادست دریچه بر حسب متر،  $g$  شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می‌باشد.



شکل ۹- مقادیر سرعت پیشانی موج برای پایاب خشک



شکل ۱۰- مقادیر سرعت پیشانی موج در زمان‌های مختلف و برای پایاب مرطوب با عمق ۱ سانتی‌متر

شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) انتشار موج ناشی از شکست سد را به ترتیب در بستر بدون شیب و پایاب خشک، بستر با شیب ۱ درصد و پایاب خشک و بستر بدون شیب و پایاب مرطوب با عمق ۲ سانتیمتر نشان می‌دهند.

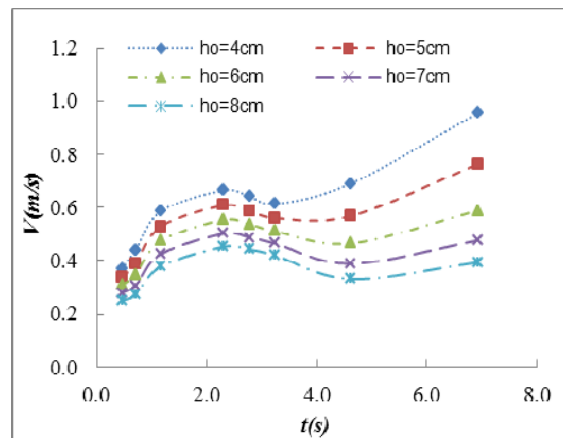
جدول (۵) افزایش سرعت پیشانی موج را از حالت تغییر شیب صفر به شیب ۱٪ و افزایش سرعت پیشانی موج را از حالت تغییر شیب صفر به شیب ۲٪ نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، پیشانی موج در شیب بیشتر سریع‌تر حرکت می‌کند و توسعه کاهش سطح آب در مخزن در زمان کوتاه‌تری به وقوع می‌پیوندد. به عبارتی مخزن سریع‌تر تخلیه شده و بر شدت خسارت وارده به پایین‌دست می‌افزاید.

جدول ۵- درصد تغییر سرعت در شیب‌های مختلف

|     |   |
|-----|---|
| ٪۸  | افزایش سرعت پیشانی موج در شیب بستر ۱٪ نسبت به شیب صفر |
| ٪۷۶ | افزایش سرعت پیشانی موج در شیب بستر ۲٪ نسبت به شیب صفر |

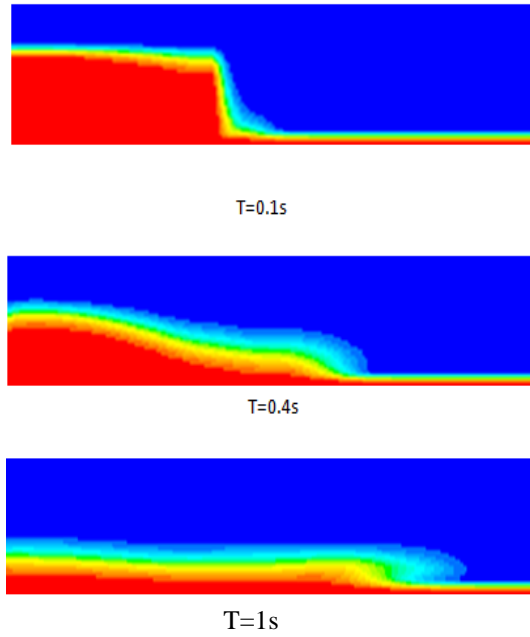
### ۵-۵- بررسی اثر عمق‌های مختلف پایاب بر پیشروی موج ناشی از شکست سد در شبیه‌سازی دو بعدی

نرم‌افزار فلونت قابلیت مدل‌سازی شکست سد با پایاب خشک و مرطوب را در حالت دو بعدی قائم دارا می‌باشد. در این-جا مدل‌سازی شکست سد برای اعماق مختلف آب در پایین‌دست سد انجام شده است. شکل (۸) سرعت پیشروی پیشانی موج در زمان‌های مختلف و برای اعماق مختلف آب در پایاب سد را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش عمق آب در پایین‌دست، سرعت پیشروی پیشانی موج کاهش می‌یابد.



شکل ۸- سرعت پیشروی پیشانی موج با پایاب مرطوب

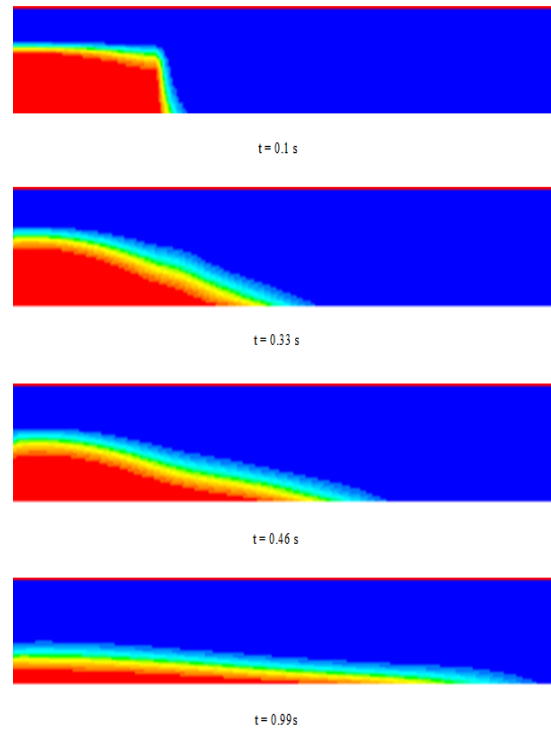
شکل‌های (۹) و (۱۰) مقادیر بی‌بعد شده سرعت پیشانی موج را نسبت به زمان بی‌بعد شده به ترتیب در حالات پایاب خشک و پایاب مرطوب با عمق ۱ سانتیمتر نشان می‌دهند. رابطه برآزش داده شده برای نمودارها به ترتیب برای پایاب خشک در رابطه (۱۳) و برای پایاب مرطوب در رابطه (۱۴) ارائه شده است:



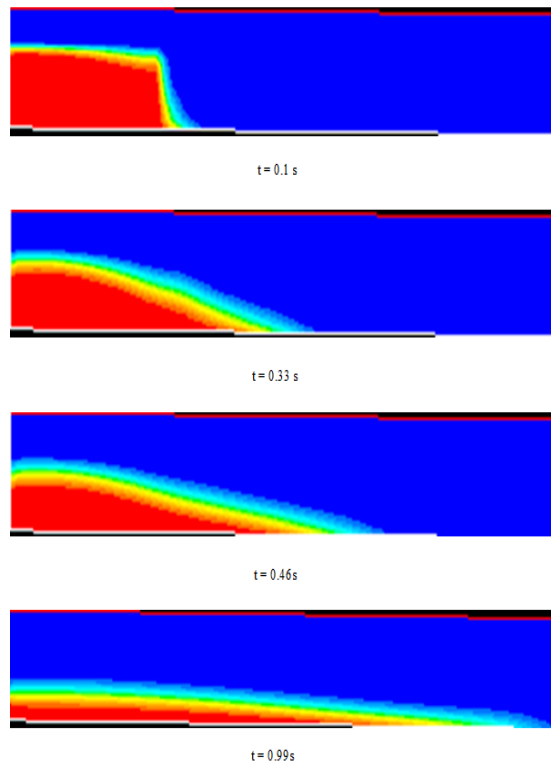
شکل ۱۳- انتشار موج ناشی از شکست سد با پایاب مرتوب به عمق ۲ سانتی‌متر

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از مدل عددی فلوئنت، پدیده شکست سد در حالت دو بعدی قائم در یک فلوم آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد و نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفتند. پارامترهای مؤثر بر پدیده شکست سد شامل خصوصیات هندسی کانال، زبری بستر، روش‌های حل عددی و مدل‌های آشفتگی به صورت عددی بررسی گردیدند. امکانات نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی نیز در مدل‌سازی جریان با سطح آزاد به ویژه جریان حاصل از شکست سد مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا جهت اعتبارسنجی مدل عددی، اندازه شبکه، مدل‌های مختلف آشفتگی و روش‌های مختلف گسسته‌سازی معادلات حاکم مورد آزمون قرار گرفتند و مشخص گردید که مدل با اندازه شبکه متوسط و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  Standard و طرح پیشروی مرتبه اول (First Order Upwind) بهترین و نزدیک‌ترین نتایج را به داده‌های آزمایشگاهی دارد. در مراحل بعدی مدل‌سازی، اثر زبری و شیب بستر پایین‌دست سد و اثر عمق‌های مختلف پایاب بر روی پیشروی موج ناشی از شکست سد بررسی شد. ماحصل نتایج نشان می‌دهد نرم‌افزار فلوئنت ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی شرایط جریان در پدیده شکست سد می‌باشد. ولی بایستی تمهیدات لازم از نظر دستیابی به نتایج مناسب مد نظر قرار گیرد.



شکل ۱۱- انتشار موج ناشی از شکست سد در بستر بدون شیب و پایاب خشک



شکل ۱۲- انتشار موج ناشی از شکست سد در بستر با شیب ۱ درصد و پایاب خشک

- Engineering, 2008, 100, 297-308.
- [۱۳] حسن‌زاده، ی.، نورانی، و.، سپهریف، و.، دل‌افروز، ه.، الماسپور، ف.، "مدل‌سازی شکافت و شکست احتمالی سد و نیار تحت سناریوهای روگذری جریان و رگاب"، هشمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۱۳۸۸.
- [14] Roshandel, A., Hedayat, N., Kiamanesh, H., "Simulation of Dam Break using Finite Volume Method", World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, 47, 11-26.
- [15] Biscarini, C., Francesco, S. D., Manciola, P., "CFD Modelling Approach for Dam Break Flow Studies", Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14, 705-718.
- [16] Singh, J., Mustafa, Altinakar, M. S., Ding, Y., "Two-Dimensional Numerical Modelling of Dam Break Flows over Natural Terrain Using a Central Explicit Scheme", Advances in Water Resources, 2011, 34 (10) 1366-1375.
- [17] Francesco, S., Biscarini, C., "CFD Modelling Approach for Dam Break Flow Studies", Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 14, 705-718.
- [۱۸] حسن‌زاده، ی.، خجسته، ر. ع.، "بررسی اثرات زبری بستر در سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد در یک مدل هیدرولیکی شیب‌دار"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹، ۴۰ (۱۳)، ۱-۲۰.
- [19] Chang, T. J., Kao, H. M., Chang, K. H., Hsu, M. H., "Numerical Simulation of Shallow-Water Dam Break Flows in Open Channels using Smoothed Particle Hydrodynamics", Journal of Hydrology, 2011, 408, 78-90.
- [20] Bellos, V., Hrisanthou, V., "Numerical Simulation of a Dam Break Flood Wave", Journal of European Water, 2011, 33, 45-53.
- [21] Xue, Y., Xu, W. L., Luo, S. J., Chen, H. Y., Li, N. W., Xu, L. J., "Experimental Study of Dam Break Flow in Cascade Reservoirs with Steep Bottom Slope", Journal of Hydrodynamics, 2011, 23 (4), 491-497.
- [22] Chen, Y., Binliang, L., Chunbo, J., Ying, L., "Predicting Near- Field Dam Break Flow and Impact Force using a 3D Model", Journal of Hydraulic Research, 2011, 48 (6), 784-792.
- [۲۳] جوزدانی، آ.، کبیری سامانی، ع.، "کاربرد روش پردازش تصاویر در تحلیل رفتار سیلاب ناشی از شکست سد"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۹.
- ۷- مراجع
- [1] Ritter, A., "Die Fortpflanzung de Wasserwellen", Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 1892, 36 (33), 947-954 (In German).
- [2] Dressler, R. F., "Hydraulic Resistance Effect upon the Dambreak Functions", Journal of Research National Bureau of Standards, 1952, 49 (3), 217-225.
- [3] Stoker, R. F., "Water Waves: the Mathematical Theory with Applications", Interscience Publishers, Inc., New York, 1957.
- [4] Bellos, C. V., Soulis, J. V., Sakkas, J. G., "Computation of Two-Dimensional Dam-Break Induced Flows", Advances in Water Resources, 1991, 14 (1), 31-41.
- [۵] حسن‌زاده، ی.، "بررسی انتشار امواج ناشی از شکست سد"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۰، ۵۱، ۴۱-۴۸.
- [6] Zhang, H., Hassanzadeh, Y., Long, N. D., Kahawita, R., "A 1-D Numerical Model Applied to Dam-Break Flows on Dry beds", Journal of Hydraulic Research, 1992, 30 (2), 211-224.
- [7] Hassanzadeh, Y., "Rapidly Varied Unsteady Flow in a Small-Scale Dry Bed Model", International Journal of Engineering, 1997, 10 (1), 1-10.
- [8] Tawatchai, T., Rattanapitikon, W., "2-D Modelling of Dam Break Wave Propagation on Initially Dry Bed", International Journal of Science Technology, 1999, 4 (3), 28-37.
- [۹] حسن‌زاده، ی.، رنجبری، ع.، خجسته، ر. ع.، "بررسی اثرات شیب بستر در روند تحلیل مسأله شکست سد"، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ۱۳۸۲، ۳۳، ۱-۹.
- [10] Zhou, J. G., Causon, D. M., Mingham, C. G., Ingram, D. M., "Numerical Prediction of Dam-Break Flows in General Geometries with Complex Bed Topography", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (130), 332-340.
- [11] Paster, M., Quecedo, M., "Comparison of Two Mathematical Models for Solving the Dam Break Problem using the FEM Method", Computer Methods in Applied Mechanics Engineering, 2004, 194, 3984-4005.
- [12] Mambretti, S., Larcan, E., Wrachien, D., "1D Modelling of Dam-Break Surges with Floating Debris", Journal of Biosystem

[25] Fluent Inc., "Fluent 6.3 Users and Tutorial Guide Manual", USA, 2006.

[24] Khankandi, A. F., Tahershamsi, A., Soares-Fraza, S., "Experimental Investigation of Reservoir Geometry Effect on Dam-Break flow", Journal of Hydraulic Research, 2012, 50 (4), 376-387.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Numerical 2D Vertical Simulation of Wave Propagation Due to Dam Break**

Bayram Ali Mohammadnezhad <sup>a</sup>, Mohammad Ebrahim Fatemi Kia <sup>b</sup>, Javad Behmanesh <sup>c\*</sup>, Majid Montaseri <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Engineering and Technology, Civil Engineering Department, Qom University of Technology, Iran

<sup>b</sup> Department of Water Engineering, University of Urmia, Iran

**Received:** 02 February 2014 ; **Accepted:** 22 June 2014

---

**Keywords:**

Dam Break, Numerical Simulation, Wave, FLUENT Software

---

### **1. Introduction**

Preparing for the consequences of dam failure is very important and should be considered. The failure of a dam can have major effects, such as injury and loss of life, economic, property and environmental damage. More than a century, scientists have seriously studied the dam failure. Flooding caused by a dam failure can occur in a relatively short period. Downstream communities located close to the dam typically have short warning times. Numerical modeling of dam-break flood analysis due to the shallow water equations are often developed as the next one. Initial studies in this area were done by Ritter [1] Dressler [2] and Stoker [3]. In the last decade, remarkable progress has been made in the field of numerical modeling of dam failure. Bellos et al. [4] applied a two-dimensional numerical model to simulate flood waves resulting from the instantaneous break of dams. The McCormack two step predictor-corrector scheme was used for the solution of the transformed system of equations. Comparisons between computed and experimental data showed a satisfactory agreement. The rapidly varied unsteady flow caused by the failure of a dam in a rectangular dry bed horizontal channel has been studied by Hassanzadeh [5]. In the literatures, many researchers have investigated various aspects of dam failure.

In this paper, dam break and its flood wave propagation was simulated using finite volume method in two-dimensional vertical condition. Numerical results are compared with experimental results for the evaluation of numerical model.

### **2. Methodology**

#### *2.1. The Fluent model*

In this paper, dam break wave propagation in two-dimensional vertical state is simulated by FLUENT model. FLUENT provides comprehensive modeling capabilities for a wide range of incompressible and compressible, laminar and turbulent fluid flow problems. To permit modeling of fluid flow and related transport phenomena in industrial equipment and processes, various useful features are provided. A very useful group of models in FLUENT is the set of free surface and multiphase flow models. For these types of problems, FLUENT provides the volume-of-fluid (VOF) model. Robust and accurate turbulence models are a vital component of the FLUENT suite of models. The turbulence models provided have a broad range of applicability, and they include the effects of other physical phenomena, such as buoyancy and compressibility. Particular care has been devoted to addressing issues of near-wall accuracy via the use of extended wall functions and zonal model [6].

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: mohammadnezhad@qut.ac.ir (Bayram Ali Mohammadnezhad), ebrahimfatemi63@yahoo.com (Mohammad Ebrahim Fatemi Kia), j.behmanesh@urmia.ac.ir (Javad Behmanesh), m.montaseri@urmia.ac.ir (Majid Montaseri).

## 2.2. Laboratory flume

The Experimental flume has 4 m length and 0.3 m width and height. The Flume is divided to two parts by the use of a valve, a 0.5 m length reservoir at upstream and 3.5 m length channel at downstream (Fig.1). The experimental results for dam break wave propagation have been derived by using of image and video processing methods. This experimental result was used for the evaluation and verification of numerical model.

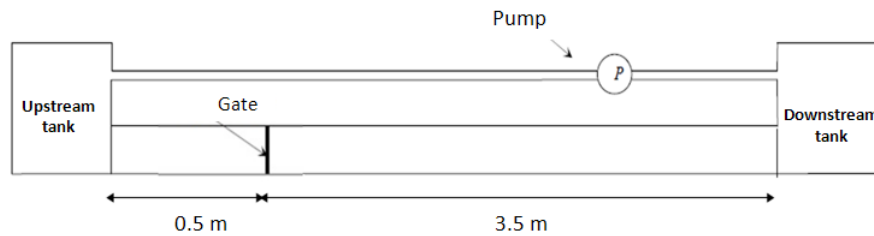


Fig. 1. Experimental flume setup

## 2.3. Mesh independency and boundary Conditions of numerical model

For the evaluation of mesh independency, numerical model was tested by five sizes of grid mesh: 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, and 1.3 cm. The optimal size for grids was selected 1.0 cm.

Boundary conditions were specified as Fig. 2 in 2DV numerical model.

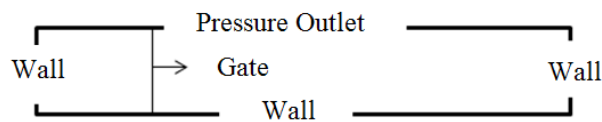


Fig. 2. 2DV numerical model boundary conditions

## 3. Results and discussion

### 3.1. Choosing a turbulence model

In this paper, numerical model was tested by three different turbulence models,  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$ , and RSM. By use of statistical analysis method, NRMSE, the best turbulence model for 2D dam break, was obtained the  $k-\varepsilon$  standard (Table 1).

Table 1. Relative error for different turbulence models

| Turbulence Model   | $k-\varepsilon$ standard | $k-\varepsilon$ RNG | $k-\varepsilon$ Realizable | RSM | $k-\omega$ |
|--------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|-----|------------|
| Relative error (%) | 16                       | 17.2                | 18                         | 35  | 17.1       |

### 3.2. Choosing a discretization scheme

Numerical model results were tested by discretization schemes, such as, First Order Upwind, Second Order Upwind, Quick, and Power Law. Table 2 shows the accuracy of these schemes.

Table 2. Relative error for different discretization schemes

| discretization scheme | First Order Upwind | Second Order Upwind | Quick | Power Law |
|-----------------------|--------------------|---------------------|-------|-----------|
| Relative error (%)    | 16                 | 20                  | 20    | 17        |

### 3.3. The effect of downstream water depth on the wave propagation of dam break

Figs. (3) and (4) show the dimensionless values of wave front speed vs. time for the dry bed and wet bed by 1 cm water depth, respectively. Equation fitted for the dry and wet beds are provided in Eqs. (1) and (2).

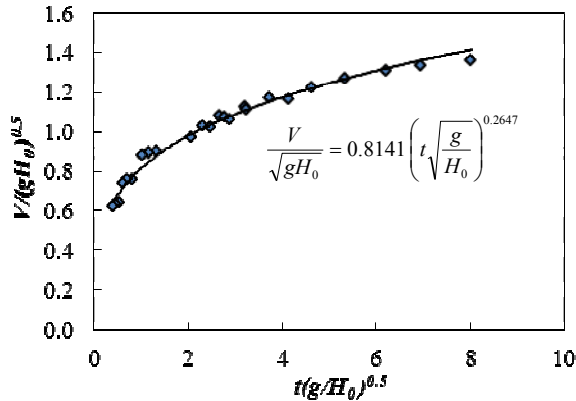


Fig. 3. Dam break flood wave front speed in dry bed

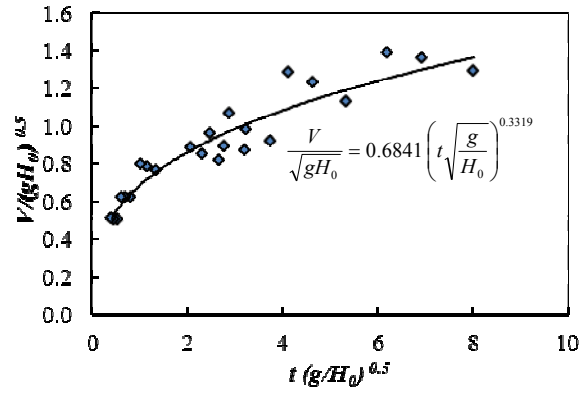


Fig. 4. Dam break flood wave front speed in wet bed (1 cm)

$$\frac{V}{\sqrt{gH_0}} = 0.8141 \left( t \sqrt{\frac{g}{H_0}} \right)^{0.2647} \quad (1)$$

$$\frac{V}{\sqrt{gH_0}} = 0.6841 \left( t \sqrt{\frac{g}{H_0}} \right)^{0.3319} \quad (2)$$

In the above equations,  $g$  is the gravity acceleration ( $\text{m/s}^2$ ),  $H_0$  is water depth at the upstream of gate (m),  $V$  is wave velocity (m/s) and  $t$  is time (s).

#### 4. Conclusions

Dam break have always been regarded as an extremely risky event and hence the research programs, government planning and investment in coastal dams are of the utmost importance. In this paper, dam break induced wave propagation was simulated using FLUENT model in two-dimensional vertical state, and numerical results were compared with experimental data for the evaluation and verification of numerical model. Dam break was simulated in both dry and wet bed performance for different sizes of the grid mesh, different discretization schemes (such as First Order Upwind, Second Order Upwind, Quick and Power Law) and different turbulence models ( $k-\varepsilon$  standard,  $k-\varepsilon$  RNG,  $k-\varepsilon$  Realizable, RSM and  $k-\omega$ ). Results show that the turbulence  $k-\varepsilon$  standard model and the First Order Upwind scheme are more accurate than others. After testing the sensitivity and accuracy of the model, simulation is done for basin slopes of 0, 1% and 2% and the roughness of the substrate with coefficients 0.009, 0.015, 0.0185, and 0.0198 performance and results were analyzed. The results showed that the numerical model can be used to simulate a dam break in both dry and wet beds and provides acceptable results.

#### 5. References

- [1] Ritter, A, "Die Fortpflanzung de Wasserwellen", ZeitschriftVerein Deutscher Ingenieure, 1982, 36 (33), 947-954 (In German).
- [2] Dressler, R. F., "Hydraulic Resistance Effect upon the Dambreak Functions", Journal of Research National Bureau of Standards, 1952, 49 (3), 217-225.
- [3] Stoker, R. F., "Water Waves: the Mathematical Theory with Applications", Interscience Publishers, Inc., New York, 1957.
- [4] Bellos, C. V., Soulis, J. V., Sakkas, J. G., "Computation of Two-dimensional Dam-break Induced Flows", Advances in Water Resources, 1991, 14 (1), 31-41.
- [5] Hassanzadeh, Y., "Rapidly Varied Unsteady Flow in a Small-scale Dry Bed Model", International Journal of Engineering, 1997, 10 (1), 1-10.
- [6] Fluent Inc., "Fluent 6.3 Users and Tutorial Guide Manual", USA, 2006.