

مدلسازی عددی جریان هیدرولیکی ناشی از شکست در سدها در حضور موانع

هوشنگ انصاری

کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یاسوج.

نام نویسنده مسئول:

هوشنگ انصاری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

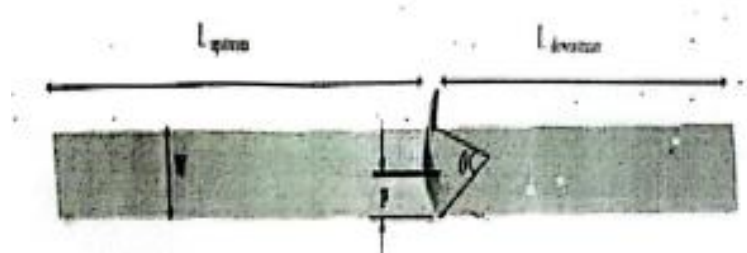
چکیده

سرریزها یکی از مهم ترین تجهیزات سدها می باشند و طراحی آنها یکی از راه های ایمن جهت انتقال سیل به پایین دست سدها می باشند. طراحی سرریزها به عوامل مختلفی از جمله دبی طراحی، نوع و موقعیت قرارگیری سد و اندازه و نوع عملکرد سد بستگی دارند. سرریزها بر اساس نوع عملکردشان به انواع مختلفی تقسیم می شوند که سرریز اوجی یکی از مهمترین سازه ها در ساختمان سد به شمار می رود. بسیاری از پدیده های موجود در مهندسی هیدرولیک شامل جریان هایی با تغییرات ناگهانی در زمان هستند. یک مثال معمول آن جریان ناشی از شکست سد می باشد. شکست سد یا خاکریز که در اقصی نقاط جهان رخ می دهد می تواند در بعد تلفات جانی و مالی فاجعه بار باشد. از آنجایی که مدل سازی چنین جریان هایی معمولاً شامل مقیاس های بزرگ زمانی و مکانی است. بطور کلی به تکنیک های عددی برای حل این نوع مسائل استناد می شود. در این پژوهش مدلی عددی به منظور شبیه سازی جریان ناشی از شکست سد در حضور موانع ارائه و معادلات آب های کم عمق به روش حجم محدود تقریب زده شده است. حل عددی مدل از پایداری بالایی برخوردار بوده و نتایج حاصله انطباق خوبی با داده های آزمایشگاهی و عددی منتشر شده ی سایر پژوهشگران از خود نشان می دهد. **واژگان کلیدی:** معادلات آب های کم عمق، شکست سد، مانع.

مقدمه

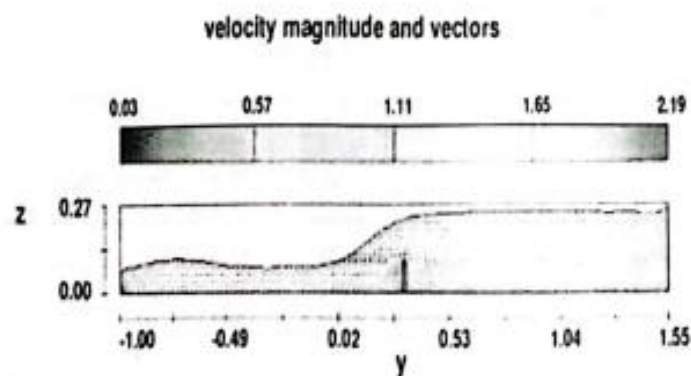
سدها از با اهمیت ترین و پرهزینه ترین سازه های دنیای امروزی هستند صرف هزینه های مالی و نیروی انسانی قابل ملاحظه در ساخت این سازه های عظیم صحنه ای بر اهمیت تحلیل و طراحی دقیق این سازه ها است. به بیانی دیگر صرف وقت دقت و هزینه بیشتر در مرحله تحلیل و طراحی که نهایتاً منجر به پیش گیری از شکست و آسیب سازه تحت بارهای بهره برداری و افزایش طول عمر آن خواهد شد. در کاهش هزینه های محتمل بعدی جهت نگهداری و تعمیر سد نقش قابل توجهی را ایفا مینماید که با توجه به اهمیت موضوع در این زمینه در ابتدا به بررسی تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته میشود و در ادامه ادبیات تحقیق آورده شده است.

با توجه به این که سرریزهای در ایمنی سدها نقش بسزایی دارد و سندهای جز سازه های استراتژیک هر کشور میباشد و خدمات رسانی آنها در صنعت و کشاورزی نقش بسزایی دارد و میتواند اقتصاد منطقه را تحت تاثیر خود قرار دهد از اهمیت بالایی برخوردار می باشد در این زمینه پژوهش هایی صورت گرفته است. که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است. خوشگفتار و همکارانش (۱۳۹۶) به مطالعه عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای قوسی داخل کانال پرداخته اند. در این پژوهش الگوی جریان به ازای تغییر شعاع انحنا ارتفاع جریان روی سرریز و عرض کانال سرریزهای قوسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدلسازی از نرم افزار فلوتریدی استفاده شده است که در شکل ۱-۳ هندسه مورد مطالعه نشان داده شده است.



هندسه سرریزهای قوسی داخل کانال در پژوهش خوشگفتار (خوشگفتار ۱۳۹۶)

در ادامه با توجه به هندسه سرریز قوسی در نرم افزار Flow3d انجام شده است و الگوی جریان مطابق شکل ۲-۲ می باشد که با بررسی های صورت گرفته نتایج نشان داد که پارامترهای عرض، زاویه انحنا و ارتفاع جریان روی سرریز جزو پارامترهای تاثیر گذار بر پارامترهای سرعت موثر میباشند. هر چند که اثر عرض کانال نسبت به دو پارامتر دیگر ناچیز میباشد. همچنین مشاهده گردید که به ازای افزایش پارامتر عرض کانال جهت گیری بردارهای سرعت و خطوط جریان تاثیر کمی میپذیرد. (خوشگفتار، ۱۳۹۶)



سرریزهای قوسی داخل کانال در برنامه در پژوهش خوشگفتار (خوشگفتار ۱۳۹۶) Flow3d

احمدی و همکارانش (۱۳۹۶) به مطالعه عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای قوسی داخل مخزن پرداخته است. در این تحقیق پارمترهای موثر بر ضریب آبگذری سرریزهای قوسی از زاویه قوس ارتفاع جریان روی سرریز و عرض قوس مورد بررسی قرار گرفته است.

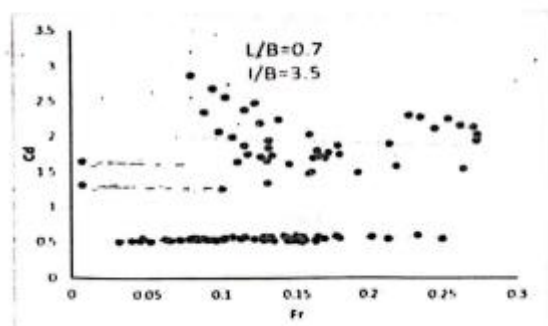
پارامترهای زاویه قوس ارتفاع جریان روی سرریز و عرض کانال تاثیر بسزایی در ضریب آبگذری دارند. به این صورت که در حالت کلی با افزایش عرض کانال ضریب آبگذری افزایش مییابد منتهی شدت این افزایش بسیار متاثر از سایر پارامترها مییابد. همچنین به ازای افزایش ارتفاع جریان روی سرریز ضریب آبگذری به میزان قابل توجهی کاهش مییابد. همچنین نتایج نشان میدهد که روند تغییرات ضریب آبگذری با افزایش پارامتر دارای رفتار دوگانه ای مییابد بطوری که این روند به ازای تغییرات پارامترهای دیگر میتواند کاهشی یا افزایشی باشد. (احمدی ۱۳۹۶)

مهری و همکارانش (۱۳۹۶) به بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی در کانال قوسی شکل پرداخته اند. در این پژوهش با بررسی آزمایشگاهی بر روی سرریز جانبی کلید پیانویی در زاویه ۱۲۰ درجه از پیچ ۱۸۰ درجه نحوه تغییرات جریان و ضریب تخلیه این سرریزها مورد مطابق شکل زیر بررسی قرار گرفت. برای این منظور جریانهایی با اعداد فرود ۰/۰۹ تا ۰/۳ در کانال قوسی با سرریز جانبی کلید پیانویی ایجاد گردید.



هندسه سرریزهای کلید پیانویی در پژوهش مهری (مهری، ۱۳۹۶)

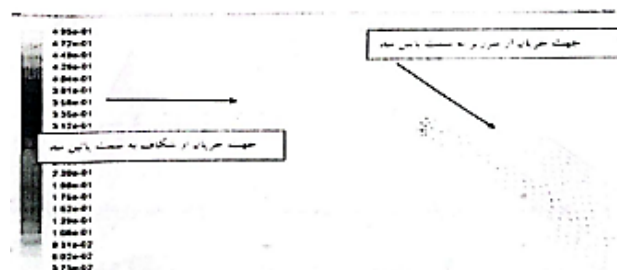
با بررسی نتایج مطابق شکل زیر از نتایج این تحقیق میتوان به بالا بودن ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی نسبت به سرریز جانبی لبه تیز اشاره نمود. همچنین پارامتر Ph نسبت بدون بعد تاثیر گذار بر روی ضریب تخلیه در این سرریزها در کانال قوسی شکل است زمانی که به عنوان سرریز جانبی است. الگوی ورودی جریان در لبه اول سرریز تا لبه دوم سرریز در سرریز کلید پیانویی زمانی که به عنوان سرریز جانبی استفاده شدند متفاوت است. (مهری، ۱۳۹۶)



بررسی ضریب تخلیه در پژوهش مهری (مهری، ۱۳۹۶)

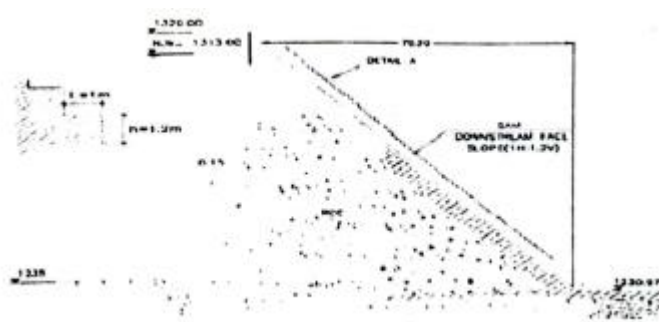
دادرسی و نادری (۱۳۹۶) به بررسی و شبیه سازی عددی جریان برای بررسی تغییرات افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه سرریز اوجی پرداخته است. در این پژوهش از این داده های آزمایشگاهی استفاده شده تا به کمک روش حجم محدود و نرم افزار فلوینت شبیه سازی عددی جریان انجام گیرد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردند جریان عبوری از سد با جت آبی مطابق شکل ۵-۲ می باشد که از شکاف ایجاد شده در بدنه سد خارج میشود

با سه زاویه مختلف و همچنین دبی های مختلف تلاقی داده شد و تاثیر آن روی کاهش طول پرش هیدرولیکی بررسی شد. سرعت جریان رویه ای افزایش می یابد و سرعت جریان در کف حوضچه آرامش بعد از محل تلاقی کاسته می شود. (دادرس، ۱۳۹۶)



بررسی جریان در پژوهش فلوینت در پژوهش دادرس (دادرس، ۱۳۹۶)

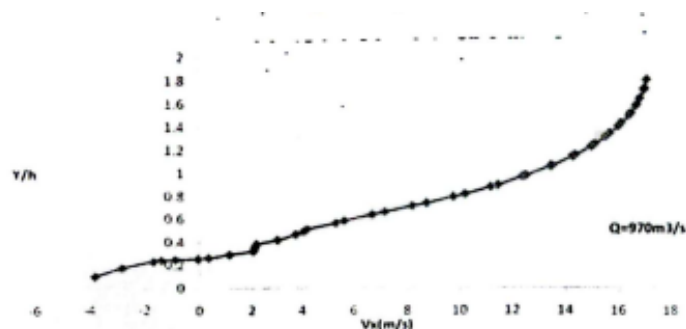
میری زاده (۱۳۹۶) به بررسی عددی رفتار هیدرولیکی جریان در نزدیکی کاویته پله های سرریز پله ای پرداخته شده است در این پژوهش به کمک نرم افزار FLUENT به مدل سازی عددی جریان غیر ریزشی در سرریز پله ای سد ژاوه مطابق هندسه شکل ۲-۶ در نرم افزار فلونت مطابق شکل ۳-۷ پرداخته شده است. میری زاده (۱۳۹۶)



هندسه سرریز پله ای سدوازه در پژوهش میری زاده (میری زاده، ۱۳۹۶)

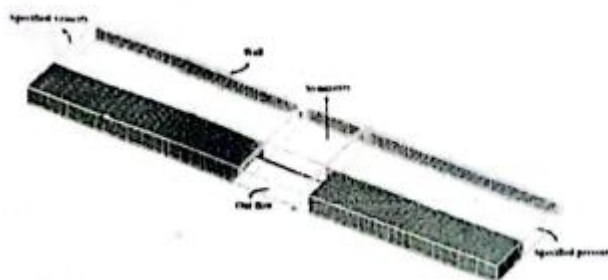
مش بندی هندسه سرریز پله ای سد واژه با برنامه فلوینت در پژوهش میری زاده (میری زاده، ۱۳۹۶)

با بررسی نتایج مطابق شکل ۲-۲ نتایج تحقیق نشانگر چرخش جریان و ایجاد گردابه ای با مرکزی به فاصله ۰/۳۹ طول بی بعد پله در کاویته بوده به طوری که وقوع این چرخش سبب معکوس شدن سرعت جریان در جهت افقی در نزدیکی کف پله و زیر گردابه شده و در بالای مرکز گردابه مقادیر مثبت برای سرعت افقی جریان را موجب میشود. همچنین وجود گردابه در کاویته پله فشار جریان در این ناحیه را دچار نوسانات شدیدی میشود. میری زاده (۱۳۹۶)



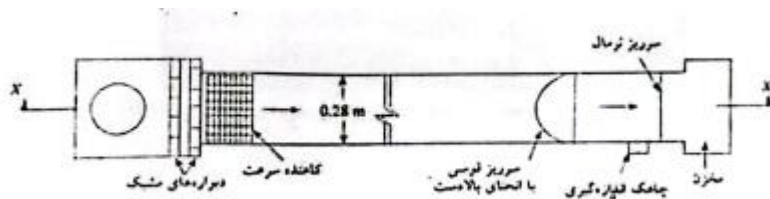
بررسی نمودار سرعت به ارتفاع آب پژوهش میری زاده (میری زاده، ۱۳۹۶)

باقری و همکارانش (۱۳۹۵) به بررسی عددی تاثیر ارتفاع تاج سرریز بر الگوی جریان در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی در امتداد سرریزهای جانبی در کانالهای روباز مطابق شکل ۲-۹ پرداخته است که با بررسی های صورت گرفته نتایج نشان داد که با کاهش ارتفاع تاج سرریز مقدار عدد فروود در مقطع اولیه پرش افزایش می یابد که منجر به قوی تر شدن پرش هیدرولیکی میشود همچنین با کاهش ارتفاع تاج سرریز میزان نوسانات سطح آب و ارتفاع پرش هیدرولیکی افزایش می یابد (باقری ۱۳۹۵)

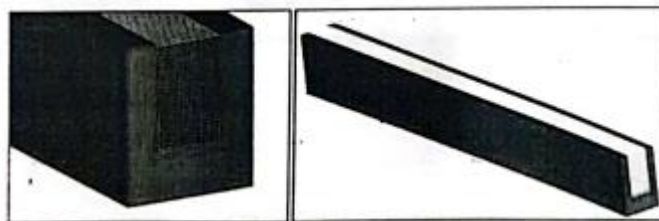


بررسی هندسه سرریز در برنامه **fliw3d** در پژوهش باقری (باقری، ۱۳۹۵)

اکبری و همکارانش (۱۳۹۵) به بررسی اثر استغراق بر جریان عبوری از روی سرریزهای قوسی پرداخته اند در این تحقیق مدل سازی عددی جریان روی یک سرریز قوسی مطابق شکل ۲-۱۰ در مخزن با استفاده از نرم افزا **low-3D** مطابق شکل ۲-۱۱ انجام شده است و قابلیت این نرم افزار برای مدلسازی جریان عبوری از روی این سرریزها بررسی گردیده است. (اکبری ۱۳۹۵)

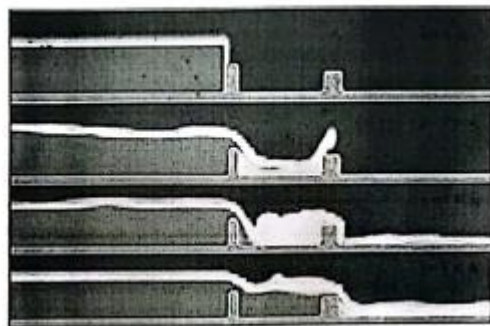


هندسه آزمایشگاهی سرریز قوسی پژوهش اکبری (اکبری، ۱۳۹۵)



هندسه سرریز قوسی در برنامه **flow 3d** پژوهش اکبری (اکبری، ۱۳۹۵)

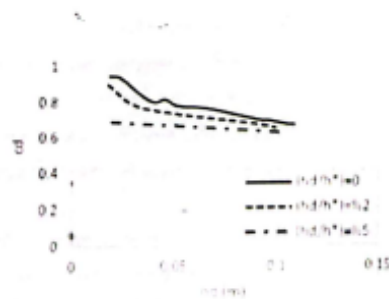
پس از مدل سازی و تحلیل مدل الگوهی جریان مطابق شکل ۲-۱۲ و ۲-۱۳ میباید که با بررسی نتایج بدست آمده مطابق شکل ۲-۱۳ در این تحقیق نشان داد که مدلسازی عددی بخوبی میزان ضریب آبگذری سرریزها را پیش بینی میکند. علاوه بر این بررسی تاثیرات استغراق بر ضریب آبگذری نشان دهنده این است که با افزایش استغراق ضریب آبگذری سرریزهای قوسی کاهش می یابد. (اکبری ۱۳۹۵)



خروجی دو بعدی در برنامه flow 3d پژوهش اکبری (اکبری، ۱۳۹۵)



خروجی سه بعدی در برنامه flow 3d پژوهش اکبری (اکبری، ۱۳۹۵)



ضریب تخلیه به ارتفاع آب در پژوهش اکبری (اکبری، ۱۳۹۵)

همچنین افزایش روزافزون تعداد سدهای بزرگ و فزونی کهولت آن‌ها، دل نگرانی‌هایی را در خصوص احتمال خطر وقوع شکستگی این تاسیسات عظیم که می‌تواند ایمنی ساکنین و تاسیسات پایاب را شدیداً به مخاطره اندازد سبب می‌شود. از این منظر پیش‌بینی مقدار دقیق سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد، ارتفاع امواج تشکیلی زمان رسیدن آن‌ها، موضوع کلیدی در تخمین احتمال وقوع خطر، مخصوصاً در دره‌های طبیعی با ابعاد نامنظم و پیچیده محسوب می‌شود.

بررسی آمار و علل شکست سدها گویای آن است که اغلب شکستگی‌های به وقوع پیوسته ناشی از بروز حوادثی نظیر وقوع رگبارهای شدید و طغیان رودخانه‌ها، ناکافی بودن ظرفیت تخلیه کننده سدها، وقوع زلزله، نارسایی‌های موجود در پی، وقوع پدیده رگاب و بالاخره بمباران بوده است. گزارشات منتشر شده بیانگر آن است که در قرن بیستم میلادی حدود ۲۰۰ سد بزرگ با ارتفاع بیش از ۱۵ متر شکسته شده که علاوه بر تحمیل خسارت‌های مالی فراوان موجب کشته شدن بیش از ۸۰۰۰ نفر شده است. تجزیه و تحلیل آماری شکست سدها در کشورهای مختلف جهان نشان می‌دهد که فرکانس شکست هر سد در سال در آمریکا حدود $1/7 \times 10^{-4}$ ، در ژاپن $1/35 \times 10^{-4}$ ، در اروپا $0/4 \times 10^{-4}$ و در سایر کشورها به غیر از چین $0/94 \times 10^{-4}$ است که بطور متوسط

می‌توان خطر احتمال شکست هر سد در سال را قریب به 10^{-4} در نظر گرفت. از اینرو بررسی دقیق این پدیده به خصوص زمانی که جامعه شهری یا تاسیسات استراتژیک در پایین دست آن قرار گرفته باشد از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.

به‌طور کلی امواج سیل ناشی از شکست سد از نظر هیدرودینامیکی یکی از پیچیده‌ترین جریان‌های غیر دائم متغیر سریع محسوب شده و هنگامی که بر روی ناحیه‌ای با توپوگرافی غیر منظم منتشر می‌شود از پیچیدگی بیشتری برخوردار خواهد شد (بارانی و همکاران، ۱۳۹۲). نا منظم بودن توپوگرافی پایین دست سد نقش مهمی در تعیین حداکثر عمق جریان و سرعت‌های منتشر شده امواج سیل و رژیم جریان بازی می‌کند. همچنین این مسئله بر امواج منفی که در جهت بالادست منتشر می‌شود نیز موثر خواهد بود. پایه‌های موضعی و نخاله‌هایی مثل ساختمان‌ها و پل‌هایی که در حریم رودخانه‌های طبیعی در مناطق شهری ساخته می‌شوند به عنوان یک مانع در مسیر این چنین جریان‌ها عمل کرده و باعث بالا آمدن عمق جریان و تغییر الگوی جریان می‌شوند. همچنین وجود موانعی مثل پایه‌ها در بستر رودخانه تاثیر شیب بستر را پررنگتر می‌کند. در این تحقیق برآنیم که رفتار امواج ناشی از شکست سد در برخورد با این موانع را با استفاده از مدل سازی عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهیم.

جاری شدن سیل در مناطق شهری یک تهدید جدی برای سکنه می‌باشد مخصوصا اگر تمهیدات پیشگیرانه ای برای آن اندیشیده نشده باشد. این واقعه تحت شرایطی غیر قابل پیش‌بینی مثل شکست سد یا یک موج شکن و یا سیل ناشی از یک بارندگی استثنایی می‌تواند رخ دهد. چنین وقایعی در شهرهای کوچک که در مسیر این سیل‌های عظیم قرار می‌گیرد خسارات بیشتری به بار می‌آورد زیرا خود شهر که در مسیر حرکت جریان سیل قرار گرفته باعث افزایش سطح سرعت و ارتفاع سیل می‌شود (سوارز و همکاران، ۲۰۰۸).

ویژگی چنین سیلاب‌ها به گونه‌ای است که مسیرهای حرکت جریان در نواحی شهری به جای مسیر حرکت (خط القعر) رودخانه به چیدمان ساختمان‌ها و خیابان‌ها وابسته بوده از اینرو جریان پیچیده‌ای را به دنبال خواهد داشت. این موضوع باعث می‌شود احتمالا سطح آب بالاتر از حالت بدون حضور شهر باشد (سوارز و همکاران، ۲۰۰۸). از اینرو بررسی رفتار جریان ناشی از شکست سد، که می‌تواند یکی از عوامل جاری شدن سیل باشد، در برخورد با موانع به شناخت این پدیده و همچنین مدیریت آن کمک شایانی خواهد کرد.

به منظور تفهیم امواج مورد بحث در این تحقیق از معادله ساده یک بعدی بقای اسکالر، که به صورت رابطه ۱-۱ می‌باشد، استفاده میشود

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (1-1)$$

فرض می‌شود U و F در زمان و مکان پیوسته بوده و F به U وابسته باشد. پس معادله بالا را می‌توان به صورت رابطه ۲-۱ بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{dF}{dU} \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (2-1)$$

معادله ۲-۱ معروف به شکل مشخصه معادله ۱-۱ می‌باشد. باید به خاطر داشت برای شاهدهی که با سرعت λ حرکت میکند تغییرات زمانی U (یا در واقع مشتق کل) به صورت رابطه ۳-۱ می‌باشد.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \lambda \quad \text{در طول} \quad \frac{DU}{Dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + \lambda \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3-1)$$

اگر $\lambda = dF/dU$ باشد، مشتق کل مساوی با سمت چپ معادله ۲-۱ بوده بنابراین:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{dF}{dU} \quad \text{در طول} \quad \frac{DU}{Dt} = 0 \quad (4-1)$$

خط سیر $dx/dt = dF/dU$ معروف به خط مشخصه (منحنی مشخصه) بوده و dF/dU نشان دهنده سرعت موج می‌باشد. معادله ۴-۱ به این معنی است که U ، که در طول خط سیری که با سرعت dF/dU حرکت می‌کند، بدون تغییر باقی می‌ماند. به U ثابت ریمان نیز گفته می‌شود. در نظر داشته باشید در صورتی که معادله دارای عبارت منبع باشد، U دیگر ثابت نیست. معادله ۴-۱ را اغلب به صورت گرافیکی در یک صفحه $x-t$ مطابق شکل ۱-۱ تشریح میکنند. در این شکل خط سیر نقطه‌ای که با سرعت λ حرکت می‌کند توسط یک منحنی نشان داده شده که شیب آن $\lambda/1$ می‌باشد. معادله ۴-۱ این اجازه را خواهد داد که حل معادله ۲-۱ را در صورتیکه شرایط اولیه در U به اندازه کافی نرم باشد و اگر عبارت F خیلی پیچیده نباشد، به طور گرافیکی تعیین کنیم. فرض می‌کنیم پروفیل اولیه U در همهی نقاط در زمان اولیه t_0 معلوم باشد. این پروفیل اولیه را با $U_0(x)$ نشان خواهیم داد. فرض می‌کنیم این پروفیل به اندازه کافی نرم باشد تا در زمان‌های بعدی نیز معتبر باقی بماند. هدف تعیین حل در زمان بعدی t_1 می‌باشد. این را می‌توان با استفاده از معادله ۴-۱ به طور گرافیکی انجام داد.

پروفیل اولیه در زمان t_0 (خط چین) و پروفیل نهایی در زمان t_1 (خط ممتد) را نشان می‌دهد. پایین شکل نیز خطوط مشخصه را نشان می‌دهد. مقدار U در نقطه مشخص A در زمان t_1 با U_A نشان داده می‌شود. بین زمان‌های t_0 و t_1 ذره‌ای که در ابتدا در A قرار گرفته در طول مشخصه با سرعت $\lambda_A = \partial F / \partial U$ حرکت می‌کند. همانگونه که پیشتر گفته شد U در مشخصه ثابت است. پس سرعت موج که به طور مستقیم به U وابسته می‌باشد، در طول مشخصه ثابت بوده و در نتیجه مشخصه خط مستقیم می‌باشد. در زمان t_1 مطابق شکل ۲-۱ در مکان فازی به A^2 می‌رسد. موقعیت این نقطه به صورت رابطه ۵-۱ می‌باشد

$$x_{A^2} = x_A + (t_1 - t_0) \frac{dF}{dU}(A)$$

(۵-۱)

از آنجایی که U در طول مشخصه تغییر نمی‌کند مقدار U در A^2 در زمان t_1 با مقدار آن در A در زمان t_0 برابر است. اعمال روش مشابهی بر دیگر نقاط (مثل B و C در شکل) اجازه می‌دهد که پروفیل نهایی تعیین شود. این روش تا زمانی که پروفیل پیوسته باشد کاربردی است. همچنین ثابت بودن U در طول خط مشخصه به این معنی است که مقادیر حداکثر و حداقل U در طول زمان حفظ می‌شود. بنابراین تغییرات پروفیل اولیه (حتی اگر شکل بتواند خودش را در سرعت‌های انتشار متفاوتی که با مقادیر متفاوت U همراه می‌شود، تغییر دهد) در پروفیل نهایی حفظ می‌شود. بنابراین با توجه به تابع شار F و توزیع اولیه U پروفیل می‌تواند بعد از مدت زمانی ناپیوسته شود. این به طور معمول هنگامی که F تابع غیر خطی U است رخ می‌دهد. در حالت یک پروفیل ناپیوسته، مشتق مکانی بیمعنی شده و اصل ثابت ماندن U در طول مشخصه زیاد کاربردی نیست. اما هنوز شکل مشخصه را می‌توان در تعیین شکل حل مورد استفاده قرار داد. هنگامی که F تابع غیر خطی U باشد، شیب dF/dU خط مشخصه (در طولی که U ثابت است) با U تغییر می‌کند. نتیجتاً قسمت‌های مختلف پروفیل $U(x,t)$ با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کنند. که این منجر به تولید پروفیل‌های متنوعی می‌شود.

موج شوک هنگامی که یک نقطه از پروفیل سریعتر از نقاط جلوی خودش حرکت کند ظاهر می‌شود. در این حالت پروفیل با گذر زمان شیبش افزایش می‌یابد. بعد از زمان مشخصی، خطوط سیر در مکان فازی با هم برخورد میکنند. نقطه A و نقطه B با هم برخورد کرده و U دو مقدار را در نقطه A یکسانی به خود می‌گیرد. پروفیل ناپیوسته شده و این ناپیوستگی در زمان‌های بعدی همچنان باقی می‌ماند. به عنوان مثال یک پروفیل ناپیوسته، جایکه سرعت موج در عقب بیشتر از پیشانی آن است، معروف به موج شوک است. این را باید مورد توجه قرار داد که سرعت انتشار شوک متفاوت از سرعت موج در پیشانی و عقب موج می‌باشد. یعنی این سرعت انتشار از $\lambda = dF/dU$ بدست نمی‌آید.

بلعکس امواج انبساطی^۱ زمانی تشکیل می‌شوند که سرعت پیشانی موج از سرعت عقب موج بیشتر است. در این حالت با گذشت زمان پروفیل موج نرمتر می‌شود.

¹ Rarefaction wave

اگر تابع شار خطی باشد (یعنی $F = \lambda U$ با λ ثابت) همه امواج صرفنظر از مقدار U در سرعت یکسان λ منتقل میشود. اگر پروفیل موج به طور اولیه نرم و پیوسته باشد، شکل امواج بدون تغییر باقی میماند. اگر پروفیل به طور اولیه ناپیوسته باشد، این ناپیوستگی در زمانهای بعدی باقی میماند.

یک ناپیوستگی در پروفیل U ، در هر جهتی که سرعت موج یکسان است، معروف به ناپیوستگی تماسی است. حالتی که پروفیل اولیه بین نقطه A و B و بین C و D پیوسته و در نقطه B یا C ناپیوسته است را تشریح می کند. B و C بعد افقی یکسانی داشته اما UB و UC متفاوت است؛ در نتیجه پروفیل ناپیوسته می شود. از آنجایی که سرعت در همه جا یکسان است، A, B, C و D با سرعت یکسانی حرکت کرده و $AA' = BB' = CC' = DD'$ است. در نتیجه شکل پروفیل تغییر نکرده و ناپیوستگی BC در زمانهای بعدی حفظ می شود. از آنجایی که سرعت موج در هر جایی یکسان است، در محل ناپیوستگی تغییری ایجاد نمی شود، بنابراین BC یک ناپیوستگی تماسی است.

تحقیقات موجود در زمینه جریان ناشی از شکست سد در برخورد با موانع

در زمینه مدل سازی آزمایشگاهی و عددی جریان ناشی از شکست سد تحقیقات گسترده ای انجام شده است. با توجه به اینکه تحقیق حاضر به بررسی رفتار جریان در برخورد با موانع متمرکز شده است تنها بخشی از پژوهش های انجام گرفته در این زمینه بیان خواهد شد. آیورل و همکاران (۱۹۹۹) هیدروگراف های طبقه ای را که شامل جریان ناشی از شکست سد در برخورد با دو برآمدگی دوزنقه ای شکل بود را به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده و با نتایج عددی مقایسه کردند. بخشی از تحقیقات گذشته نیز آزمایش های جریان ناشی از شکست سد را در برخورد با آستانه های مثلثی توسط اندازه گیری های انجام شده توسط عکس برداری های دیجیتالی را در بر می گیرند (سوارز، ۲۰۰۷؛ آیورل و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین مسائل مشابهی به طور عددی با استفاده از معادلات آبهای کم عمق حل شده است (بروفی و همکاران، ۲۰۰۲؛ کوسدو و همکاران، ۲۰۰۵؛ کسروانی و لیانگ، ۲۰۱۰)

امواج سیل در شهرها که مجموعه ای از موانع در آن قرار دارد نیز به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است، اما عموماً برای جریانهای دائمی (هم زیربحرانی و هم فوق بحرانی) نایا و همکاران (۲۰۰۴) مطالعه ای آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی در تقاطع را برای پیشبینی یک بعدی روابط جریانهای مجزا شده در تقاطع خیابانها ارائه کردند. مطالعات مشابهی توسط شبایک و همکاران (۲۰۰۲)، ریور و پرکین (۲۰۰۴) و میگنوت (۲۰۰۵) انجام شده است. پخش سیل در خیابان ها و شبکه مترو برای یک ناحیه شهری نیز توسط ایشیگاکو و همکاران (۲۰۰۳) مورد مطالعه قرار گرفته است.

سوارز و زچ (۲۰۰۷) داده هایی را به منظور بررسی تاثیر موانع در مسیر امواج ناشی از شکست سد ارائه کردند. مانع مورد بررسی یک ساختمان منفرد بود. آزمایش ها شامل یک کانال با مانع به شکل مستطیل بوده که بلافاصله پایین دست سد قرار گرفته است. مانع در وسط کانال قرار گرفته و با جهت اصلی جریان زاویه ۶۴ درجه می سازد.

در این پژوهش ابزارهای اندازه گیری مختلفی به منظور تشریح جریان مورد استفاده قرار گرفتند. در چهار موقعیت مختلف، تغییرات سطح آب بوسیله گیج ها اندازه گیری شده در حالیکه سرعت توسط داپلر صوتی سرعت سنج اندازه گیری شده است. سپس میدان سرعت سطحی با استفاده از تکنیک تصویربرداری دیجیتالی بدست آمده.

نتایج پیشروی موج ناشی از شکست سد و برخورد آن با مانع است. مشاهدات جریان که پس از فشردگی شدید موج در برخورد با مانع، جریان مجبور به تغییر جهت به منظور عبور از مانع می شود. این موضوع باعث تشکیل پرش های هیدرولیکی شده و در نتیجه سطح آب ممکن است به طور موضعی نسبت به حالت بدون مانع بالا آید.

سوارز و زچ در ادامه کار قبلی خود در سال ۲۰۰۸ به مطالعه برخورد جریان های متغیر سریع غیرماندگار مانند جریان ناشی از شکست سد در برخورد با یک شهر ایده ال جهت بررسی تاثیرات عمق جریان و سرعت بر چنین شهرهایی پرداختند. به طور ویژه، از اهداف مطالعه مذکور ارزیابی توانایی مدل عددی حجم محدودی، که به طور معمول در مدلسازی سیل مورد استفاده قرار می گیرد؛ در ایجاد جریان متغیر سریع در تقابل موانع بود. در این پژوهش آزمایش هایی شامل دو شکل متفاوت بود:

۱- جانمایی یک شهر ایده ال مربعی با ساختمان های 5×5 عمود بر جهت جریان ناشی از شکست سد.

۲- همان حالت اول با این تفاوت که چیدمان شهر عمود بر جهت جریان نزدیک شونده به آن نیست.

از داده های این آزمایش ها جهت صحت سنجی مدل عددی جریان غیر ماندگار در یک هندسه پیچیده استفاده شد. در این تحقیق همگرایی نتایج در چهار سطح ابعاد شبکه در خیابان های مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شبکه بندی با حدود ۱۰ سلول در عرض خیابان نمایش دقیقی از ساختار امواج پیچیده دو بعدی را نشان می دهد. اما برای متوسط تراز سطح آب شبکه های درشت تر نیز نتایج خوبی ارائه می کند.

ارپیکام و همکاران (۲۰۰۹) از یک حل کننده عددی جریان دو بعدی موجود برای محاسبه جریان ناشی از شکست سد بر روی یک توپوگرافی واقعی به منظور انجام مدل سازی عددی با ملاحظه فشردگی امواج منتشر شده در ساختمان ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با وجود سختی ارزیابی معیارهای دقیق شکست، ریزش ساختمان ها تاثیر زیادی بر انتشار امواج ناشی از شکست سد خواهد گذاشت. در این تحقیق جهت مدل کردن ساختمان ها در دو حالت کانال مستقیم و کانال با زاویه ۹۰ از سه روش استفاده شده است: در روش اول ساختمان ها با استفاده از افزایش شدید در زبری پهنه سیل بدون تغییر در توپوگرافی در مدل سازی وارد شد. در روش دوم ساختمان ها با تغییرات توپوگرافی مدل شده اما امکان شکست ساختمان وجود ندارد یعنی مقاومت ساختمانها بینهایت فرض شده و در روش سوم مانند روش دوم بوده اما ملاک شکست $h_{max} = 7 \text{ m}$ ، $V_{max} = 2 \text{ m/s}$ و $q_{max} = 7 \text{ m}^2/\text{s}$ در نظر گرفته شده است.

هیدروگراف های جریان خروجی پایین دست رودخانه (شرایط جریان فوق بحرانی) به ویژگی های مدل سازی وابسته است. شدت دبی اوج به طور زیادی به روش مدل سازی ساختمان ها وابسته است. این مسئله شامل زمان انتشار نمی شود. هنگامی که زبری بدون نشان دادن دقیق توپوگرافی ساختمان ها افزایش می یابد، در یک وسعت مشخص بدلیل افزایش در ظرفیت قوی پهنه سیل بدون ساختمان ها، دبی اوج به طور زیادی کمتر از واقعیت تخمین زده می شود. اما هنگامی که ساختمان ها با توپوگرافی واقعی خود نشان داده شوند، تاثیرشان بر دبی اوج وابسته به هندسه رودخانه است. به گونه ای که برای سازه های ثابت شده، دبی اوج در حالت ۱ (کانال مستقیم) بوده در حالی که اما احتمال شکست ساختمان ها در حال ۲ (کانال با انحنای ۹۰ درجه) بیشتر است.

عبدالرزاق و همکاران (۲۰۰۹) نیز به مدل سازی عددی انتشار سیل در مناطق شهری بعد از یک واقعه شدید بارندگی یا امواج ناشی از شکست سد یا آبشکن پرداخت. در این تحقیق از معادلات دو بعدی آب های کم عمق متوسط گیری شده در عمق با شبکه های چهارضلعی و مثلثی برای نشان دادن توپوگرافی شهری استفاده شده است. برای حل معادلات دو بعدی آب های کم عمق از روش درجه دو صریح که با متد MUSCL منطبق شده استفاده شده است. به منظور نشان دادن مزایا و محدودیتهای بالقوه مدل سازی دو بعدی چهار کار برد تشریح شده است: الف) بررسی آزمایشگاهی امواج ناشی از شکست سد در حضور یک ساختمان غیر قابل نفوذ. ب) سیل ناگهانی بر روی یک مدل فیزیکی شهری شده رودخانه توک در ایتالیا. ج) سیل ناگهانی در اکتبر ۱۹۸۸ در شهری در فرانسه (د) سیل ناشی از شکست سد در اکتبر ۱۹۸۲ در شهری در اسپانیا. همانگونه در زمان $t_1 = 1 \text{ s}$ پیشانی های موج محاسبه شده (با و بدون ساختمان) و اندازه گیری شده، شکل بیضی پایین دست سد تشکیل داده و سرعت حرکت موج در هر دو حالت اندازه گیری شده و محاسباتی تقریباً یکسان است. در زمان $t_5 = 5 \text{ s}$ ضربه قابل ملاحظه ساختمان بر انتشار سیل را می توان مشاهده کرد به خصوص در مجاورت مانع. در واقع سرعتها کاهش یافته و الگوی جریان پیچیده تری را می توان مشاهده کرد. پرشهای هیدرولیکی به دلیل انعکاس پیشانی موج در مقابل ساختمان تشکیل می شود. همچنین ناحیه دنباله بلافاصله پشت ساختمان ایجاد می گردد. در زمان $t_{10} = 10 \text{ s}$ سرعتها کاهش یافته، پرش جانبی و ناحیه دنباله باقی می ماند اما اندکی ضعیف می شوند. در این خلال پرش هیدرولیکی تشکیل شده توسط انعکاس در مقابل ساختمان به آرامی در جهت بالادست منتشر می شود. هنگامی که ساختمان در محاسبات لحاظ می شود؛ به طور کلی انطباق بین پیش بینی های مدل و اندازه گیری ها رضایت بخش بوده با این وجود قدری اختلالات در مقدار سرعت می توان مشاهده کرد بخصوص در نزدیک ساختمان و دیواره های جانبی، شاید دلیل آن بعضی بارهای افت اضافی ناشی از انعکاس امواج در مقابل ساختمان و دیواره های جانبی بوده که در مدل عددی در نظر گرفته نشده است.

همچنین اندازه گیری‌های عمق در چهار موقعیت اطراف ساختمان انجام گرفته که نتایج آن نشان می‌دهد که اعماق جریان محاسباتی هنگام در نظر گرفتن ساختمان به طور معناداری افزایش می‌یابد که دلیل آن تأثیرات جریان برگشتی در جلو ساختمان و دیواره‌های جانبی است. عمق جریان در مخزن نیز تحت تأثیر وجود ساختمان قرار نگرفته؛ زیرا جریان بلافاصله پایین دست دریاچه فوق بحرانی است. مقایسات اعماق جریان محاسبه شده با داده‌های ثبتی نشان می‌دهد که انطباق، زمانی که ساختمان در محاسبات لحاظ می‌شود فراهم می‌گردد. البته این انطباق در داخل مخزن به مراتب بیشتر از سایر نقاط است. در کل اعماق و سرعت‌های محاسبه شده با داده‌های ثبت شده انطباق خوبی را نشان می‌دهد اگرچه برای مطالعه آزمایشگاهی امواج ناشی از شکست سد اختلافاتی اطراف ساختمان‌ها مشاهده می‌شود که ناشی از سه بعدی بودن قوی جریان در آن نواحی می‌باشد. شبیه سازی‌های عددی نشان می‌دهد که اعماق جریان و سرعت امواج سیل به طور قابل توجهی تحت تأثیر حضور ساختمان‌ها در مقایسه با پهنه سیل بدون ساختمان است. بعلاوه این مطالعه اهمیت توپوگرافی و ضریب زبری برای شبیه سازی انتشار سیل را نشان می‌دهد.

نظامیوند (۲۰۱۲) آزمایش‌هایی را به منظور بررسی جریان غیرماندگار (مثل جریان شکست) بر روی یک مانع با بستر پایین دست انجام داد. از سیستم آنالیز تصویر براساس ردیابی ذرات در آزمایشگاه به منظور آنالیز و مشاهده الگو و مشخصات جریان لحظه‌ای در ناحیه مورد بررسی در کانال پایین دست استفاده شد. این مطالعات در دو مقیاس متفاوت در کانال افقی با مقطع مستطیلی به طور آزمایشگاهی انجام شد. یک صفحه مسطح عمودی که دو سطح آب را از هم جدا می‌کند به طور ناگهانی برداشته خواهد شد. اندازه گیری‌های آزمایشگاهی ساختار و مشخصه‌های جریان در پایین دست بستر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که هرچه عمق آب پایین دست کمتر می‌شود، پیچیدگی ساختار و مشخصه‌های جریان افزایش یافته و با ازدیاد عمق پایین دست این پیچیدگی کاهش می‌یابد. اندازه گیری‌ها از سیستم تصویربرداری آزمایشگاهی توسط دو تکنیک PTV و PSV به منظور مقایسه آنالیز شده و نتایج انطباق خوبی را بین این دو تکنیک نشان داد. کاکاتای و کوسامان (۲۰۱۲) به بررسی جریان ناشی از شکست سد بر روی بستر خشک کانال با یک تنگ شدگی جزئی در مقطع مشخصی از پایین دست پرداختند. یک آزمایش جدید در کانال نرم منشوری با سطح مقطع مستطیلی و بستر افقی انجام شد. نتایج اندازه گیری‌ها با حل عددی معادلات ناوراستوکس متوسط گیری شده رینولدز با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ مقایسه شده و به ترتیب انطباق خوبی برای امواج انعکاسی ناشی از برخورد با مانع و پروفیل سطح آزاد جریان بین اندازه گیری‌ها و مدل عددی بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که تنگ شدگی ناگهانی در سطح مقطع کانال باعث انعکاس بخشی از موج سیل در مقابل تنگ شدگی شده و موج منفی که به سمت بالادست منتشر می‌شود را ایجاد کرده و بخش دیگر موج به سمت پایین منتقل می‌شود. همچنین یک پرش هیدرولیکی قوی در ورودی مانع ایجاد شده و رژیم جریان ترکیبی غیرماندگار در پایین دست، که ناشی از وجود تنگ شدگی ناگهانی در کانال است، ایجاد می‌کند.

مواد و روش‌ها

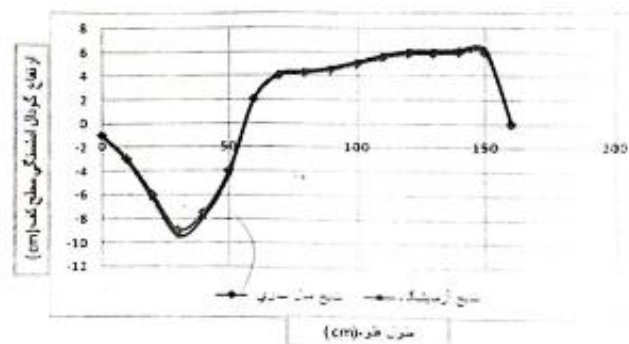
سرریزها یکی از مهم‌ترین سازه‌های تخلیه‌ی سدها به شمار می‌رود که با توجه به استفاده روز افزون آن‌ها، دارای جایگاه ویژه‌ای در مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد این نوع سرریزها از جمله سازه‌هایی هستند که برای اندازه گیری دبی جریان در کانال‌های روباز مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرریزها متناسب با مقاطع مختلفی دارای دبی متفاوت می‌باشند. در این تحقیق از شبیه سازی عددی با استفاده از برنامه flow3d انجام شده است که در ابتدا در این فصل به معادلات حاکم بر جریان توضیح داده میشود و در آخر به مدل‌های مورد بررسی پرداخته شده است..

نتایج و بحث

در این مقاله روش اجرایی تحقیق و مدل‌های مورد بررسی توضیح داده شده است، که بر این اساس در این قسمت با توجه به مدل بیان گردیده در ابتدا به بررسی نتایج صحت سنجی پرداخته شده است و در ادامه به بررسی و مقایسه نتایج در مدل‌های بیان گردیده با توجه به تغییر متغیرها پرداخته شد و در ادامه نتایج مربوطه به صحت سنجی ارائه شده است.

نتایج صحت سنجی

در این به مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی جهت اعتبار سنجی با پژوهش حاضر با توجه به مدل مورد بررسی جهت صحت سنجی هندسه مربوطه را در نرم افزار flow3d مدل سازی گردیده است که پس از مدل سازی و آنالیز نتایج استخراج شده که در شکل زیر نشان داده شده است.



(نمودار مقایسه نتایج صحت سنجی)

نتیجه گیری

انجام مطالعات، تحقیقات و تحلیل های انجام گرفته در این پژوهش به این منظور بوده است که به بررسی عددی هیدرولیکی جریان از سرریز سد کارون ۴ با استفاده از نرم افزار Flow3d پرداخته شود. که بدین منظور با توجه به تغییر متغیرهای اهداف پژوهش پرداخته شده است بتوانیم در معرفی و پارامترهای تاثیر گذار در جهت افزایش عملکرد هیدرولیکی سرریز برداشته باشیم و علاوه بر آن بتوانیم به جامعه فنی کشور و الاخصوص دانشجویان و مهندسان جوان، نقش هر چند کوچک ایفا نماییم.

با توجه به تغییر شیب سرریز و شعاع سرریز اجرا شده سد کارون ۴ در بهینه سازی عملکرد هیدرولیکی مورد بررسی پرداخته شده است که با توجه به دبی های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه با تغییر شیب اجرای سد برابر با، ۲۵، ۳۳، ۴۵، ۶۰، درجه و تغییر شعاع سرریز برابر با ۷، ۱۵، ۲۰، ۱۰، ۲۰ متر پرداخته شده است که بدین منظور با بررسی پرش هیدرولیکی و فشار هیدرولیکی، آبشستگی، استهلاک انرژی با تغییر شیب اجرای سد برابر با ۲۰، ۳۳، ۴۵، ۶۰، درجه پرداخته شده است که با بررسی های انجام شده نتایج نشان می دهد با افزایش شیب سرریز مقدار پرش هیدرولیکی افزایش پیدا میکند و زمانی که شیب سرریز برابر با ۳۵ درجه میباشد تقریباً مقدار پرش هیدرولیکی فشار هیدرولیکی آبشستگی، استهلاک انرژی تقریباً ثابت است و بهینه ترین حالت شیب برابر با ۳۵ درجه میباشد و با بررسی پرش هیدرولیکی و فشار هیدرولیکی، آبشستگی انرژی با تغییر شعاع سرریز برابر با ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۷، ۲۰ متر پرداخته شده است. که با بررسی های انجام شده نتایج نشان میدهد با افزایش شعاع سرریز مقدار پرش هیدرولیکی کاهش پیدا میکند و زمانی که شعاع سرریز برابر بین ۱۰ تا ۱۵ متر میباشد تقریباً مقدار پرش هیدرولیکی تقریباً ثابت است و بهینه ترین حالت شعاع میباشد که در ادامه به شرح نتایج به صورت کمی می پردازیم.

منابع و مراجع

- [۱] خوشگفتار پسیخانی، ع، امین نژاد، ب، احمدی، ح، ۱۳۹۶، مطالعه عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای قوسی داخل کانال، دوازدهمین سمپوزیوم پیشرفت های علوم، تکنولوژی کمیسیون چهارم، سرزمین پایدار یافته های نوین در مهندسی عمران
- [۲] بارانی، غ، عابدی م دهنوی. م (۱۳۹۲) "شبه سازی جریان شکست سد در کانال با وجود موانع دوزنقه ای شکل جانبی " سومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران
- [۳] احمدی، ح، لمر محمدی م امین نژاد ب ۱۳۹۶ مطالعه عددی خصوصیات هیدرولیکی جریان در سرریزهای قوسی داخل مخزن دوازدهمین سمپوزیوم پیشرفت های علوم، تکنولوژی کمیسیون چهارم سرزمین پایدار یافته های نوین در مهندسی عمران محیط زیست مشهد، موسسه آموزش عالی خاوران
- [۴] اکبری، ف مهرآیین ۱۳۹۵ اثر استغراق بر جریان عبوری از روی سرریزهای قوسی، چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری توسعه شهری تهران دبیرخانه دائمی، کنفرانس دانشگاه شهید بهشتی انزلی.. ظهیری ع دهقانی مفتاح هلقی م ۱۳۹۴ بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی سرریز لبه تیز قوسی در پلان سیزدهمین همایش سراسری آبیاری کاهش تبخیر کرمان دانشگاه شهید باهنر کرمان
- [۵] دارس، نادری، م ۱۳۹۶ شبه سازی عددی جریان برای بررسی تغییرات افت انرژی سرریز، طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه سرریز اوجی، دومین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران محیط زیست لرستان گروه مهندسی پایشهر
- [۶] مهری، ی، سلطانی، ج، صانعی، م. رستمی م ۱۳۹۶ بررسی آزمایشگاهی ضریب تخلیه سرریز جانبی کلید پیانویی در کانال قوسی شکل شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک، ایران، اردبیل، انجمن هیدرولیک ایران دانشگاه محقق اردبیلی
- [۷] میری زاده آن ۱۳۹۶ بررسی عددی رفتار هیدرولیکی جریان در نزدیکی کابوتی پله های سرریز پله ای پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری توسعه شهری تهران دبیرخانه دائمی کنفرانس.
- [8] Aureli F, Maranzoni A, Mignosa P, Ziveri C (2008). Dam-break flows: Acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modelling. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 134(8):1089-1101
- [9] Aureli F, Mignosa P, Tomirotti M (1999). Dam-break flows in presence of abrupt bottom variations. *Proceedings of XXVIII IAHR Cong 1999, Graz, Australia*, 163-171.
- [10] "Cagatay H.O. Kocaman S. 2012 Investigation of Dam-Break Flow Over Abruptly Contracting Channel with Trapezoidal-Shaped Lateral Obstacles" *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 134, 1-7.
- [11] "Dam- 2009 [12] Erpicum, S. Archambeau, P. Dewals, B.J. Ernst, J and Piroton, M. rd IAHR ۳۳ break flow numerical modeling considering structural impacts on buildings" *Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*.
- [12] Ishigaki, T., Toda, K., Inoue, K. (2003). Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space. *Proceedings of the 30th IAHR Congress AUTH, Greece, B*, 487-493.
- [13] Mignot E. (2005) Etude experimentale et numerique de l'inondation d'une zone,. urbanisée: Cas des écoulements dans les carrefours en croix. PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France [in French].
- [14] Nanía, L.S., Gómez, M., Dolz, J. (2004). Experimental study of the dividing flow in steep street crossings. *J. Hydr. Res.* 42(4), 406-412
- [15] Nezamivand Chegini A. H. Obstacle Using Imaging System" *International Geoinformatics Research and Development Journal*, Vol. 3, Issue 3.
- [16] Rivière, N., Perkins, R.J. (2004). Supercritical flow in channel intersections. In: *Proceedings of the River Flow Conference, Greco, M., Carravetta, A., Della Morte, R.(eds)*, 2, Balkema, Netherlands, 1073-1078.
- [17] Shabayek, S., Steffler, P., Hicks, F. (2002). Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions. *J. Hydr. Eng.* 128(9), 821-828.
- [18] Soares-Frazao S (2007). Experiments of dam break wave over a triangular bottom sill. *Journal of Hydraulic Research* 45(Extra Issue):19 -26.
- [19] Soares-Frazão, Sandra and Zech, Yves(2008) 'Dam-break flow through an idealised city', *Journal of Hydraulic Research*, 46: 5, 648 - 658.