

## بررسی اثرات شیب کف مخزن سد بر خصوصیات سیلاب ناشی از شکست سد در حالت بستر خشک پایین دست آن

اتابک فیضی<sup>۱</sup>، علیرضا اسدپور اردبیلی<sup>۲</sup>، ابوالفتح عسکریان خوب<sup>۳</sup>

a\_feizi@uma.ac.ir

- ۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی  
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی  
 ۳- مربی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

### چکیده

فرو ریختن ناگهانی یک سد که در پشت آن مقادیر عظیمی آب نگهداری می‌شود، باعث می‌گردد که به تاسیسات پایین دست از قبیل نیروگاه‌ها، مناطق مسکونی، تاسیسات شهری و تاسیسات کشاورزی و غیره خسارات مالی وارد شود. در صورتیکه در پایین دست سد، مناطق مسکونی وجود داشته باشد، علاوه بر خسارات مالی، خسارات جانی نیز به بار می‌آید. هدف این مطالعه، بررسی عددی تاثیر همزمان شکل هندسی مخزن در پلان و شیب کف آن بر روی الگو و چگونگی حرکت موج سیلابی ناشی از شکست سد است. بستر پایین دست دریاچه بصورت خشک در نظر گرفته شده است. خصوصیات جریان ناشی از شکست سد در دو مخزن با شکل‌های هندسی طویل و عریض و شیب‌های کف ۲٪، ۳/۵٪ و ۵٪ مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. مدل‌سازی‌های انجام شده به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار Flow3D صورت پذیرفته است. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که در مخزن عریض با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب در پایین دست و بالادست سد تفاوت چندانی نمی‌کند ولی نوسانات شدید سطح آب در مخزن عریض در تمامی شیب‌ها در پایین دست دریاچه مشاهده می‌شود. دلیل این نوسانات می‌تواند ناشی از شکل مخزن باشد. در مخزن طویل و در نقاط بالادست دریاچه، با افزایش شیب کف مخزن تراز سطح آب در حال کاهش بوده و کمترین تراز سطح آب برای شیب کف ۵٪ حاصل شده است. در نقاط پایین دست دریاچه در مخزن طویل، با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب در حال کاهش بوده و با گذشت زمان و در حدود هفت ثانیه بعد از باز شدن دریاچه، افت تراز سطح آب برای شیب‌های ۳/۵٪ و ۵٪ بیشتر از شیب‌های دیگر اتفاق افتاده است.

**واژگان کلیدی:** شکست سد، مدل‌سازی عددی سه بعدی، شکل مخزن، شیب کف مخزن، نرم‌افزار Flow3D.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۲/۰۳  
 تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۸/۱۵

## ۱- مقدمه

سدها یکی از مهمترین ساخته‌های بشر است که دارای کارکردهای گوناگون می‌باشد. با وجود منافع زیاد، سدها به طور بالقوه دارای مخاطرات زیادی برای جان و مال انسان‌ها می‌باشند. اصلی‌ترین خطر ناشی از سدها، احتمال شکست آن‌ها و ایجاد سیلاب‌های مخرب است، [۱].

شکست سد را می‌توان خرابی جزئی یا عمده در بدنه سد تعریف کرد که به طور ناگهانی منجر به رهاسازی حجم غیرقابل کنترلی از آب در پایاب می‌گردد. در مقایسه با سیلاب‌های ناشی از بارندگی، در منطقه‌ای که سد در آن احداث شده است، سیلاب‌های ناشی از شکست سد، سبب تولید جریان‌های با اندازه پیک بزرگتر می‌شوند. این مقادیر از تمام سیلاب‌های ناشی از بارندگی‌های سنگین، بزرگتر است. دیگر مشخصه متمایز کننده سیلاب‌های حاصل از شکست سد، آن است که دوره زمانی شروع بالا آمدن آب تا رسیدن به مقدار پیک آن، بسیار کوتاه است. این موضوع بر این دلالت دارد که، زمان رخداد پیک جریان سیلابی حاصل از شکست سد، بسیار کمتر از هر پدیده هیدرولوژیکی است که در طبیعت اتفاق می‌افتد. به همین دلیل زمان هشدار به مردمی که در پایین دست سد زندگی می‌کنند، بسیار کم خواهد بود. به منظور کاهش خسارت ناشی از شکست سد و امواج ایجاد شده ناشی از آن، باید شکست سد شبیه‌سازی شده مورد مطالعه قرار گیرد [۲].

جریان غیردائمی حاصل از شکست سد با معادلات ناوراستوکس تشریح می‌شود که حل تحلیلی این معادلات به جزء در شرایط خیلی خاص موجود نیست. لذا تلاش‌های زیادی برای توسعه روش‌های عددی صورت گرفته که حاصل آن سه روش عددی، اختلافات محدود، حجم محدود و اجزای محدود بوده است. در سال‌های اخیر روش حجم محدود به عنوان یک ابزار توانا برای بررسی این پدیده توجه محققین را به خود جلب کرده است. چنانکه در سال ۱۹۶۶، فراکارلو و تورو [۳] شکست دوبعدی سد را با کمک مدل حجم محدود بررسی کردند. در سال ۲۰۰۲ مطالعه‌ای توسط میراشیگه و آکیاما [۴] با استفاده از روش حجم محدود برای مطالعه دو بعدی در حالت وجود و عدم وجود سازه در پایین دست صورت گرفت.

سوارزو و زچ [۵] در پژوهشی به بررسی شکست سد در خم‌ها که در آن از یک خم ۹۰ درجه و یک بستر خشک و کانال

مستطیلی شکل استفاده شده بود، پرداختند. در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان از دوربین‌های نصب شده در بالای کانال و برای اندازه‌گیری سطح آب از دوربین‌هایی که در کنار کانال قرار گرفته بودند، استفاده شده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده با نتایج مدل‌های عددی یک بعدی و دو بعدی و همچنین مدل هیبریدی نشان داد که مدل دو بعدی کامل نتایج بهتری را در خم ۹۰ درجه از خود نشان می‌دهد و مهمترین اختلاف بین نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، ناشی از برخورد موج برگشتی به خم بوده است. الیت و چودری [۶] تلاش‌هایی در زمینه مطالعه شکست یک بعدی و دوبعدی سد با بکارگیری یک کانال با یک خم ۱۸۰ درجه به منظور بررسی شکست دو بعدی سد و تولید داده آزمایشگاهی انجام دادند و نتایج آزمایشگاهی را برای حالت‌های گوناگون به دست آوردند.

ژانگ و همکاران [۷] یک مدل یک بعدی ضمنی را برای حل مسئله شکست سد در بستر خشک و تر توسعه داده و نشان دادند نتایج حاصل از مدل با داده‌های آزمایشگاهی موجود تطابق رضایت بخشی دارد. حسن‌زاده [۸] در تحقیقی جریان سریع غیر دائمی ناشی از شکست سد در یک کانال مستطیلی افقی با بستر خشک پایین دست را از نقطه نظر تئوری و تجربی مورد بررسی قرار داد. آزمایش‌ها در دو حالت کانال با بستر صاف (بدون وجود زبری در بستر کانال) و کانال با بستر زبر (با ایجاد مقاومت در مقابل جریان) انجام شد و نتایج با راه حل تحلیلی ریتر و درس‌لر مقایسه گردید. نتایج حاصله نشان داد که وجود عناصر زبر در بستر مدل که وجود درختان جنگلی را در دره پایاب سدها شبیه‌سازی می‌نماید، موجب کاهش سرعت و افزایش عمق جریان می‌گردد. همچنین نتایج بدست آمده بیانگر آن بود که ناحیه پیشانی موج نسبت به مقاومت در مقابل جریان بسیار حساس و سرعت واقعی آن به طور محسوسی از مقادیر تئوری ریتر کمتر است و داده‌های تجربی کانال زبر با تئوری درس‌لر همخوانی خوبی داشته است.

ژو و همکاران [۹] جریان شکست سد را با مخازن متوالی در یک فلوم شیشه‌ای با شیب کف تند به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این بررسی یک سری سد در داخل فلوم آزمایشگاهی و روی بستر با شیب کف تند برای مقایسه خصوصیات جریان شکست سد تحت شرایط

دوبعدی برای شکست سد بر اساس معادلات آب‌های کم عمق (SWE)<sup>۱</sup>، را ارائه دادند. مدل ریاضی مذکور با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک شبکه بدون ساختار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و توسط حل‌کننده تقریبی Riemann Roe، یک پیش‌بینی از پیش تعیین شده نیز روی آن صورت گرفت. مدل پیشنهادی ابتدا برای شرایط آزمایشگاهی و سپس برای یک شکست سد واقعی که در سال ۱۹۳۵ در ایتالیا اتفاق افتاد، استفاده شده است. نتایج بر روی مقادیر مختلف شبکه مقایسه شده‌اند تا کارایی محاسباتی بین مدل ترتیبی اصلی و مدل‌های موازی نشان داده شود. مطابق نتایج، مدل ریاضی انتخاب شده و حل‌کننده عددی، عملکرد خوبی در باز تولید موارد آزمایشگاهی و رویداد تاریخی ۱۹۳۵ نشان داده است.

جوادیان و همکاران [۱۳] به بررسی مدل آزمایشگاهی پدیده شکست سد و مقایسه نتایج آن با حل تحلیلی معادلات سنت و نانت پرداختند. در تحقیق انجام شده توسط آنها پدیده شکست سد به وسیله برداشتن دریچه از جلوی جریان آب، در یک فلوم شیشه‌ای که یک طرف آن کاملاً خشک است، به صورت آزمایشگاهی مدل‌سازی شده است. نمودارهای مکان برحسب زمان، سرعت پیشانی موج و حجم آب جابه‌جا شده در زمان‌های مختلف ترسیم شده و با نتایج تئوریک آن که از حل تحلیلی معادلات سنت - ونانت به روش مشخصه حاصل گردیده، مقایسه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که پاسخ‌های آزمایشگاهی و تئوریک از تطابق خوبی برخوردار هستند اما به علت فرضیاتی که در روش مشخصه برای تحلیل معادلات سنت - ونانت در نظر گرفته می‌شود، روش آزمایشگاهی و تئوری دارای تفاوت‌های ذاتی می‌باشند. این تفاوت‌ها سبب ایجاد اختلافی نه چندان فاحش در نتایج دو روش می‌شود که این اختلاف در حدود ۲۰ درصد می‌باشد که مستقل از خطاهای آزمایشگاهی است. نتایج حاصل از مروری بر کارهای انجام شده در زمینه شکست سد نشان می‌دهد که پارامترهایی از قبیل ارتفاع سد، عرض تاج سد، شیب دیواره‌های مخزن سد، شکل هندسی مخزن، ارتفاع اولیه آب داخل مخزن، حجم اولیه آب در مخزن، شیب کف مخزن، ارتفاع شکاف، شکل شکاف، زاویه دیواره شکاف، زبری بستر کانال پایین‌دست سد، ارتفاع اولیه آب کانال پایین‌دست سد، شیب کف کانال پایین‌دست

شکست آبی و کامل سدهای متوالی ایجاد شدند و تأثیر تغییرات عمق آب مخزن و فاصله سدها، بر روی پارامترهای جریان شکست بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده نشان داد که نسبت ارتفاع اولیه آب در پایین‌دست سد به ارتفاع اولیه آب در مخزن سد، تأثیر بسزایی در ارتفاع بیشینه تراز سطح آب ایجاد شده دارد. همچنین تفاوت‌هایی در الگوی جریان و هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده بین حالت تک و چند مخزنه دیده شده است.

جوزدانی و کبیری‌سامانی [۱۰] ضمن مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده شکست سد، با استفاده از روش پردازش تصاویر به بررسی مشخصات هیدرولیکی سیلاب ناشی از شکست سد پرداختند. آزمایش‌های 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 آزمایش‌های 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 پایین‌دست 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 آزمایش‌ها با عمق ثابت آب در بالادست دریچه، افزایش در تراز بیشینه آب در کانال پایین‌دست دیده می‌شود.

فیضی و همکاران [۱۱] اثرات هندسه مخزن بر جریان ناشی از شکست سد را به صورت آزمایشگاهی و با شکل‌های مختلف مخزن طولانی، عریض، دوزنقه‌ای و دارای خم ۹۰ درجه مورد بحث قرار دادند. در این تحقیق کف مخزن سد به صورت افقی و بدون شیب در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اثرات دو بعدی جریان در مخازن عریض و دوزنقه‌ای قابل توجه بوده ولی در مخازن طویل و دارای خم ۹۰ درجه جریان یک بعدی می‌باشد. پتاسیا و همکاران [۱۲] در تحقیقی دو مدل موازنه شده

<sup>۱</sup>Shallow Water Equations

می‌توان هندسه ایجاد شده را با ریز کردن ابعاد مش اصلاح نمود و خیلی راحت‌تر و سریع‌تر به جسم مطلوب رسید [۱۴].

## ۲-۲- نحوه مدل‌سازی

اطلاعات مورد استفاده جهت تهیه مدل‌ها، کالیبراسیون و انجام مقایسه‌ها از تحقیق انجام گرفته توسط فیضی و همکاران [۱۱] در آزمایشگاه مهندسی عمران دانشگاه امیرکبیر که به صورت مدل آزمایشگاهی بوده، گرفته شده است. ذکر این نکته لازم است که نتایج مدل آزمایشگاهی مذکور برای بستر مخزن بدون شیب حاصل شده است. شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این تحقیق برای دو مخزن طولی و عرضی با در نظر گرفتن شیب‌های کف مخزن صفر (افقی)، ۲، ۳/۵ و ۵ درصد انجام شده است. بستر پایین دست درجه در این تحقیق خشک و بصورت افقی (بدون شیب) در نظر گرفته شده است. ابعاد و اندازه هندسه مدل بصورت شماتیک برای هر دو مخزن طولی و عرضی با در نظر گرفتن شیب‌های کف مخزن مختلف در شکل (۱) و جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین مختصات نقاطی که بررسی نتایج در آن‌ها صورت گرفته است در جدول ۲ ارائه شده است. در این پژوهش و بر حسب شرایط موجود، شرط مرزی دیوار (Wall) برای انتهای بالادست کانال، کف کانال و دیواره‌ها استفاده شده است. همچنین از شرط مرزی تقارن (Symmetry) برای سطح آزاد سیال و در مرزهای به هم چسبیده دو شبکه حل استفاده شده است.

در نهایت از شرط مرزی جریان خروجی (Outflow) برای خروجی پایین دست کانال استفاده گردیده است. شرایط مرزی اعمال شده برای هر دو مخزن تحت شیب‌های مختلف یکسان اعمال شده است. برای مقایسه قابل قبول شرایط مرزی برای هر دو مخزن یکسان بوده است. همچنین به منظور ایجاد شرایط اولیه برابر در شبیه‌سازی‌ها و امکان مقایسه منطقی، حجم آب موجود در هر دو مخزن با در نظر گرفتن شیب‌های مختلف در همه حالت‌ها یکسان و برابر با ۰/۷۱۴ متر مکعب بوده است. در شکل (۲)، شماتیک شرایط مرزی نشان داده شده برای مخزن طولی در دو حالت بستر افقی و شیب‌دار مخزن نشان داده شده است.

سد و شکل هندسی کانال پایین دست از جمله پارامترهایی مهمی هستند که بر روی خصوصیات جریان ناشی از شکست سد تاثیر می‌گذارند که در مطالعات و تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی تعدادی از این پارامترها در نظر گرفته می‌شوند و تاثیر پارامتر انتخاب شده بر روی خصوصیات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی ناشی از شکست سد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این مقاله سعی شده است تا با نرم‌افزار Flow3D که یک مدل عددی مبتنی بر حجم محدود است، به بررسی خصوصیات سیلاب حاصل از شکست سد در مخازن طولی و عرضی با در نظر گرفتن شیب‌های کف مخزن سد مختلف پرداخته شود.

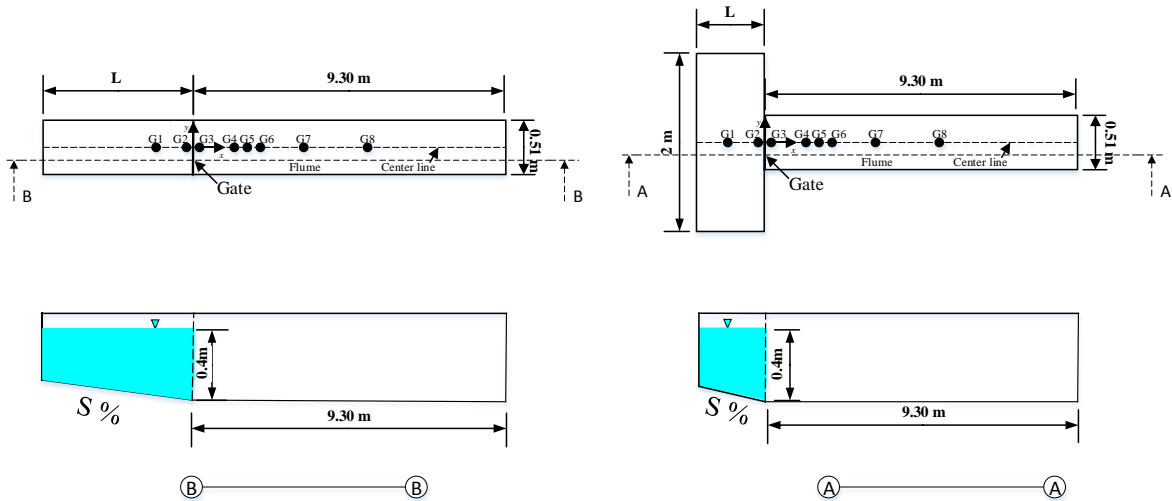
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معادلات هیدرودینامیک حاکم

معادلات حاکم بر جریان یک سیال تراکم ناپذیر لزج توسط معادلات پیوستگی جرم و مومنتم که به معادلات ناویر-استوکس معروف هستند، بیان می‌شوند. این معادلات در واقع بیانگر پایداری جرم و مومنتم به زبان ریاضی هستند. برای بررسی میدان جریان در پدیده شکست سد، از آنجا که این نوع جریان، جریانی آشفته است، باید معادلات ناویر-استوکس وابسته به زمان حل شوند و سپس ترم‌های آشفتگی به آن‌ها اضافه شوند، [۱۴].

از قابلیت‌های عمده برنامه Flow3D برای تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد است و از روش حجم محدود برای حل معادلات میانگین رینولدزی ناویر-استوکس<sup>۱</sup> (RANS) استفاده می‌کند. در Flow3D سطح آزاد با روش VOF مدل می‌شود. همچنین برای تعریف و شبیه‌سازی یک مانع و احجام صلب از روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) استفاده می‌کند. روش‌های VOF و FAVOR مثال‌هایی از روش‌های جزء حجمی هستند. Flow3D از مش‌های راست گوشه در مختصات کارتیزین و استوانه‌ای استفاده می‌کند. اشکال هندسی پیچیده، هنگامی که در مش‌های راست گوشه قرار می‌گیرند، به روش FAVOR با اشغال کردن بخش یا تمام حجم و یا سطح سلول مدل می‌شوند. این موضوع اجازه تعریف هندسه و مش مستقل از هم را به کاربر می‌دهد و

<sup>1</sup> Reynolds-Averaged Navier-Stokes

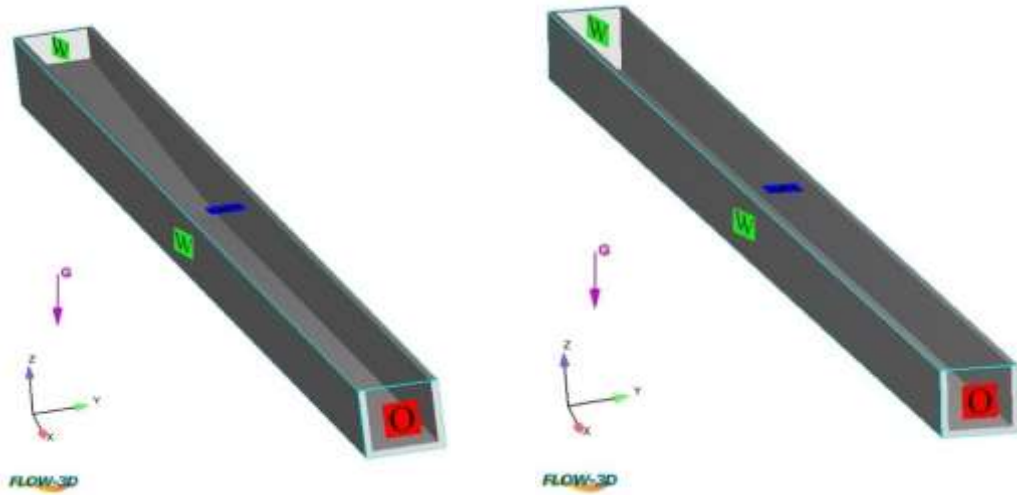


$S = 2\% \quad , \quad S = 3.5\% \quad , \quad S = 5\%$

(ب)

(الف)

شکل (۱) شماتیکی از ابعاد و اندازه هندسه مدل: (الف) مخزن عریض و (ب) مخزن طویل.



(ب)

(الف)

شکل (۲) نمایی از شرایط مرزی مخزن طویل (الف) با شیب صفر (بستر افقی)، (ب) با شیب ۵٪.

جدول (۲) مختصات کارترین نقاط مورد بررسی.

Gauge	x (m)	y (m)
G1	-0.5	0
G2	-0.1	0
G3	0.1	0
G4	0.8	0
G5	1	0
G6	1.2	0
G7	3.0	0
G8	5.5	0

جدول (۱) ابعاد و اندازه مخزن مورد بررسی با شیب کف‌های مختلف.

L (m)	درصد شیب کف مخزن	شکل مخزن
۰/۸۹	افقی	مخزن عریض
۰/۹۱	$S = 2\%$	
۰/۹۳	$S = 3/5\%$	
۰/۹۵	$S = 5\%$	مخزن طویل
۳/۵	افقی	
۳/۸۸	$S = 2\%$	
۴/۳۱	$S = 3/5\%$	
۵/۱۷	$S = 5\%$	

آمده با اندازه مش ۰/۰۱ متر نداشته است. بنابراین با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۳)، مش‌هایی با اندازه ۰/۰۱ متر در هر سه راستای X، Y و Z به عنوان مش مناسب جهت انجام شبیه‌سازی‌های بعدی انتخاب شده است.

علاوه بر تحلیل حساسیت مدل به اندازه مش، تحلیل حساسیت مدل نسبت به مدل‌های آشفتگی نیز انجام شده است. شکل (۴) مقایسه نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به مدل‌های آشفتگی را با نتایج آزمایشگاهی در حالت بستر خشک پایین‌دست دریاچه نشان می‌دهد. با بکارگیری سه مدل آشفتگی مشهور  $k-\varepsilon$ ،  $k-\omega$  و  $k-\varepsilon-RNG$ ، تغییرات سطح آب در دو نقطه G2 و G7 با مقادیر آزمایشگاهی در کانال با مخزن طویل و شیب کف افقی مخزن مقایسه شده است. مقایسه نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی، با استفاده از دو معیار درصد خطای نسبی (E%) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شده و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به نزدیکی درصد خطاها و همچنین توصیه راهنمای نرم افزار Flow3D، از بین مدل‌های آشفتگی در نرم‌افزار مورد نظر مدل  $k-\varepsilon-RNG$ ، مدل مناسب آشفتگی برای بررسی پدیده شکست سد انتخاب شده است [۱۵].

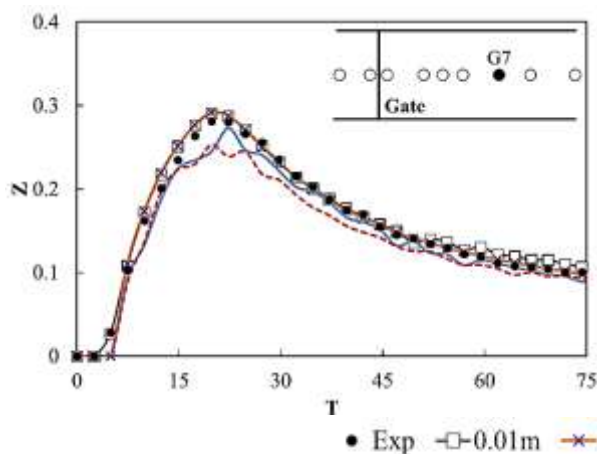
جدول (۳) مقایسه کمی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی.

G7		G2		سایز مش
RMSE	E%	RMSE	E%	
0.0061	10.2	0.0166	13.7	0.1m
0.0047	9.5	0.0121	12.5	0.05m
0.0028	5.5	0.0059	6.9	0.03m
0.0028	5.7	0.0054	5.4	0.01m

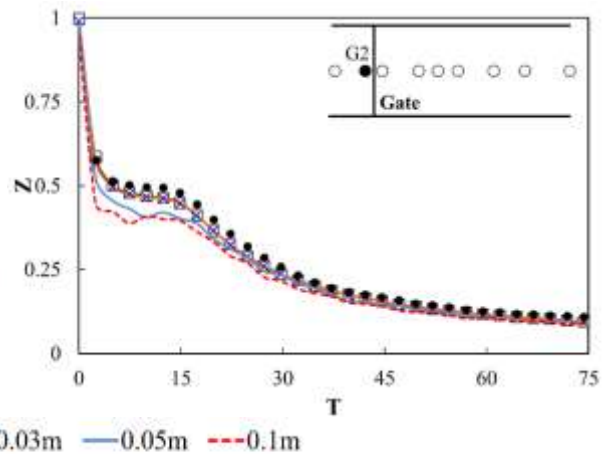
جهت تحلیل حساسیت مدل عددی به اندازه مش، مش‌هایی با اندازه ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، و ۰/۱ متر به مدل مورد نظر اعمال شده است. از آنجاییکه نتایج تحلیل حساسیت مدل عددی به اندازه مش برای هر دو مخزن یکسان بوده است، نتایج در این قسمت فقط برای مخزن طویل ارائه شده است. با اعمال هر کدام از اندازه‌های مش، تغییرات سطح آب در دو نقطه G2 (داخل مخزن) و نقطه G7 (داخل کانال پایین‌دست) با مقادیر آزمایشگاهی در کانال با مخزن طویل با شیب کف صفر (بستر افقی) مقایسه شده است.

شکل (۳)، مقایسه نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به اندازه مش‌های انتخاب شده را با نتایج آزمایشگاهی در حالت بستر خشک پایین‌دست دریاچه نشان می‌دهد. در این نمودار مختصات بی‌بعد مکانی است که به صورت  $Z = h/h_0$  تعریف شده است که  $h_0$  مقدار تراز اولیه آب در مخزن و  $h$  تغییرات سطح آب می‌باشد.

پارامتر بی‌بعد زمان نیز به صورت  $T=t(g/h_0)^{0.5}$  است که  $t$  مشخص کننده زمان و  $g$  شتاب گرانش می‌باشد. به منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی، از دو معیار درصد خطای نسبی (E%) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردیده است. بدیهی است هر چه مقدار E% و RMSE کمتر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل عددی و خطای کمتر نسبت به نتایج آزمایشگاهی خواهد بود. در جدول (۳) مقادیر خطا در نقاط G2 و G7 ارائه شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با انتخاب اندازه مش‌های کوچکتر از ۰/۰۱ متر، نتایج بدست آمده تفاوت قابل توجهی با نتایج بدست

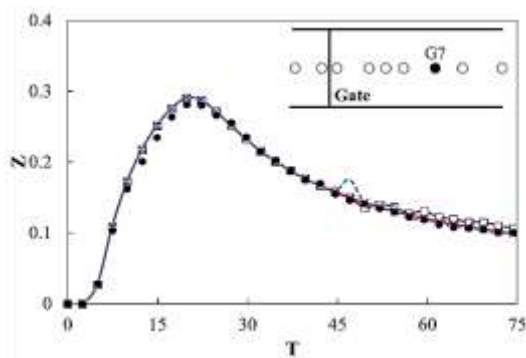


(ب)

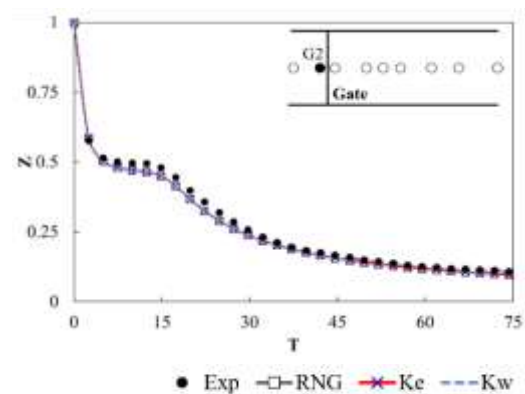


(الف)

شکل (۳) آنالیز حساسیت مدل با مخزن طویل و شیب کف مخزن صفر (افقی) نسبت به اندازه مش: (الف) نقطه G2 و (ب) نقطه G7.



(ب)



(الف)

شکل (۴) آنالیز حساسیت مدل با مخزن طویل و شیب کف صفر (بستر افقی) نسبت به مدل‌های آشفتگی؛ (الف) نقطه G2، (ب) نقطه G7.

عریض حدود ۴۰ درصد بالاتر از مقادیر ثبت شده برای مخزن طویل در حالت بستر افقی بوده است. در مخزن عریض در نقاط داخلی مخزن تراز سطح آب در لحظات اولیه بعد از باز شدن دریچه دارای افت شدید می‌باشد ولی بعد از این افت ناگهانی، سطح آب بلافاصله افزایش یافته و به بیشینه مقدار خود می‌رسد و سپس دوباره روند کاهشی به خود می‌گیرد. دلیل افزایش تراز سطح آب بعد از افت ناگهانی این است که موج منفی ورودی به مخزن عریض بعد از برخورد به دیواره‌های کناری دو طرف مخزن انعکاس پیدا کرده و به سمت محل دریچه حرکت می‌نماید. این انعکاس جریان متاثر از شکل مخزن عریض می‌باشد. حرکت جریان بازگشتی از سمت دیواره‌های کناری دو طرف مخزن به طرف دریچه در لحظات اولیه پس از باز شدن دریچه سریع و شدید بوده و در محل نقطه G2 با یکدیگر برخورد کرده و باعث افزایش تراز سطح آب در این نقطه شده است ولی با گذشت زمان از شدت جریان برگشتی از دیواره‌های دو طرف مخزن کاسته شده و باعث ایجاد پله‌های کوچک در تراز سطح آب شده است.

در نقطه G3، نقطه‌ای بلافاصله بعد از دریچه، با افزایش شیب کف مخزن در مخزن طویل، تراز سطح آب در حال کاهش است و با گذشت زمان و در حدود  $t = 7s$  مشاهده می‌شود که افت تراز سطح آب برای شیب‌های ۳/۵ و ۵ درصد بیشتر از شیب‌های دیگر است ولی در مخزن عریض در نقطه G3، با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب تفاوت چندانی نمی‌کند.

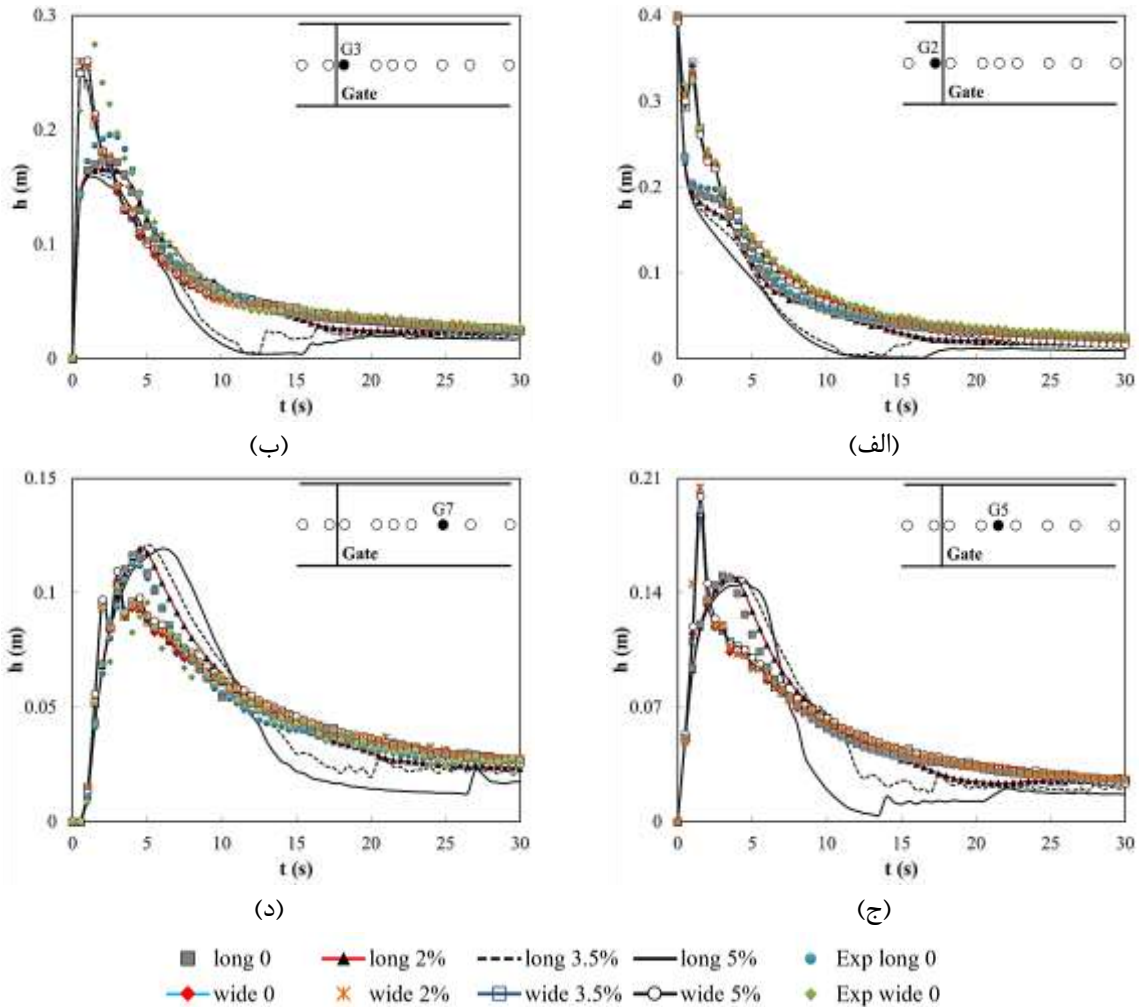
جدول (۴) مقایسه کمی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی.

G7		G2		مدل آشفتگی
RMSE	E%	RMSE	E%	
0.0022	3.6	0.0055	6.3	K-e
0.0027	5.7	0.0054	5.4	RNG
0.0028	4.7	0.0052	4.9	K-w

### ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- بررسی تغییرات سطح آب

شکل (۵)، مقایسه ترازهای سطح آب در مخزن طویل و عریض در نقاط G2، G3، G5 و G7 با در نظر گرفتن شیب‌های مختلف کف مخزن و بستر خشک در پایین دست آن را نشان می‌دهد. در نمودارهای شکل (۵)، برای مشخص شدن مخزن عریض و طویل به ترتیب از کلمات wide و long استفاده شده است و اعداد مقابل این کلمات بیانگر درصد شیب کف مخزن می‌باشد. همانطوری که مشاهده می‌شود در نقطه G2 (درون مخزن) در مخزن طویل، با افزایش شیب کف مخزن تراز سطح آب در حال کاهش می‌باشد و کمترین تراز سطح آب برای شیب کف ۵٪ مشاهده می‌شود. همچنین با گذشت زمان و در حدود  $t = 7s$  مشاهده می‌گردد که افت تراز سطح آب برای شیب‌های ۳/۵ و ۵ درصد بیشتر از شیب‌های دیگر است. ولی در مخزن عریض در نقطه G2، با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب تفاوت چندانی نکرده است. مقایسه بین تراز سطح آب مخزن طویل و عریض در نقاط داخلی مخزن نشان می‌دهد که بیشترین تراز سطح آب مربوط به مخزن عریض می‌باشد بطوریکه در این شرایط بیشینه تراز سطح آب بواسطه مخزن



شکل (۵) مقایسه ترازهای سطح آب در مخزن طویل و عریض در نقاط مختلف با در نظر گرفتن شیب‌های مختلف کف مخزن و بستر خشک در پایین دست (الف) نقطه G2، (ب) نقطه G3، (ج) نقطه G5، (د) نقطه G7

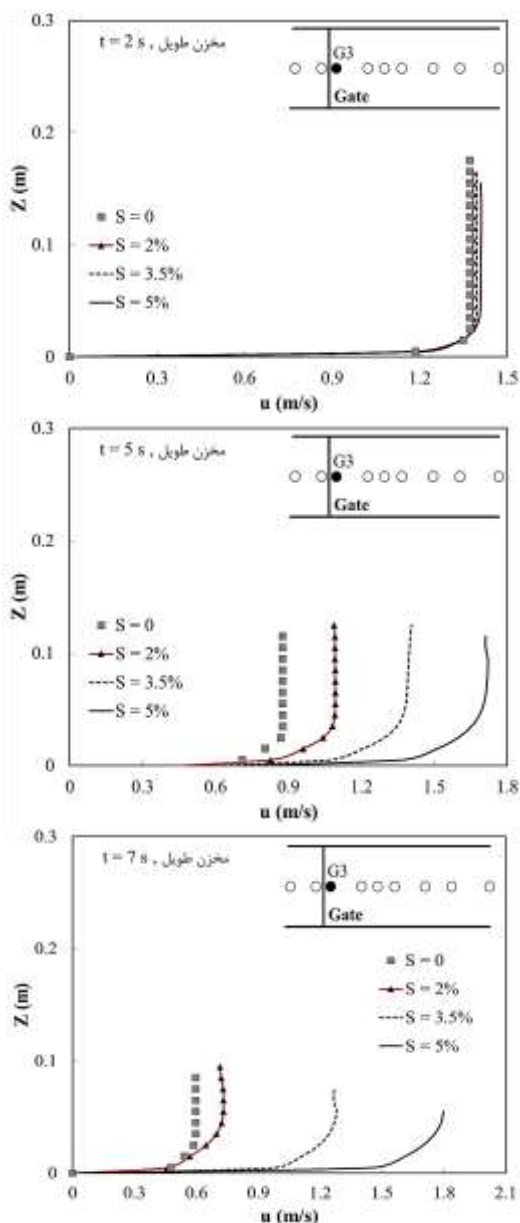
مقایسه نمودارهای سطح آب در مخازن طویل و عریض برای بستر افقی در نقاط G2 و G3 بیانگر آن است که بیشینه تراز آب ایجاد شده پس از دریاچه با تغییرات سطح آب قبل از دریاچه متناظر می‌باشد و از لحاظ کمی نیز دارای مقادیر مشابهی هستند. کلیه نمودارهای تغییر سطح آب نشان‌دهنده آن است که تغییرات ناگهانی در تراز سطح آب در نقاط نزدیک به دریاچه ایجاد می‌شود که علاوه بر ایجاد تغییرات مشخصات جریان در عرض کانال، تغییرات شدیدی در عمق جریان نیز ایجاد می‌نماید. به دلیل وجود تغییرات مشخصات جریان در عمق، جریان از حالت دو بعدی خارج شده و به صورت سه بعدی باید مطالعه شود. در نقطه G5 نیز روندی مشابه به نقطه G3 در هر دو مخزن دیده می‌شود. در نقطه G7 در مخزن طویل، متوسط تراز سطح آب در شیب ۰/۵، به اندازه ۱۱ درصد از حالت افقی پایین تر ماست.

در این نقطه، پس از باز شدن دریاچه، سطح آب به سرعت افزایش می‌یابد تا به بیشینه خود می‌رسد سپس حالت نزولی پیدا می‌کند. مقایسه بین تراز سطح آب مخزن طویل در حالت بستر افقی و مخزن عریض در نقطه G3 نشان می‌دهد که بیشینه تراز سطح آب بواسطه مخزن عریض ایجاد می‌شود. در عین حال افت سطح آب نسبت به زمان بواسطه مخزن عریض سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

دلیل تراز بیشینه سطح آب و افت سریع‌تر آن در مخزن عریض نسبت به مخزن طویل، تشکیل جریان‌های ضربدری (Cross waves) در کانال پایین دست مخزن عریض بدلیل تاثیرپذیری از شکل مخزن می‌باشد درحالی‌که در مخزن طویل بدلیل همراستا بودن مخزن و کانال پایین دست چنین جریانی ایجاد نمی‌گردد.



ثانیه پس از باز شدن دریچه مقدار سرعت در این نقطه دارای روندی مشابه با زمان ۲ ثانیه بوده و با کاهش شیب، مقادیر سرعت نیز در حال کاهش می‌یابد، با این تفاوت که در این زمان‌ها اختلاف بیشترین و کمترین مقدار سرعت دارای مقدار قابل توجه بوده و نشان‌دهنده رنج تغییرات شدید بدلیل ورود تاثیر شیب کف مخزن در این زمان بوده است. در نقطه G5، ۲ ثانیه پس از باز شدن دریچه، مقدار سرعت در مخزن طولی که دارای کف مخزن افقی است، دارای بیشترین مقدار است.

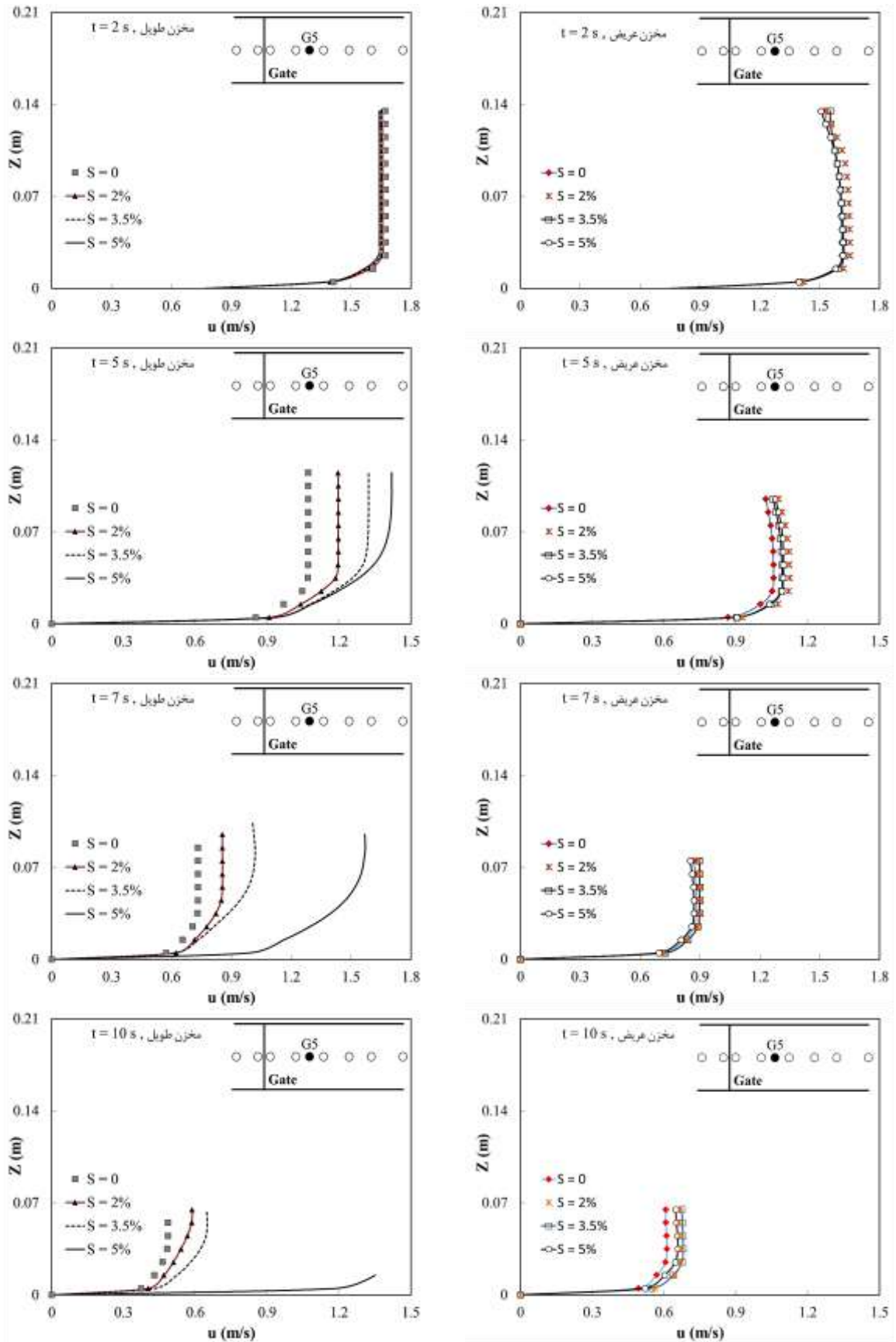


شکل (۶) مقایسه توزیع سرعت در عمق در کانال متصل به مخزن طولی در نقطه G3 در زمان‌های مختلف.

مثل نقاط قبل، افت تراز سطح آب در شیب‌های ۳/۵ و ۵ درصد زودتر از حالت‌های دیگر اتفاق می‌افتد. در مخزن عریض در نقطه G7، با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب تفاوت چندانی نمی‌کند ولی نوسانات شدید سطح آب در مخزن عریض در تمامی شیب‌ها مشاهده می‌شود. دلیل این نوسانات می‌تواند بیشتر ناشی از شکل مخزن باشد و شیب مخزن دارای تاثیر کمتری است. چون پس از باز شدن ناگهانی دریچه امواجی از نوع (Surge) ایجاد می‌شود که به علت کوتاه بودن طول مخزن این امواج می‌توانند دارای رفت و برگشت در طول مخزن باشند و باعث ایجاد نوسانات در سطح آب شوند. نوسانات مذکور همراه با جریان‌های ضربدری به کانال پایین دست منتقل می‌شوند. برخی از نقاط کانال پایین دست مانند نقطه G7 در محل برخورد جریان ضربدری قرار دارد بنابراین شدت این نوسانات در این نقطه بیشتر دیده می‌شود. برخی نقاط دیگر مانند نقطه G5 مابین دو جریان‌های ضربدری متوالی قرار دارد بنابراین شدت این نوسانات در این نقطه کمتر احساس می‌شود. با گذشت زمان شدت نوسانات در تمامی نقاط در حال کاهش است. در مخازن طولی به دلیل همراستا بودن مخزن و کانال و حاکم بودن جریان یک بعدی، نوسانات قابل توجهی در سطح آب دیده نمی‌شود.

### ۳-۲- بررسی تغییرات پروفیل سرعت در عمق

شکل (۶) مقایسه توزیع سرعت در عمق در کانال متصل به مخزن طولی در نقطه G3 و شکل (۷) مقایسه توزیع سرعت در عمق در کانال متصل به مخازن طولی و عریض در نقطه G5 با شیب‌های کف مخزن مختلف و در زمان‌های متفاوت پس از باز شدن دریچه را نشان می‌دهند. همانطوری که مشاهده می‌شود در مخزن طولی، در زمان ۲ ثانیه پس از باز شدن دریچه در نقطه G3، مقدار سرعت در مخزنی که دارای کف شیب ۰.۵٪ است، دارای بیشترین مقدار است و با کاهش شیب، مقادیر سرعت نیز در حال کاهش می‌باشد و در بستر افقی به کمترین مقدار خود می‌رسد. اختلاف بیشترین و کمترین مقدار سرعت در حدود ۳ درصد می‌باشد و بیانگر آن است که رنج تغییرات سرعت دامنه وسیعی نداشته و اختلاف‌های بوجود آمده در این زمان به دلیل عدم ورود تاثیر شیب کف مخزن بر مشخصات جریان در لحظات اولیه شدید نمی‌باشد. با گذشت زمان و در زمان‌های ۵ و ۷



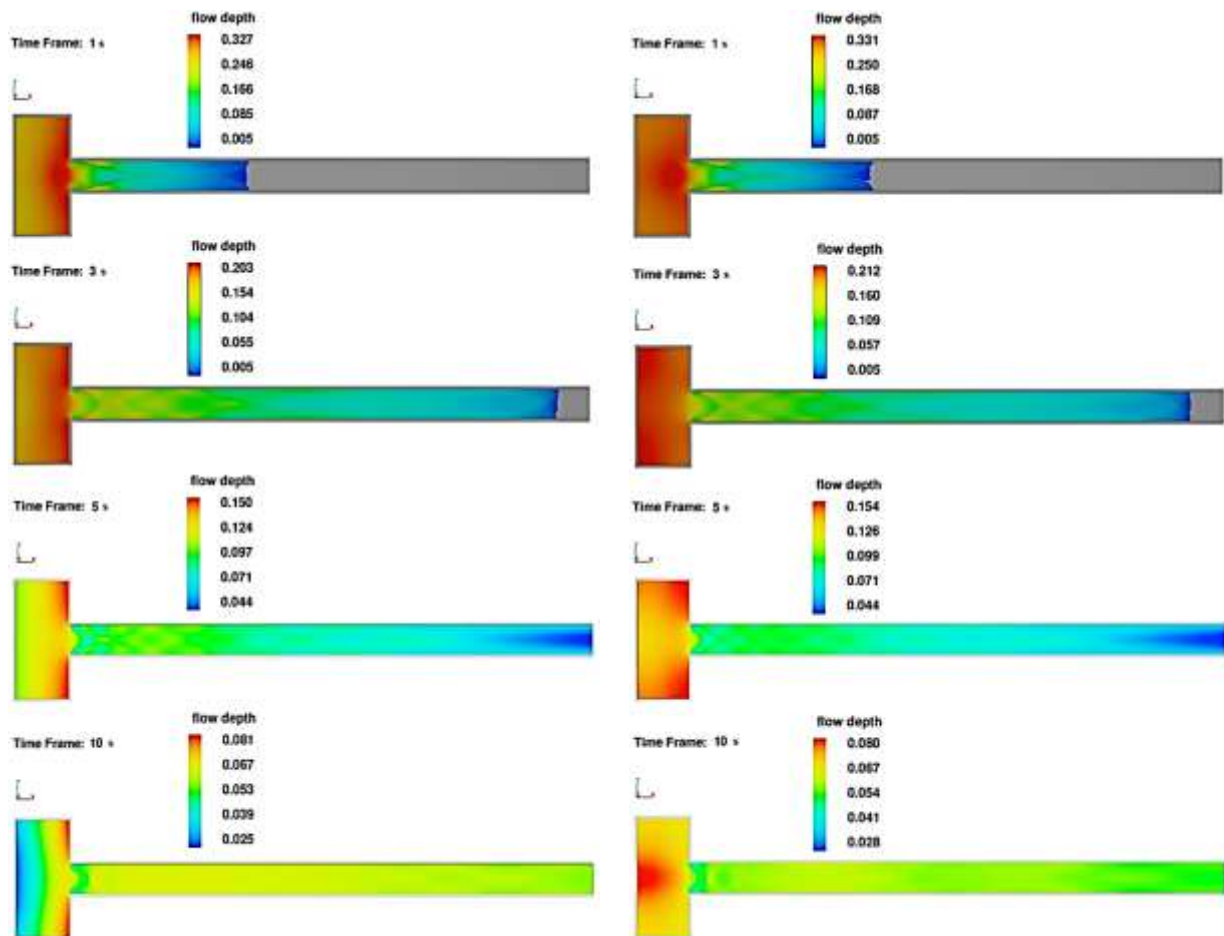
شکل (۷) مقایسه توزیع سرعت در عمق در کانال متصل به مخازن طویل و عریض در نقطه G5 در زمان‌های مختلف.

یکدیگر، سرعت جریان در شیب ۵ درصد نسبت به شیب‌های دیگر بیشتر می‌باشد ولی در مخزن عریض به دلیل ورود جریان از کناره‌ها به کانال پایین‌دست و ایجاد جریان‌های ضربدری دارای سرعت کمتری نسبت به مخزن طویل می‌باشد.

### ۳-۳- بررسی نحوه حرکت موج سیلابی

شکل‌های (۸) و (۹) نحوه حرکت موج سیلابی در کانال پایین‌دست مخازن عریض و طویل برای شیب کف مخزن صفر (کف افقی) و ۵٪ را نشان می‌دهند. چنانچه در شکل (۸) مشاهده می‌شود، در مخازن عریض بدلیل ایجاد امواج متقاطع (Cross Waves)، تغییرات سطح آب به صورت نوسانی بوده و این نوسانات تا انتهای فلوام ادامه پیدا می‌کند.

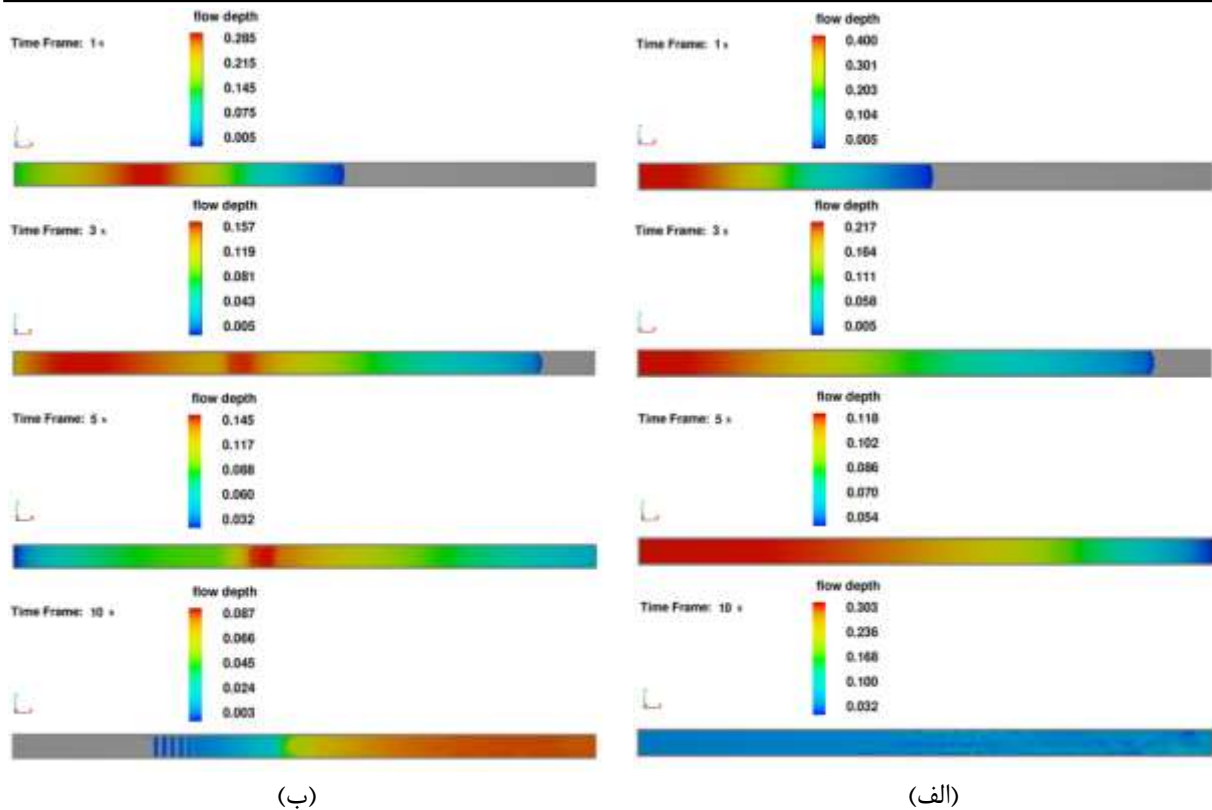
با افزایش شیب، مقادیر سرعت در حال کاهش ولی دارای اختلاف ناچیز می‌باشد و در شیب ۵٪ به کمترین مقدار خود می‌رسد. رنج تغییرات سرعت در این زمان و برای این نقطه اندک است بدین علت که در زمان‌های اولیه، تاثیر شیب کف بر مشخصات جریان وارد نشده است ولی با گذشت و در زمان‌های ۵، ۷ و ۱۰ ثانیه پس از باز شدن دریچه، تاثیر شیب کف وارد جریان شده و سرعت در شیب ۵٪ بیشترین مقدار را دارد. در مخزن عریض، در زمان‌های ۲، ۵، ۷ و ۱۰ ثانیه پس از باز شدن دریچه، هم در نقطه G3 و هم در نقطه G5، شیب کف تاثیر قابل توجهی بر روی سرعت‌ها در این زمان‌ها نداشته است. مقایسه سرعت بین مخزن طویل و مخزن عریض در نقطه G5 نشان می‌دهد که در شیب ۵ درصد، سرعت در مخزن طویل در زمان‌های مختلف پس از باز شدن دریچه بیشتر از مخزن عریض است چرا که در مخزن طویل به دلیل همراستا بودن مخزن و کانال با



(ب)

(الف)

شکل (۸) نحوه حرکت موج سیلابی در زمان‌های ۱، ۳، ۵ و ۱۰ ثانیه در کانال با مخزن عریض: (الف) شیب کف صفر، (ب) شیب کف ۵٪.



شکل (۹) نحوه حرکت موج سیلابی در زمان‌های ۱، ۳، ۵ و ۱۰ ثانیه در کانال با مخزن طولی؛ (الف) شیب کف صفر، (ب) شیب کف ۵٪.

مختلف ارائه شده است. همچنین درصد اختلاف‌های روابط تجربی با مقادیر عددی در جدول (۶) بدست آمده است. روابط تجربی موجود برای تخمین دبی بیشینه در محل سد برای فرض مخزن به صورت افقی (بدون شیب) ارائه شده است. در این روابط،  $V_w$  حجم مخزن،  $m$  ضریب تصحیح (که در تحقیق یک در نظر گرفته شده است)،  $b$  عرض مخزن،  $h_0$  عمق اولیه آب و  $Q_p$  دبی پیک است. در رابطه پیلوتی و همکاران همکاران [۲۳]، برای شرایطی که  $a/A_0 \geq 0.3$  باشد،  $a/A_0$  نسبت شکست،  $A_0$  سطح مقطع کل سد،  $a$  سطح مقطع شکست و  $h_0$  عمق آب در محل سد است. مقادیر بدست آمده بیانگر آن است که در مخزن طولی، با افزایش شیب کف مخزن، مقدار دبی بیشینه در محل دریاچه کاهش پیدا می‌کند و در حالت شیب افقی بیشترین مقدار دبی در محل سد اتفاق می‌افتد. ذکر این نکته ضروری است که کاهش مقدار دبی بیشینه بصورت قابل توجه نمی‌باشد. در مخزن عریض نیز بیشترین مقدار دبی متعلق به بستر افقی است. در این مخزن با افزایش شیب نسبت به حالت افقی ابتدا دبی بیشینه کاهش و سپس شروع به افزایش می‌کند.

نوسانات ایجاد شده برای شیب کف افقی و شیب کف مخزن ۵ درصد تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد و تفاوت قابل ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود. این امر بیانگر این حقیقت است که شیب کف مخزن در این حالت تاثیر چندانی بر روی تغییرات سطح آب نگذاشته است. در شکل (۹)، روند حرکت موج ناشی از شکست سد در پایین‌دست مخزن طولی برای شیب کف مخزن صفر (کف افقی) و ۵ درصد مشاهده می‌شود. نتایج بیانگر آن است که شیب کف در مخزن طولی تغییرات قابل ملاحظه‌ای روی سطح آب ایجاد کرده است و این تغییرات تا انتهای کانال پایین‌دست ادامه پیدا کرده است.

### ۳-۴- دبی بیشینه ناشی از شکست سد در محل دریاچه

جدول (۵)، اختلاف بین مقادیر دبی بیشینه پیش‌بینی شده توسط فرمول‌های تجربی با مقادیر عددی بدست آمده از شبیه‌سازیها برای دبی بیشینه در محل دریاچه برای دو مخزن طولی و عریض با در نظر گرفتن شیب‌های کف

جدول (۵) مقایسه دبی بیشینه پیش‌بینی شده در محل سد برای شیب‌های مختلف کف مخزن در مخازن طویل و عریض توسط مدل عددی با مقادیر روابط تجربی.

نتایج شبیه‌سازی سه‌بعدی								دبی بیشینه (m <sup>3</sup> /s)	رابطه پیشنهادی	مرجع
مخزن عریض				مخزن طویل						
شیب %۵	شیب %۳/۵	شیب %۲	حالت افقی	شیب %۵	شیب %۳/۵	شیب %۲	حالت افقی			
								۰/۵۲	$Q_p = 1.268(h_0 + 0.3)^{0.25}$	Kirkpatrick (1977) [16]
								۰/۱۲	$Q_p = 0.9mbh_0^{1.5}$	Colin and Pochat (1978) [17]
								۰/۶۹	$Q_p = 1.154(V_w h_0)^{0.412}$	MacDonald and Langridge-Monopolis (1984) [18]
								۱/۵۱	$Q_p = 1.776(V_w)^{0.47}$	Singh and Snorrason (1984) [19]
								۰/۴۵	$Q_p = 0.763(V_w h_0)^{0.42}$	Costa (1985) [20]
								۰/۹۳	$Q_p = 1.122(V_w)^{0.57}$	Costa (1985) [20]
								۰/۱۷۶	$Q_p = 0.607(V_w^{0.295} h_0^{1.24})$	Froehlich (1995)[21]
								۰/۰۲	$Q_p = Fb(gh_0^3)^{0.5}$	Tahershamsi et al. (2003) [22]
								۰/۱۱۹	$\frac{Q_p}{A_0 \sqrt{gh_0}} = k (a/A_0) \left(\frac{8}{27}\right)^{a/A_0}$	Pilotti et al., (2010) [23]

جدول (۶) متوسط درصد اختلاف دبی بیشینه پیش‌بینی شده در محل سد برای شیب‌های مختلف کف مخزن در مخازن طویل و عریض.

Pilotti et al.	Froehlich	Costa	Costa	Singh and Snorrason	MacDonald and Langridge-Monopolis	Colin and Pochat	Kirkpatrick				
۰	۳۲	۸۷	۷۳	۹۲	۸۲	۰/۸	۷۷	S=0%	متوسط درصد اختلاف	مخزن طویل	
۲	۳۳	۸۷	۷۴	۹۲	۸۳	۲/۵	۷۷	S=2%			
۳	۳۴	۸۷	۷۴	۹۲	۸۳	۴	۷۸	S=3.5%			
۴	۳۵	۸۸	۷۵	۹۲	۸۳	۵	۷۸	S=5%			
۳۹	۶	۸۲	۶۳	۸۹	۷۶	۳۸	۶۸	S=0%			مخزن عریض
۳۴	۱۰	۸۳	۶۵	۸۹	۷۷	۳۲	۶۹	S=2%			
۳۴	۹	۸۳	۶۴	۸۹	۷۷	۳۳	۶۹	S=3.5%			
۳۸	۷	۸۲	۶۴	۸۹	۷۶	۳۷	۶۸	S=5%			

مقادیر بدست آمده برای دبی بیشینه در محل دریچه بیانگر آن است که در مخزن طویل، با افزایش شیب کف مخزن، مقدار دبی بیشینه در محل دریچه کاهش پیدا می‌کند و بیشترین مقدار دبی در حالت شیب افقی در محل سد اتفاق می‌افتد ولی رنج تغییرات اندک است. در مخزن عریض نیز بیشترین مقدار دبی متعلق به بستر افقی است. در این مخزن با افزایش شیب نسبت به حالت افقی ابتدا دبی بیشینه کاهش و سپس شروع به افزایش می‌کند. از بین روابط تجربی با توجه به درصد اختلاف‌های موجود استنباط می‌شود که سه رابطه Colin and Pochat ، Froehlich و Pilotti بهترین رابطه برای تخمین دبی پیک در محل سد ارائه می‌کنند.

#### ۵- منابع

- [۱] امیر حشمتی‌فر، امیرحسین روح زمین، امیر محمودی انزلی، "مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده شکست سد و مقایسه پاسخ‌های آزمایشگاهی"، نهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران، ۲۷ آذرماه، ۱۳۹۳.
- [2] Karakaya, K., Numerical Simulation Of The Kirazlikopru Dam Failure On The Gokirmak River, M.Sc.Thesis, The Graduate School Of Natural And Applied Science, Middle East University, 2005.
- [3] Fraccarollo, L. and Toro, E. F. "Experimental and Numerical Assessment of the Shallow Water Model for Two Dimensional Dam Break Type Problems", Journal of Hydraulic Research. Vol.33, No.6, pp.843-864, 1995.
- [4] Mireishige, E. and Akiyama, J., "Numerical and Experimental Study of Two-Dimensional Flood Flows with and without Structures", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.129, No.10, pp.817-821, 2003.
- [5] Soares-Frazaio, S., and Zech, Y., "Dam Break in Channels with 90 Bend", Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, No.11, pp.956-968, 2002.
- [6] Bellos. C.V, Soulis. J.V, and Sakkas. J.G, "Experimental Investigation of Two Dimensional Dam-Break Induced Flows", Journal of Hydraulic Research. Vol.33, No.6, pp.843-864, 1992
- [7] Zhang. H., Hassanzadeh, Y., Long, N.D and Kahawita. R., "A 1-D Numerical Model Applied to Dam-Break Flows on Dry beds", Journal of Hydraulic Research, Vol.30, No.2, pp. 211-224, 1992.
- [8] Hassanzadeh.Y, "Rapidly Varied Unsteady Flow in a Small-Scale Dry Bed Model", International

از بین روابط تجربی با توجه به درصد اختلاف‌های موجود استنباط می‌شود که سه رابطه Pilotti, Colin and Pochat و Froehlich بهترین رابطه برای تخمین دبی پیک در محل سد ارائه می‌کنند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر مشتمل بر مدل‌سازی‌های عددی به کمک نرم‌افزار جهت بررسی اثر شکل هندسی مخزن عریض و طویل در پلان با در نظر گرفتن شیب‌های کف مختلف برای مخزن و بستر خشک پایین دست بر مشخصات جریان‌های خروجی ناشی از شکست سد می‌باشد. خلاصه نتایج بدست آمده در این پژوهش بیانگر این است که در مخزن عریض با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب در پایین دست و بالادست سد تفاوت چندانی نمی‌کند ولی نوسانات شدید سطح آب در مخزن عریض در تمامی شیب‌ها در پایین دست دریچه مشاهده می‌شود. دلیل این نوسانات می‌تواند ناشی از شکل مخزن باشد. در مخزن طویل و در نقاط بالادست دریچه، با افزایش شیب کف مخزن تراز سطح آب در حال کاهش می‌باشد و کمترین تراز سطح آب برای شیب کف ۵٪ مشاهده می‌شود. در نقاط پایین دست دریچه مخزن طویل، با افزایش شیب کف مخزن، تراز سطح آب در حال کاهش است و با گذشت زمان و در حدود  $t = 7s$  مشاهده می‌شود که افت تراز سطح آب برای شیب‌های ۳/۵ و ۵ درصد بیشتر از شیب‌های دیگر است. در مخزن طویل تقریباً در محل دریچه در زمان‌های اولیه بعد از باز شدن دریچه، مقدار مقدار سرعت در مخزنی که دارای کف شیب ۵٪ است، دارای بیشترین مقدار است و با کاهش شیب، مقادیر سرعت نیز در حال کاهش می‌باشد. ولی در نقاطی که دارای فاصله از محل دریچه می‌باشند، در لحظات اولیه بعد از باز شدن دریچه مقدار سرعت در مخزنی که دارای کف شیب افقی است، دارای بیشترین مقدار است و با افزایش شیب، مقادیر سرعت در حال کاهش می‌باشد. ولی با گذشت، تاثیر شیب کف وارد جریان شده و سرعت در شیب ۵٪ بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در مخزن عریض هم در نقاط نزدیک و هم در نقاط دور از دریچه شیب کف تاثیر قابل توجهی بر روی سرعت‌ها در زمان‌های مختلف بعد از باز شدن دریچه نداشته است.

- [22] Tahershamsi, A., Ponce, V. M., and Shetty, A.V., "Embankment Dam Breaching", Geometry and Peak Outflow Characteristics". Journal of Dam Engineering. Vol.14, No.2, pp. 73-82, 2003.
- [23] Pilotti, M., Tomirotti, M., Valerio, G., and Bacchi, B., "Simplified Method for the Characterization of the Hydrograph Following a Sudden Partial Dam Break." Journal of Hydraulic Engineering, Vol.136, No.10, pp.693-704, 2010.
- Journal of Engineering. Vol.10, No.1, pp.1-10, 1997.
- [9] Xue, Y., Xu, W. L., Luo, S. J., Chen, H. Y., and Li, N., "Experimental Study of Dam Break Flow in Cascade Reservoirs with Steep Bottom Slope", Journal of Hydrodynamics, Vol.23, No.4, pp.491-497, 2011.
- [۱۰] آناهیتا جوزدانی، عبدالرضا کبیری سامانی، "کاربرد روش پردازش تصاویر در تحلیل رفتار سیلاب ناشی از شکست سد"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۹.
- [11] Feizi, A., Tahershamsi, A., and Soares-Fraza, S., "Experimental Investigation of Reservoir Geometry Effect on Dam-Break Flow", Journal of Hydraulic Research, Vol.50, No.4, pp.376-387, 2012.
- [12] Petaccia, G., Leporati, F., and Torti, E., "OpenMP and CUDA Simulations of Sella Zerbino Dam Break on Unstructured Grids", Journal of Computational Geosciences. Vol.20, No.5, pp.1123-1132, 2016.
- [13] Javadian, M., Kaveh, R., and Mahmoodinasab, F., "A Study on Experimental Model of Dam Break Problem and Comparison Experimental Results with Analytical Solution of Saint-Venant Equations", International Journal of Advanced Biotechnology and Research. Vol.7, pp.1239-1245, 2016.
- [14] Wilcox, D., "Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries. Inc". La Canada, California, 1998.
- [15] Flow-3D® Help, Flow science Inc, Ver. 11, 2015.
- [16] Kirkpatrick, G.W., "Evaluation Guidelines for Spillway Adequacy", Engineering Foundation Conf. The Evaluation of Dam Safety, pp.395-414. ASCE, New York, 1997.
- [17] Colin, E., Pochat, R., "Calcul d'onde de Submersion Due à la Rupture d'un Barrage (Computation of Wave due to Dambreak). CTGREF, Etude No. 25, 42 p [in French], 1978.
- [18] MacDonald, T.C., and Langridge-Monopolis, J., "Breaching Characteristics of Dam Failures", Journal of Hydraulic Engineering. Vol.110, No.5, pp.567-586, 1984.
- [19] Singh, K.P., and Snorrason, A., "Sensitivity of Outflow Peaks and Flood Stages to the Selection of Dam Breach Parameters and Simulation Models", Journal of Hydrology Engineering. Vol.68, pp.295-310, 1984.
- [20] Costa, J. E., "Floods From Dam Failures", US Geological Survey, Open-File Rep. No.85-560, Denver, 54 p, 1985.
- [21] Froehlich, D.C., "Peak Outflow from Breached Embankment Dam", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.121, No.1, pp.90-97, 1995.