

# شبیه سازی عددی سه بعدی جریان ناشی از شکست ناگهانی سد در مسیرهای قوسی

اکبر صفرزاده<sup>\*۱</sup>

۱- دانشیار مهندسی عمران آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

\*safarzadeh@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۳/۲۵]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۱/۲۲]

## چکیده

در این مقاله، هیدرودینامیک سه بعدی شکست سد در مسیرهای قوسی به صورت عددی مدلسازی شده و تاثیر زاویه و شعاع انحنای قوس بر الگو و چگونگی حرکت موج سیلاب بررسی شده است. هدف اصلی، بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های پدیده شکست سد در مسیرهای مستقیم و قوسی است. نتایج به دست آمده نشان داد که در لحظات اولیه شکست سد در مسیر مستقیم، بخاطر تاثیر موج دینامیکی، یک پیک موضعی در هیدروگراف سیلاب رخ می‌دهد و تا فاصله‌ای در پائین دست سد این پدیده حفظ می‌شود. در حالیکه در بازه‌های قوسی بواسطه نامتعادل شدن موج سیلاب پیش رونده، چنین پدیده‌ای تنها در محل سد رخ داده و به سرعت از بین می‌رود. وجود بازه قوسی باعث کاهش شتاب حرکت موج سیلاب شده و تاثیر قوس بر روند حرکت موج سیلاب در امتداد جداره داخلی بسیار بیشتر از جداره‌های خارجی و خط مرکزی کانال است. تغییر شعاع انحنای تاثیر زیادی بر حرکت موج سیلاب در امتداد جداره داخلی قوس داشته ولی تاثیر این پارامتر در سرعت حرکت موج سیلاب در امتداد جداره بیرونی و خط مرکزی کانال زیاد نیست. مسیر قوسی فقط بر شاخه صعودی هیدروگراف سیلاب و مشخصات نقطه پیک تاثیر گذار بوده و شاخه نزولی مشابه مسیر مستقیم است.

**واژگان کلیدی:** شکست سد، قوس رودخانه، موج سیلاب، مدل عددی، موج دینامیکی.

## ۱- مقدمه

زمینه در دانشگاه ETH سوئیس انجام دادند [2]. پژوهش‌های وسیعی در مورد شکست کلی و مقطعی سد در کانال افقی و شیب دار به وسیله پژوهشگران ارتش آمریکا در سال ۱۹۶۰ انجام شده است [3]. در سال‌های اخیر نیز مطالعات متعددی در زمینه بررسی سینماتیک شکست سد در مسیر مستقیم صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به سوارس فرازو، سوارس فرازو و زچ، سوارس فرازو و زچ و سوارس فرازو اشاره نمود [3-7]. میلر و چاودری تعدادی تست آزمایشگاهی در مورد شکست سد در قوس ۱۸۰ درجه انجام دادند [8]. بل و همکاران مطالعات یک بعدی و دو بعدی شکست سد را در مسیرهای مستقیم و قوس ۱۸۰ درجه با زبری‌های مختلف کف انجام دادند [9]. در این پژوهش برای راستی‌آزمایی مدل

جریان‌های سیلابی ناشی از شکست سد منجر به وارد آمدن خسارت قابل توجه به مجموعه سد، تاسیسات و مناطق پایین دست شده و علاوه بر آن تبعات اجتماعی و زیست محیطی فراوانی را به بار می‌آورد. بنابراین برای ارزیابی ایمنی سدهای موجود و یا طراحی سد جدید باید گستره خسارات ناشی از شکست احتمالی هر سد مطالعه شود. با این هدف، مطالعه شکست سد با استفاده از روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی انجام می‌شود. استنسی در سال ۱۹۹۸ مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی گسترده‌ای بر شکست سد روی بستر افقی در دو حالت خشک و تر انجام داد [1]. لاوبر و هگر، در سال ۱۹۹۸ مطالعات آزمایشگاهی معتبری را در این

عددی دو تست آزمایشگاهی معتبر ساخته شده است. مدل اول، مطابق شکل (۱) شکست سد در یک مسیر مستقیم با بستر افقی است که مطالعه آزمایشگاهی آن به وسیله لایبر و هگر انجام شده است [2]. این پژوهشگران برای عمومیت دادن به نتایج به دست آمده، پارامترهای مختلف حاکم بر مساله را به صورت زیر بی‌بعد نمودند:

$$\left. \begin{aligned} X &= x/h_0 \\ T &= t \sqrt{\frac{g}{h_0}} \end{aligned} \right| \begin{aligned} H &= h/h_0 \\ Q &= q/\sqrt{gh_0^3} \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $x$  فاصله طولی از محل سد،  $h$  عمق جریان،  $q$  دبی در واحد عرض و  $t$  زمان است. مدل عددی شامل یک بلوک محاسباتی با تعداد خطوط شبکه  $(800 \times 50 \times 90)$  به ترتیب در راستای  $(x, y, z)$  است. تعداد مناسب خطوط شبکه از طریق ارزیابی دقت حل عددی و با استفاده از کمینه نمودن معیار ریشه متوسط مربعات خطا بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی تعیین شده است. در مرز افقی بالادست از شرط مرزی دیواره و در مرز پائین دست از مرز خروجی استفاده شده است. بقیه مرزها به صورت تقارن در نظر گرفته شده است. مخزن به ابعاد  $L_B \times B \times h_0$  بصورت جزء حجم سیال برابر ۱ در لحظه شروع محاسبات در نظر گرفته شده است. برای تعیین هیدروگراف در هر موقعیت از بافل با تخلخل ۱۰۰ درصد استفاده شد. در این صورت صفحات بافل بدون ایجاد تغییر در میدان فقط برای اندازه‌گیری دبی در هر لحظه استفاده می‌شوند. با توجه به شکل (۲) پروفیل‌های سطح آب، هماهنگی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی، به ویژه در نواحی نزدیک بستر که متاثر از زبری است بسیار خوب بوده و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای کل داده‌ها، ۰/۰۰۳۵ است. در شکل یاد شده ثابت ماندن عمق جریان برابر ۰/۴۴ عمق اولیه در مقطع سد نیز موید درستی نتایج مدل است. هیدروگراف سیلاب در مقاطع مختلف نیز همخوان با داده‌های آزمایشگاهی بوده و علاوه بر روند تغییرات، لحظه رسیدن موج سیلاب به مقاطع و همچنین مقادیر پیک سیلاب نیز در ایستگاه‌های مختلف بسیار نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی است. نکته مهمی که در شکل هیدروگراف‌ها قابل مشاهده است، وقوع

عددی از داده‌های پژوهشگران مزبور استفاده شده است. فرازو و زچ در سال ۲۰۰۲ حرکت موج سیلاب در یک قوس تند شکسته ۹۰ درجه را به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات سطحی (SPIV<sup>۱</sup>) مطالعه نموده و به تاثیر قوس بر تغییر حرکت موج سیلاب اشاره نموده‌اند [5]. مطالعه انجام شده به وسیله این پژوهشگران در یک قوس ۹۰ درجه با شکستگی ناگهانی انجام شده است که با قوس‌های موجود در طبیعت همخوانی کمتری داشته و علاوه بر آن، مدل عددی استفاده شده به صورت دو بعدی بوده و تاثیر جریان‌های ثانویه در حرکت سیال لحاظ نشده است. بواسطه اعمال نیروی گریز از مرکز و همچنین شکل‌گیری جریان‌های ثانویه، انحنای مسیر می‌تواند باعث ایجاد تغییرات اساسی در سینماتیک و هیدرودینامیک شکست سد شود (بل و همکاران ۱۹۹۲). در این پژوهش هیدرودینامیک سه بعدی شکست سد در مسیرهای قوسی به صورت عددی مدل‌سازی شده و الگو و چگونگی حرکت موج سیلاب در طول مسیر بررسی شده است. اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از: ۱- کسب فهم فیزیکی از پدیده شکست سد در مسیرهای غیر مستقیم، ۲- بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های پدیده شکست سد در مسیرهای مستقیم و قوسی، ۳- بررسی تاثیر پارامترهای هندسی مانند زاویه مرکزی و شعاع انحنای قوس بر چگونگی پخش موج سیلاب در مسیرهای غیر مستقیم.

برای حل عددی از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده و معادلات غیر دائم بقای جرم و اندازه حرکت متوسط‌گیری شده در زمان (معادلات رینولدز) با روش حجم محدود، حل عددی شده‌اند. از مدل k-ε RNG برای بستن معادلات متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز استفاده شده است [10].

## ۲- راستی آزمایشی مدل عددی شکست سد

به منظور راستی آزمایشی عملکرد مدل عددی در پیش‌بینی پدیده شکست سد و همچنین تهیه داده‌های پایه برای تحلیل تاثیر انحنای مسیر بر چگونگی حرکت موج سیلاب، ابتدا مدل

مستقیم است.

شکل ۱ مشخصات هندسی و موقعیت ایستگاه های اندازه گیری

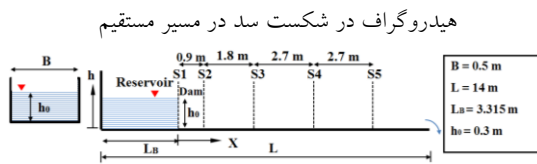


Fig. 1. Geometrical characteristics and hydrograph stations along the straight reach in a dam break test

شکل ۲. مقایسه پروفیل های سطح آب (الف) و هیدروگراف سیلاب (ب)

در ایستگاه های مختلف شکست سد در مسیر مستقیم بین داده های آزمایشگاهی (علائم) و نتایج مدل عددی (خطوط)

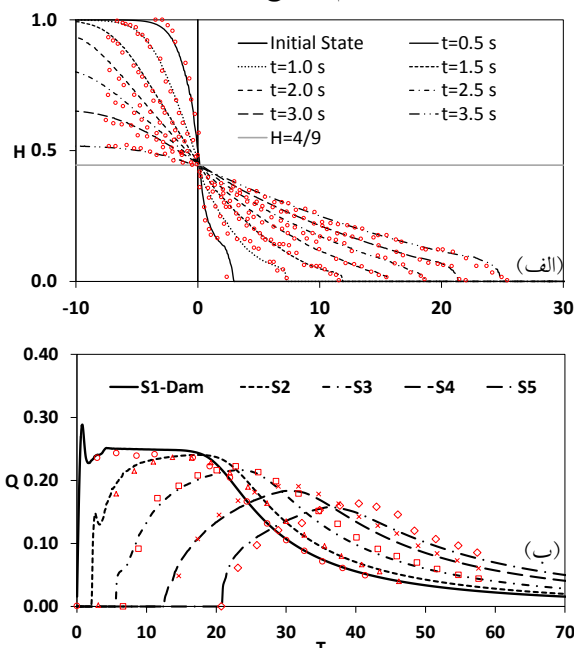


Fig. 2. Comparison of the measured (symbols) and predicted results (solid lines): (a) water surface profiles, (b) discharge hydrographs at different stations

شکل ۳ مشخصات هندسی و موقعیت ایستگاه های اندازه گیری در تست

شکست سد در قوس ۱۸۰ درجه

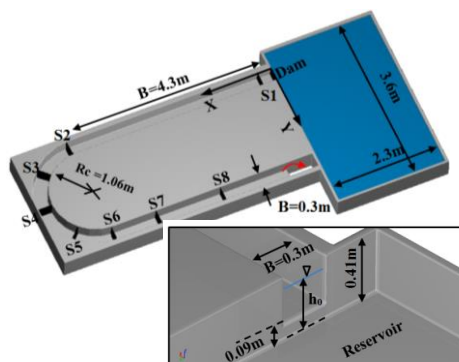


Fig. 3. Geometrical details and stations in the dam break test along a 180 degree curved channel.

پیک موضعی در لحظات اولیه و در ایستگاه های ابتدایی است. با توجه به هیدروگراف ایستگاه S1 مقدار دبی پیک موضعی حدود ۰/۳ بوده در حالیکه دبی پیک کلی، برابر ۰/۲۵ است. علت وقوع این پدیده، شکل گیری دو نوع موج در لحظات اولیه شکست سد است. با شروع شکست، ابتدا موج اولیه از لایه های تحتانی شروع به حرکت نموده و در ادامه، توده های فوقانی سیال به صورت سقوط آزاد روی لایه های تحتانی تخلیه شده و منجر به شکل گیری یک موج جدید تحت عنوان موج دینامیکی می شود. افزوده شدن حجم آب ناشی از موج دینامیکی به حجم آب موج اولیه باعث افزایش ناگهانی دبی عبوری از مقطع سد می شود. با حرکت به سمت پایین دست، بواسطه پخش موج دینامیکی روی موج اولیه، اثر آن روی هیدروگراف سیلاب از بین می رود.

مدل دوم برای ارزیابی عملکرد مدل عددی در پیش بینی جریان غیر دائم ناشی از شکست سد در مسیر غیرمستقیم در نظر گرفته شده است. مدل مورد نظر که جزئیات آن در شکل (۳) نشان داده است، مربوط به آزمایش بل و همکاران است [9]. مدل شامل یک مخزن مستطیلی بزرگ، که به مجموعه کانال قوسی ۱۸۰ درجه با دو کانال مستقیم در ابتدا و انتها متصل است. عمق اولیه آب ۰/۳۰۵ متر در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی عددی از یک بلوک محاسباتی با تعداد خطوط شبکه (۷۰، ۵۰۰ و ۵۰۰) به ترتیب در راستای (X, Y, Z) استفاده شده است. در راستای طولی و عرضی، شرط مرزی دیواره در هر دو انتهای بلوک اعمال شده و در راستای قائم از شرط مرزی تقارن برای مرز بالا ( $Z_{max}$ ) استفاده شد. برای خروج جریان از میدان، با اعمال شرط مرزی خروجی به صفحه قائم پایین ( $Z_{min}$ ) جریان از ناحیه بازشدگی انتهایی میدان تخلیه می شود. با توجه به حجم بالای میدان محاسباتی، محاسبات روی یک سرور با تعداد ۱۶ سی پی یو و ۲۴ گیگابایت رم انجام شده است. با توجه به شکل (۴) هماهنگی بسیار خوب تغییرات زمانی و مکانی مشخصات هیدرولیکی جریان غیردائم نشانگر درستی مدل سازی و دقت مدل عددی استفاده شده در شبیه سازی جریان شکست سد در مسیر غیر

سد، سه مدل با زاویه مرکزی  $180^\circ$  درجه و نسبت شعاع انحنا به عرض ۲، ۳ و ۵ در نظر گرفته شده است. در شکل (۵) هندسه مدل‌های مورد نظر نشان داده شده است. نامگذاری مدل‌ها به فرمت  $C-R/B-\theta-10h_0$  انجام شده است که پارامترهای مزبور پیشتر معرفی شده‌اند. مدل مسیر مستقیم به صورت  $S-10 \times h_0$  اسم گذاری شد.

شکل ۵. مدل‌های مختلف مسیر قوسی برای بررسی شکست ناگهانی سد

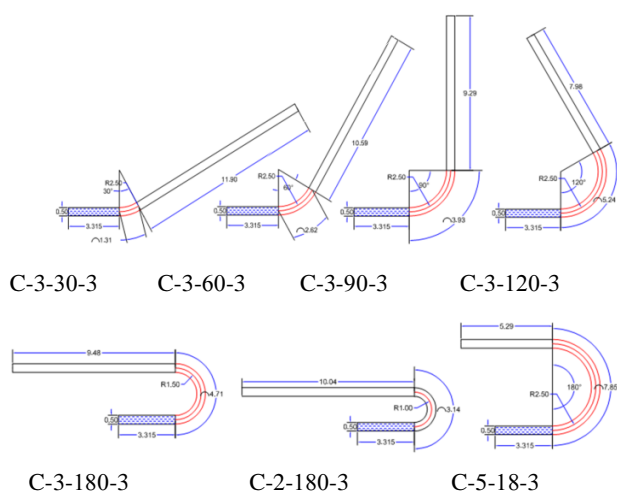


Fig. 5. Different curved channel models for sudden dam break test

برای بررسی هیدروگراف سیلاب در مسیرهای مختلف، از گزینه بافل مشابه مسیر مستقیم استفاده شده و در تمامی مدل‌ها ۵ بافل در فواصل مشابه با مسیر مستقیم مطابق شکل (۱) از سد قرار داده شده است. در تمامی مدل‌ها از یک بلوک شبکه‌بندی استفاده شده و چگونگی تنظیم هندسه و شرایط مرزی مشابه مدل راستی آزمایی شده بل و همکاران، است. تعداد خطوط شبکه‌بندی در مدل‌های مختلف از ۲ میلیون تا ۸ میلیون متغیر بوده است. در ادامه، نتایج مدل‌های مورد نظر ارائه شده با نتایج شکست سد در مسیر مستقیم که در بخش راستی آزمایی ارائه شد، مقایسه شده است.

### ۳-۱- الگوی عمومی جریان

در شکل (۶) الگوی عمومی جریان در مسیرهای مختلف قوسی ناشی از شکست ناگهانی سد واقع در ابتدای بازه قوسی نشان داده شده است. با توجه به این شکل در قوس  $30^\circ$  درجه، از لحظه  $0.4$  ثانیه به طور واضح پیشانی موج در امتداد یک

شکل ۴. مقایسه تغییرات زمانی (الف): سطح آب در جداره بیرونی ایستگاه‌های مختلف و (ب): پروفیل پیشانی موج سیلاب بین داده‌های آزمایشگاهی (Bell et al., 1992) و نتایج مدل عددی این پژوهش.

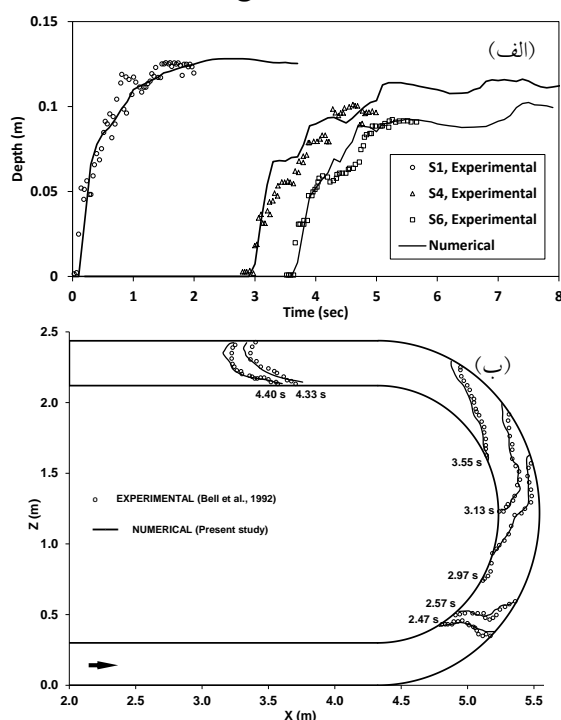


Fig. 4. Comparison of temporal variations of the (a): water surface along the outer bank at different stations and (b): profiles of the flood wave front between the measured (symbols) and predicted results (solid lines)

## ۳- مدلسازی عددی شکست سد در مسیرهای قوسی با هندسه مختلف

در بخش قبل، مدل عددی برای داده‌های آزمایشگاهی شکست سد در مسیر مستقیم که به وسیله هگر و لابر گزارش شده است، مورد ارزیابی هیدرودینامیکی قرار گرفت. در این بخش برای مقایسه ویژگی‌های متمایز شکست سد در مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم، کانال‌های قوسی با عرض مشابه آزمایش هگر و لابر با شعاع انحنا ( $R$ ) و زاویه‌های مرکزی ( $\theta$ ) مختلف به شکلی ساخته شده است که طول و حجم مخزن در تمامی آنها به ازای اعماق اولیه مخزن  $0.3$  متر یکسان بوده و علاوه بر آن، طول مسیر حرکت سیلاب نیز از محل سد تا انتهای مسیر در تمامی مدل‌ها یکسان باشد. برای بررسی تاثیر زاویه قوس از ۵ مدل با زوایای مرکزی  $90^\circ$ ،  $60^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $120^\circ$  و  $180^\circ$  درجه و نسبت شعاع انحنا به عرض  $R/B=5$  استفاده شد و برای بررسی تاثیر شعاع انحنا قوس در شکست

ولی با حرکت به سمت پایین دست، ضمن پخش شدن در کل عرض کانال مستقیم پایین دست، بواسطه برخورد به دیواره‌های کانال، بطور متناوب تغییر مسیر می‌دهد به گونه‌ای که با توجه به شکل، در لحظه ۲ ثانیه، توده پر سرعت در نزدیکی جداره داخلی بوده ولی پس از گذشت ۱ ثانیه، موج سیلاب به سمت جداره بیرونی منتقل شده است. در این حالت نیز مشابه حرکت موج سیلاب در مسیر مستقیم، بیشینه سرعت موج سیلاب، کمی عقب تر از پیشانی موج رخ می‌دهد.

خط مستقیم نبوده و در امتداد جداره داخلی، پیشانی موج سیلاب عقب می‌ماند. تا زمانی که جریان در محدوده قوس حرکت می‌کند، به تدریج عمق جریان در امتداد جداره بیرونی افزایش یافته و یک شیب عرضی در سطح آب ایجاد می‌شود. پس از پر شدن مسیر قوسی به وسیله جریان، شیب عرضی سطح آب کاهش پیدا کرده و در مقابل، یکسری امواج و اغتشاشات سطحی در جریان داخل قوس ایجاد می‌شود. موج سیلاب خروجی از قوس ابتدا در امتداد جداره بیرونی بوده

شکل ۶. الگوی عمومی جریان در لحظات پس از شکست ناگهانی سد در مسیرهای قوسی با زوایای مختلف

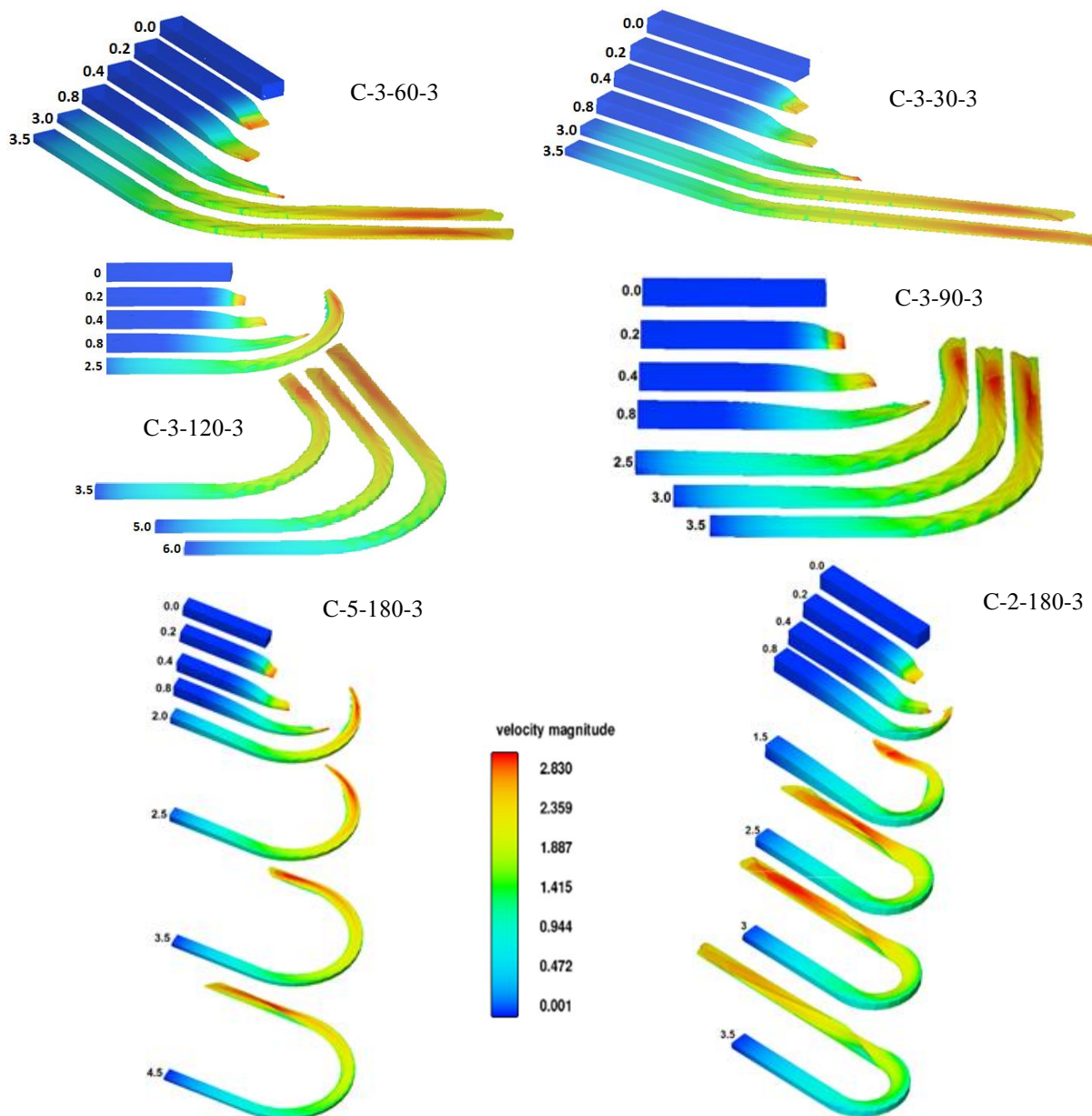


Fig. 6. Temporal variations of the general flow field in sudden dam break along the curved channels with different angle

## ۳-۲- چگونگی پیشروی پیشانی موج

در شکل (۷) تغییرات زمانی پروفیل پیشانی موج در امتداد قوس های مختلف نشان داده شده است. در تمامی حالات، تا لحظه ۰/۲ ثانیه موج سیلاب به صورت متعادل حرکت کرده ولی از آن لحظه به بعد، به واسطه تاثیر قوس، پیشانی موج سیلاب به سمت جداره بیرونی منحرف شده و به عبارت بهتر، سیلاب در امتداد قوس بیرونی سریع تر حرکت می کند. با گذشت زمان، پیشانی موج در امتداد جداره بیرونی کشیده تر شده و پس از رسیدن به خروجی قوس، به تدریج شروع به پخش شدن در کل عرض کانال می نماید. این پدیده به معنی حرکت موج به سمت جداره داخلی است که در مسیر مستقیم پایین دست بین لحظات ۱ تا ۳ ثانیه، پیشانی موج در امتداد جداره داخلی حرکت می کند. در مدل C-5-30-3 در لحظات اول، موج سیلاب به صورت یک بعدی حرکت نموده و پس از تاثیر قوس، حرکت پیشانی موج به صورت دوبعدی است. در انتهای مسیر مستقیم پایین دست، دوباره جریان به حالت یک بعدی بر می گردد. در انتهای قوس و همچنین بخشی از مسیر مستقیم که پیشانی موج در امتداد جداره داخلی حرکت میکنند، به جز ناحیه پر سرعت پیشانی که جلوتر از بقیه نواحی جریان دارد، در سایر بخش ها، پیشانی موج حالت مغشوش داشته و باعث اتلاف انرژی و کندتر شدن حرکت موج می شود. با حرکت به سمت پایین دست، شکل پیشانی موج حالت یکنواخت تر پیدا می کند.

با افزایش زاویه قوس، از شدت اغتشاش پیشانی موج در خروجی کاسته شده و موج حالت کشیده تر پیدا می کند. علت این امر این است که در قوس ۳۰ درجه پس از تاثیر قوس بر حرکت موج، در فاصله کوتاهی، موج از قوس خارج شده و مجبور به هماهنگی وضعیت خود با مسیر مستقیم می شود ولی در قوس ۶۰ درجه، طول قوس بزرگتر بوده و فرصت بیشتری برای تاثیرگذاری روی حرکت موج و انتقال پیشانی پر سرعت به جداره بیرونی را دارد.

در تمامی مدل های نشان داده شده دیگر نیز، افزایش عمق در امتداد جداره بیرونی قوس و همچنین تغییر متناوب مسیر موج سیلاب در کانال مستقیم پایین دست مشهود است. با توجه به شکل های قوس های ۱۸۰ درجه با شعاع انحناهای مختلف، با کاهش شعاع انحنا، بواسطه افزایش نیروی گریز از مرکز، زمانی که سیلاب وارد مسیر قوسی می شود، افزایش عمق جریان در امتداد جداره بیرونی قوس تشدید شده و شیب عرضی سطح آب افزایش می یابد. به همین علت در قوس با کمترین شعاع انحنا ( مدل C-2-180-3) در بخش عمده ای از زمان های نشان داده شده، عمق آب در امتداد جداره داخلی بسیار کم است و این در حالیست که در قوس های با شعاع انحنا بزرگتر، موج سیلاب به صورت یکنواخت تر در داخل قوس پخش می شود.

با تندتر شدن قوس، جریان سیلاب در نیمه اول قوس ذخیره شده و باعث بالاروی شدید سطح آب در این محدوده می شود. در این حالت بواسطه شعاع انحنای کوچک، نیمه دوم به صورت یک مانع در مقابل حرکت سیلاب عمل کرده و جریان به سرعت نمی تواند به سمت نیمه دوم تخلیه شود و به همین علت چگونگی حرکت موج سیلاب در نیمه دوم دچار تغییر می شود. نگاهی به تصویر حرکت سیلاب در قوس C-2 در لحظه ۱/۵ ثانیه نشان می دهد که جریان خروجی از نیمه اول وقتی وارد نیمه دوم قوس می شود، ناپایدار شده و در کل عرض کانال پخش می شود و حرکت موج سیلاب در امتداد جداره های بیرونی و داخلی اختلاف چندانی با هم نشان نمی دهند. این در حالیست که با ملایم تر شدن قوس، موج سیلاب، بدون ایجاد وقفه و ذخیره شدن در نیمه اول، همواره در امتداد جداره بیرونی حرکت کرده و در همین وضعیت نیز از قوس خارج می شود. در تمامی قوس ها، جریان خروجی از قوس به دیواره داخلی برخورد کرده و باعث شکل گیری یک موج سطحی، مشابه موج شوک در امتداد کانال مستقیم پائین دست می شود. در قوس های تند، شروع موج سطحی مزبور در ابتدای کانال مستقیم و بلافاصله پس از قوس قرار داشته ولی با ملایم تر شدن قوس، موج به سمت پایین دست منتقل می شود.

شکل ۷. تغییرات زمانی شکل پیشانی موج پس از شکست ناگهانی سد در مسیرهای قوسی با هندسه های مختلف.

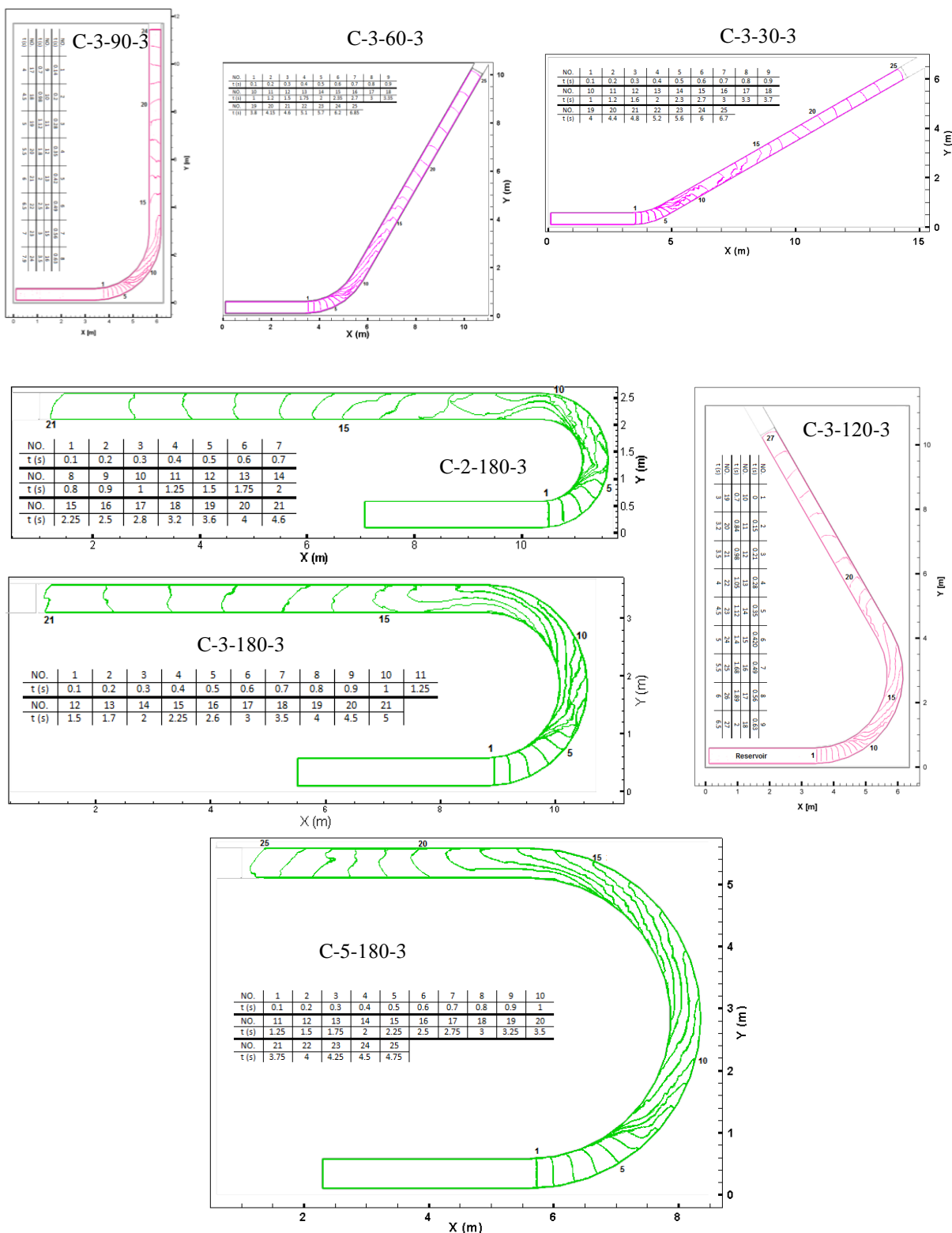


Fig. 7. Temporal variations of the wave front shape after the dam break along the curved channels with different angles

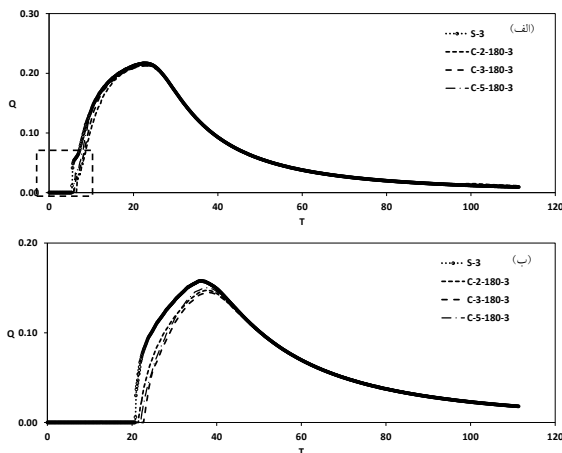
مستقیم پس از قوس طی نماید در حالیکه در قوس های ۹۰ درجه و به ویژه در قوس ۱۲۰ درجه بواسطه چرخش مسیر مستقیم به سمت چپ و مخالف با جریان خروجی از قوس، در

مسیر مستقیم پایین دست در قوس های ۳۰ و ۶۰ درجه، همسو با جریان خروجی از قوس بوده و به همین علت، موج سیلاب می تواند مسیر طولانی را در امتداد جداره بیرونی بخش

بی بعد شده‌اند. به منظور بررسی کمی، مقایسه هیدروگراف‌ها در مقاطع مختلف بین قوس‌های مختلف با شعاع انحنا و زاویه‌های متعدد انجام شده است. غیر مستقیم بودن مسیر حرکت سیلاب باعث از بین رفتن سریع تاثیر موج دینامیکی بر شکل هیدروگراف سیلاب شده است. در مسیر مستقیم، بررسی هیدروگراف سیلاب در مقطع ۱۱/۴ متری از مقطع سد نشان می‌دهد که شاخه صعودی هیدروگراف دارای دو بخش با شیب‌های متفاوت است.

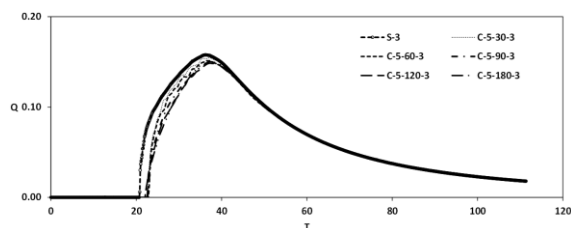
دبی سیلاب در بازه زمانی [5,8,6] به شدت افزایش می‌یابد و به عبارت بهتر، هیدروگراف به صورت یک خط قائم بوده و پس از آن با کاهش نرخ افزایش دبی، هیدروگراف تا نقطه پیک ادامه می‌یابد. چنین شرایطی در بازه‌های قوسی مشاهده نشده و روند تغییرات دبی رفتار دو گانه نشان نمی‌دهد.

شکل ۸، مقایسه هیدروگراف سیلاب در محل سد (الف) ۶ متر پایین دست سد (ب) ۱۱/۴ متر پایین دست بین مسیر مستقیم و مسیر قوسی ۱۸۰ درجه به شعاع انحناهای مختلف.



**Fig. 8.** Comparison of the flood hydrographs between the straight channel and 180 degree curved channel with different central radius. (a): 6m downstream of the dam, (b): 11.4m downstream of the dam

شکل ۹، تاثیر زاویه قوس بر هیدروگراف سیلاب ۱۱/۴ متر بعد از سد.



**Fig. 9.** Effect of the curve angle on flood hydrograph at the station 11.4m downstream of the dam

فاصله کوتاهی پس از خروجی قوس، موج سیلاب پخش شده و انحراف یک سویه جریان سیلاب به سمت جداره داخلی به شدت کاهش می‌یابد. مقایسه الگوی حرکت سیلاب در مدل‌های C-5-120-3 و C-5-90-3، C-5-60-3، C-5-30-3 به خوبی این نکته را مشخص می‌سازد به شکلی که در قوس ۱۲۰ درجه، جریان سیلاب بواسطه پخش بهتر در مقاطع ابتدایی مسیر مستقیم پایین دست، سریع‌تر از سایر قوس‌ها حالت توسعه یافته پیدا کرده و به سمت یک بعدی شدن متمایل می‌شود. در قوس ملایم (C-5-180-3)، مسیر حرکت پیشانی موج به تدریج توسعه یافته و با حفظ بیشینه سرعت در امتداد جداره بیرونی از قوس خارج می‌شود. پس از خروج موج سیلاب از قوس، تا یک طول معین، پیشانی موج در امتداد جداره بیرونی حرکت کرده و به صورت تدریجی به سمت جداره داخلی منحرف می‌شود و هیچ اغتشاشی در پیشانی موج مشاهده نمی‌شود. با کاهش شعاع انحنا، الگوی حرکت سیلاب در کل طول قوس نسبت به مدل قوس ملایم تغییر می‌کند. در نیمه اول قوس با کاهش شعاع انحنا، اغتشاش شدیدی در پیشانی موج رخ داده و باعث ایجاد انسداد و حرکت کند موج قبل از راس قوس می‌شود. این پدیده در قوس با نسبت شعاع انحنا به عرض ۲ کاملاً مشهود است، به شکلی که پیشانی موج در امتداد جداره داخلی کاملاً ناهموار و دارای اغتشاش شدید است. علت این امر، برخورد شدید جریان ناشی از سیلاب به دیواره بیرونی و انعکاس موج به سمت جداره داخلی است.

### ۳-۳- روند تغییرات هیدروگراف سیلاب

در این بخش، تغییرات هیدروگراف سیلاب ناشی از شکست سد در مدل‌های مختلف و در مقاطع مختلف که در آنها بافل تعریف شده بود، استخراج و ارائه شده است. تاثیر زاویه قوس و شعاع انحنای قوس بر روند تغییرات زمانی و همچنین دبی پیک سیلاب بحث شده است. در شکل‌های (۸) و (۹) هیدروگراف سیلاب در مقاطع مختلف پس از سد در مدل پایه، قوس با شعاع انحناهای مختلف از ۳۰ تا ۱۲۰ درجه و همچنین مدل‌های قوسی ۱۸۰ درجه با سه شعاع انحنای مختلف به ازای عمق آب اولیه ۰/۳ در مخزن نشان داده شده است. لازم به گفتن است که دبی و زمان با استفاده از رابطه (۳)



بواسطه شعاع انحنای کوچک، نیمه دوم به صورت یک مانع در مقابل حرکت سیلاب عمل کرده و جریان به سرعت نمی‌تواند به سمت نیمه دوم تخلیه شود و به همین علت چگونگی حرکت موج سیلاب در نیمه دوم دچار تغییر می‌شود.

۳- در انتهای قوس تند و همچنین بخشی از مسیر مستقیم که پیشانی موج در امتداد جداره داخلی حرکت میکند، به جز ناحیه پر سرعت پیشانی که جلوتر از بقیه نواحی جریان دارد، در سایر بخش‌ها، پیشانی موج حالت مغشوش داشته و باعث اتلاف انرژی و کندتر شدن حرکت موج می‌شود. با حرکت به سمت پایین دست و تمایل پیشانی موج به سمت یک بعدی شدن، شکل پیشانی موج حالت یکنواخت تر پیدا می‌کند.

۴- مسیر مستقیم پایین دست در قوس‌های ۳۰ و ۶۰ درجه، همسو با جریان خروجی از قوس بوده و به همین علت، موج سیلاب می‌تواند مسیر طولانی را در امتداد جداره بیرونی بخش مستقیم پس از قوس طی نماید در حالیکه در قوس‌های ۹۰ درجه و به ویژه در قوس ۱۲۰ درجه به واسطه چرخش مسیر مستقیم به سمت چپ و مخالف با جریان خروجی از قوس، در فاصله کوتاهی پس از خروجی قوس، موج سیلاب پخش شده و انحراف یک سویه جریان سیلاب به سمت جداره داخلی به شدت کاهش می‌یابد.

۵- تغییر شعاع انحنا تاثیر زیادی بر حرکت موج سیلاب در امتداد جداره داخلی قوس دارد. در قوس‌های تند، موج سیلاب، مدت بسیار بیشتری در نیمه اول قوس متوقف می‌شود.

۶- مقایسه هیدروگراف سیلاب برای مسیرهای قوسی با شعاع انحنای مختلف نشان می‌دهد در مقاطع اولیه بعد از سد، هیدروگراف‌ها بر هم منطبق بوده و با حرکت به سمت پایین دست، بخش صعودی و همچنین مقدار دبی پیک هیدروگراف‌ها باهم اختلاف دارند ولی بخش‌های نزولی برهم منطبق است. به شکلی که با کاهش شعاع انحنای قوس، شیب شاخه صعودی کاهش پیدا کرده و مقدار دبی پیک نیز افت می‌کند. علاوه بر آن، زمان وقوع دبی پیک نیز با کاهش شعاع انحنا، به تاخیر می‌افتد. بر خلاف تغییر شعاع انحنا، افزایش زاویه قوس، تاثیر چندانی بر زمان وقوع دبی پیک ندارد. مشابه

کاهش شیب شاخه صعودی مسیرهای قوسی نسبت به مسیر مستقیم، ناشی از تاثیر قوس در کند نمودن حرکت سیلاب است.

در شکل (۱۳) هیدروگراف سیلاب در مقاطع مختلف پایین دست سد واقع در مسیر مستقیم و قوس با زوایای مختلف باهم مقایسه شده است. با افزایش زاویه قوس، ضمن کاهش شیب منحنی بالارونده هیدروگراف، مقدار دبی پیک نیز کاهش می‌یابد. در مسیرهای قوسی ۳۰ و ۶۰ درجه شکل شاخه صعودی هیدروگراف مشابه با مسیر مستقیم دارای دو بخش با شیب‌های مختلف بوده و با افزایش زاویه مرکزی قوس، بخش قائم شاخه صعودی هیدروگراف از بین می‌رود. بر خلاف تغییر شعاع انحنا، افزایش زاویه قوس، تاثیر چندانی بر زمان وقوع دبی پیک ندارد. مشابه تغییر شعاع انحنا، تغییر زاویه قوس تاثیر در شکل شاخه نزولی هیدروگراف نداشته و در قوس با زوایای مختلف، شاخه نزولی هیدروگراف‌ها برهم منطبق است.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، شکست سد در مسیرهای قوسی با زوایا و شعاع انحنای مختلف به صورت سه بعدی و با مدل سطح آزاد شبیه‌سازی عددی شده و الگوی سه بعدی حرکت سیلاب، شکل پیشانی موج، تغییرات زمانی موقعیت پیشانی موج سیلاب در امتداد جداره‌های داخلی، خارجی و خط مرکزی کانال تعیین و با مدل پایه شکست سد در مسیر مستقیم مقایسه شد. عمده نتایج حاصل از این پژوهش به این شرح است:

۱- در قوس با کمترین شعاع انحنا (مدل C-2-180-3) در بخش عمده‌ای از زمان، عمق آب در امتداد جداره داخلی بسیار کم است و این در حالیکه در قوس‌های با شعاع انحنا بزرگتر، موج سیلاب به صورت یکنواخت‌تر در داخل قوس پخش می‌شود.

۲- تغییر شعاع انحنا قوس ۱۸۰ درجه تاثیر بسیار مهمی در چگونگی تخلیه سیلاب از بازه قوسی دارد. با تندتر شدن قوس، جریان سیلاب در نیمه اول قوس ذخیره شده و باعث بالاروی شدید سطح آب در این محدوده می‌شود. در این حالت

[5] Soares-Frazão, S. & Zech, Y. 2002. Dam-break in channels with  $90^\circ$  bend. *Journal of Hydraulic Engineering*. 128(11), 956–968.

[6] Soares-Frazão, S. & Zech, Y. 2007. Experimental study of dam break flow against an isolated obstacle. *Journal of Hydraulic Research*, 45(Extra Issue), 27–36.

[7] Soares-Frazão, S. 2007. Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill. *Journal of Hydraulic Research*, 45(Extra Issue), 19-26.

[8] Miller, S. & Chaudhry, H. 1989. Dam- break flows in curved channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(11), 1465–1478.

[9] Bell, W. S., Elliot, R. C. & Chaudhry, M. H. 1992. Experimental results of two-dimensional dam-break flows” *Journal of Hydraulic Research*, 30(2), 225-252.

[10] Flow-3D® Help, Ver. 10.0.1, 2011, Flow science.

تغییر شعاع انحنا، تغییر زاویه قوس تأثیری در شکل شاخه نزولی هیدروگراف ندارد.

## References

## ۶- مراجع

[1] Stansby, P., Chegini, A. & Barnes, T. 1998. The initial stages of dam-break flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 374, 407-424.

[2] Lauber, G., & Hager, W. H. 1998. Experiments to dambreak wave: horizontal channel. *Journal of Hydraulic Research*. 36 (3), 291–307.

[3] US Army Corps of Engineers. 1960. Floods resulting from suddenly breached dams. Miscellaneous Paper No. 2–374, *Waterways Experiment Station*, Vicksburg, MS.

[4] Soares Frazao, S., & Zech, Y. 1999. Effects of a sharp bend on dam-break flow” *Proc., 28th IAHR Congress*, Graz, Austria, Technical Univ. Graz, Austria.

# Three Dimensional Hydrodynamics of Sudden Dam Break in Curved Channels

A. Safarzadeh<sup>1\*</sup>

1- Assoc. Prof., Faculty of Civil Eng., University of Mohaghegh Ardabili

\*safarzadeh@uma.ac.ir

## Abstract:

In this paper, 3D hydrodynamics of dam break phenomena in curved rivers has been simulated numerically. Effects of curve angle and radius of curvature on the flood wave propagation and unsteady flow features along the curved reach at the downstream of dam has been investigated. The main objective of the research is investigation of similarities and differences between dam break phenomenon in straight and curved reaches. The commercially available CFD program Flow-3D, which utilizes the finite volume scheme for structured meshes was used for solving unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations in conjunction with the RNG  $k-\epsilon$  closure model. In the utilized software, the Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR) method is used to inspect the geometry in the finite volume mesh. FAVOR appoints the obstacles in a calculation cell with a fractional value between 0 and 1, as obstacle fills in the cell. Geometry of the obstacle is placed in the mesh by setting the area fractions on the cell faces along with the volume fraction open to flow. This approach creates an independent geometry structure on the grid, and then the complex obstacle such as spillways, mechanical parts and domains with natural bed topography can be produced in an easier way. Fluid surface shape is illustrated by volume-of-fluid (VOF) function,  $F(x,y,z,t)$ . With the VOF method, grid cells are classified as empty, full, or partially filled with fluid. Cells are allocated in the fluid fraction varying from zero to one, depending on fluid quantity. This function displays the VOF per unit volume. FLOW3D solves these semi-implicit equations iteratively using relaxation techniques. In this paper the GMRES technique has been used as pressure implicit solver. Results showed that at the initial instants of the dam break in the straight channel, due to the effects of the dynamic wave, flood hydrographs at the dam location and at a distance downstream of the dam have local peak values. While in the curved channel cases, the flood wave immediately becomes unstable after the dam break and the local peak occurs just at the dam section. The curved reach decelerate the flood wave propagation compared to the straight channel. Effect of channel curvature on the movement of the flood wave along the inner bank is higher than the outer bank and also the centerline of the curved channel. By changing the channel curvature, wave propagation is significantly affected along the inner wall of the channel, while the channel curvature does not have considerable effect on the velocity of the wave propagation along the centerline and outer wall of the curved reach. By decreasing the central radius of the bend, slope of the rising limb of the hydrograph and also the peak discharge attenuates. Furthermore, the peak discharge time reduces. Unlike the effects of the curvature of the bend, increasing the bend angle does not affect the peak discharge. Changing the bend curvature and curve angle has no effect on the falling limb of the flood hydrograph at various stations downstream of the dam.

**Keywords:** Dam break, River bend, Flood wave, Numerical Model, Dynamic wave.