

بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریز سد ملاصدرا با کاربرد نمونه‌ی آزمایشگاهی در مقیاس کوچک

محمد کریمی چهارطاقی^۱، سهراب نظری^{۲*}

چکیده

از قدیمی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی ساخته بشر سرریز به شمار می‌آید. این سازه دریچه‌ی اطمینان سد است که برای گذراندن سیلهای بزرگ از روی آن بدون ویران کردن سد و تاسیسات مربوطه بنا می‌گردد. بنابراین سرریز بایستی پایدار و از نظر هیدرولیکی عملکرد مناسبی را داشته باشد. به منظور شبیه‌سازی سرریز سد ملاصدرا یک نمونه‌ی آزمایشگاهی با مقیاس ۱/۴۰ ارتفاعی است و ساخته شد و در بده‌های مختلف آزمایش گردید. نتایج نشان می‌دهد که ضریب بده به‌طور متوسط حدود ۲/۱ است. نتایج بررسی شاخص حفره‌سازی نشان می‌دهد در طول سرریز ضریب حفره‌سازی دارای روندی نزولی است و در بده‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، مقدار شاخص حفره‌سازی، خصوصاً در تاج سرریز، به سرعت به مقدار بحرانی آن نزدیک می‌شود. شاخص حفره‌سازی در محدوده بده‌های این تحقیق همواره بالاتر از مقدار بحرانی است، ولی با افزایش بده احتمال وقوع حفره‌سازی خصوصاً در نقاط انتهائی سرریز زیاد می‌شود. در این تحقیق کمترین فشار در بده حداکثر در مقطع ۰،۴ و بیشترین فشار نیز در بده حداکثر بین نقاط ۹ تا ۱۰ اتفاق می‌افتد.

واژه های کلیدی: سرریز منحنی پیوند، ضریب تخلیه، شاخص حفره‌سازی، نمونه آزمایشگاهی.

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد اقلید، دانشگاه آزاد اسلامی، اقلید، ایران

تلفن: ۰۹۱۷۷۱۴۸۴۴۹ Email: Nazari.soh@gmail.com

مقدمه

برای عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از سراب به پایاب سدها از سازه‌ای به نام سرریز استفاده می‌شود. معمول‌ترین و در عین حال ارزان‌ترین سرریزی که توانایی عبور مقدار زیادی آب از روی خود را دارد، سرریز منحنی پیوند است. این سرریزها اغلب در سدهای انحرافی به دلیل بازده هیدرولیکی زیاد استفاده می‌شوند (محمودیان شوشتری ۱۳۸۷). زمانی که این‌گونه سرریز به خوبی طراحی و احداث شود، می‌تواند جریان را به طور مؤثر عبور دهد و نیز امکان اندازه‌گیری دقیق جریان را فراهم می‌کند. به‌همین دلیل مهندسین عمران و هیدرولیک از آن به عنوان یک سازه اندازه‌گیری نیز استفاده می‌کنند (گروه مهندسی ارتش آمریکا^۳، ۱۹۸۸).

در سرریزهای منحنی پیوند در بده‌های کمتر از بده طراحی سرریز، جریان بیشتر به سرریز چسبیده و مقاومت در مقابل جریان بیشتر شده و در نتیجه گذر جریان کاهش می‌یابد. همچنین، در بده‌های بیشتر از بده طراحی اصطکاک در مقابل جریان کاهش یافته و بده عبوری از روی سرریز بیشتر گردد. در بده‌های بیشتر از بده طراحی، به‌علت جدایی جریان از روی سرریز و امکان ایجاد فشار منفی و وقوع پدیده حفره‌سازی (خلأزایی) سرریز باید مورد ارزیابی قرار گیرد (داویس، ۱۹۵۲).

حفره‌سازی عبارت است از تشکیل منطقه یا حفره بخار آب بر اثر کاهش فشارهای موضعی تا حد فشار بخار آب در روی سطح سرریز. ممکن است به علت ناهمواری‌ها جریان آب به طور موضعی همگرا گردد، در نتیجه سرعت جریان افزایش یافته و فشار کاهش پیدا می‌کند. معمولاً همگرایی جریان ناگهانی است و باعث تشکیل حفره‌هایی یا مناطقی از بخار آب می‌گردد. خرابی حاصل از حفره‌سازی بر روی سرریز هنگامی اتفاق می‌افتد که حباب‌ها یا حفره‌های کوچک حفره‌سازی به طرف پایین‌دست، از منطقه با فشار پایین به منطقه نزدیکی با فشار بالاتر حرکت کرده و به‌طور ناگهانی بترکند و آب اطراف با سرعت به سمت آنها حرکت کند تا فضای حباب را پر کند (فالوی، ۱۹۹۰).

نخستین خسارات عمده و مهم ناشی از این پدیده در سرریز سد در سال ۱۹۴۱ به وقوع پیوست. در این رویداد پس از طی چهار ماه از آغاز فعالیت سرریز تونل آریزونای

سد هوور، یک حفره بزرگ در بدنه بتنی این سازه ایجاد شد. این حفره‌ی عظیم ۳۹ متر طول و ۱۴ متر عرض داشت و عمق آن در عمیق‌ترین نواحی به ۱۱ متر می‌رسید. در ایران نیز این پدیده در سرریز سد شهید عباسپور منجر به خرابی‌ها و خساراتی شد به‌طوری که حفره‌ای به عرض ۱۱ متر یعنی تقریباً تمام عرض سرریز و طول ۱ متر بر روی آن به‌وجود آمد و علاوه بر بتن کف سرریز، کلیه آرماتورهای کف نیز گسسته شد (فرقانی و ایدی، ۱۳۸۲).

مطالعات زیادی در زمینه طراحی شکل سرریزهای منحنی پیوند انجام شده و روش‌های متفاوتی ارائه گردیده شد که بستگی به ارتفاع نسبی (نسبت ارتفاع جریان روی سرریز با ارتفاع سرریز) و شیب وجه بالادست سرریز دارد. بیشتر اطلاعات در خصوص شکل سرریزهای منحنی پیوند برگرفته از مطالعات آزمایشگاهی اداره مهندسین ارتش امریکا (USACE) (۱۹۹۰) و اداره احیای ایالات متحده (USBR) (۱۹۷۳) هستند. برای اطلاع در مورد معیارهای طراحی سرریزهای منحنی پیوند می‌توان به منابعی مانند USACE (۱۹۹۰) مینورد (۱۹۸۵) مورفی (۱۹۷۳) رجوع کرد.

حیدرپور و همکاران (۱۳۸۲) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از نمونه‌ی آزمایشگاهی تأثیر کمان‌های مختلف تاج در بالادست سرریز تاج دایره‌ای را بر چند فراسنج هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در کمان‌های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه از تاج بالادست انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تأثیر کمان تاج در بالادست بر روی ضریب بده و افت کارمایه ناچیز بوده و به جز کمان صفر درجه بر روی توزیع سرعت و عمق روی تاج نیز بدون تأثیر است.

خسروجردی و مهرجردی در سال (۱۳۸۶) روی سرریز منحنی پیوند را با استفاده از شبیه عددی بررسی کردند. میزان تأثیر افزایش ضریب بده برای سرریز با تصویر افقی قوسی و یا کاهش ضریب برای شکل پهنجار سرریز در این پژوهش، برابر ۸ درصد محاسبه شد.

مهری و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از نمونه‌ی آزمایشگاهی به بررسی حفره‌سازی سد بالارود پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای همه بده‌ها با افزایش سرعت در طول تندآب، جریان ضریب حفره‌سازی کاهش یافته و

³ US Army Corps of Engineers

بحرانی بیشتر است که نشان می دهد خوردگی اتفاق نمی افتد.

عشرتی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی اثر انحنای سرریز منحنی پیوند بر عملکرد هیدرولیکی آن پرداختند. مقایسه نتایج به دست آمده از دو شبیه نشان می دهد که برای سرریز در شکل بهنجار و با شرایط هیدرولیکی مشابه استغراق سریع، ضریب بده به ازای بده های برابر کمتر است. به طور کلی، عامل قوس محوری باعث افزایش ضریب بده و کارایی سرریز می شود که این مسئله به وسیله مورالس و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی عملکرد سرریز منحنی پیوند یک سد انحرافی و نیمرخ سرعت و جریان روی آن با استفاده از شبیه عددی پرداختند. پارامترهای محاسبه شده از شبیه عددی بر اساس داده های به دست آمده از یک نمونه آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. از نیمرخ سرعت مشاهده می شود که توزیع حداکثر سرعت در وجه میانی سرریز اتفاق افتاده و این ناحیه با کاهش ارتفاع سرریز در بده ثابت، به سمت بالادست و با کاهش بده در ارتفاع ثابت سرریز به سمت پایین دست کشیده می شود.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی هیدرولیکی جریان بر روی سرریز سد ملاصدرا جهت حصول اطمینان از عملکرد مطلوب آن در دوران بهره برداری است. در این تحقیق ضریب بده سرریز و ضریب حفره سازی، سرعت و فشار در طول سرریز مزبور بررسی گردید.

مواد و روش ها

الف) سد مطالعه شده

سد مخزنی ملاصدرا در استان فارس و بر روی رود کر در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری بالادست سد درودزن قرار دارد، فاصله محل سد از شهر شیراز ۲۰۰ کیلومتر، از بخش سده اقلید ۲۰ کیلومتر است. مشخصات کلی این سد مطابق جدول ۱ است.

با توجه به رقوم عادی بهره برداری مخزن، آستانه ورودی سرریز در تراز نیمرخ و طول آستانه سرریز به منظور رعایت ضوابط و معیارهای طراحی برابر با ۸۸/۰۰ متر در نظر گرفته شده است. روابط سطح و حجم با ارتفاع مخزن بر اساس نتایج ارائه شده در مطالعات مرحله اول سد ملاصدرا مطابق نمودار ۱ هستند

در ابتدای پرتاب کننده جامی در محور وسط به کمترین مقدار خود می رسد. همچنین به ازای بده ۱۴۲۵ متر مکعب بر ثانیه در سرعتی معادل ۲۰/۹۱ متر بر ثانیه حداقل ضریب حفره سازی برابر با (۰/۵۴۵) شده، که بیشتر از ضریب حفره سازی بحرانی (۰/۲۵) بوده و حفره سازی رخ نمی دهد.

گلکار و همکاران (۱۳۸۸) به روندیابی مخزن سد ملاصدرا جهت تعیین مقادیر سیلاب تعدیل شده با شبیه هیدرولوژی HEC-HMS پرداختند. نتایج نشان دادند که با راه اندازی سد ملاصدرا، سیلاب های با دوره بازگشت ۲۵ تا ۲۰۰ ساله قبل از سد به ۲ تا ۱۴ ساله بعد از آن کاهش می یابد.

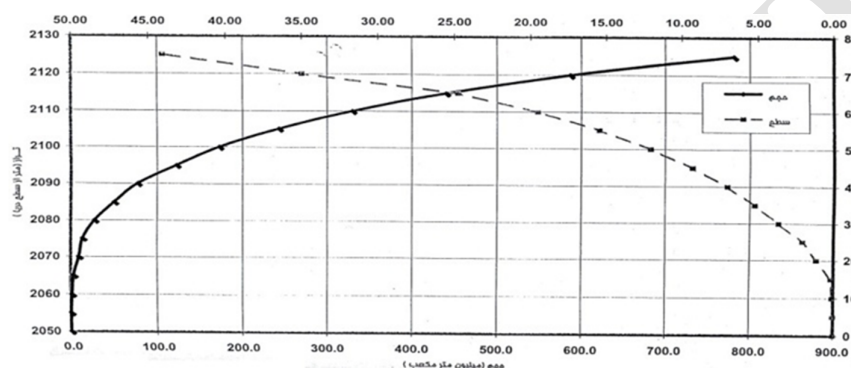
ایراندوست و همکاران (۱۳۹۰) با ساخت نمونهی آزمایشگاهی سرریز سد کلوانس خوی و انجام آزمایش ها در شرایط هیدرولیکی مختلف اقدام به آنالیز الگوی جریان در این سرریز کرده و دریافتند که ابعاد سازه سرریز موجود اعم از عرض مفید تاج، ارتفاع سرریز از تاج تا لبه جام، نیز شعاع عمل خم سازه پرتاب کننده جامی، به منظور عبور مطمئن بده سیلاب های خروجی مورد انتظار کافی نیست. دهدار بهبهانی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از شبیه عددی Flow 3D به بررسی هیدرولیک جریان در شبیه سرریز سد بالارود پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که شبیه عددی مورد استفاده شده توانایی خوبی در شبیه سازی سرریز مزبور دارد. همچنین در این تحقیق مشخص شد که سرریز مطالعه شده در معرض خطر حفره سازی نیست.

آزموده و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی پدیده حفره سازی در سرریز منحنی پیوند در یک نهر با شیب مختلف پرداختند. نتایج آن ها نشان دادند که با پیشروی روی سرریز سرعت افزایش یافته و فشار ایستا نیز کاهش می یابد، در نتیجه شاخ حفره سازی افزایش یافته و احتمال وقوع حفره سازی بیشتر می شود. قابل ذکر است اثر افزایش بده بسیار بیشتر از افزایش شیب بوده و تغییر شیب تاثیر زیادی در تغییر شاخص حفره سازی در یک نقطه ندارد.

کریمی چهارطاقی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از نمونهی آزمایشگاهی به بررسی پدیده حفره سازی در سرریز سد ملاصدرا پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که با مقایسه مقادیر ضریب حفره سازی با مقدار بحرانی آن (۰/۲۵) در تمام حالات مقادیر ضریب حفره سازی از مقدار

جدول ۱- مشخصات کلی سد ملاصدرا.

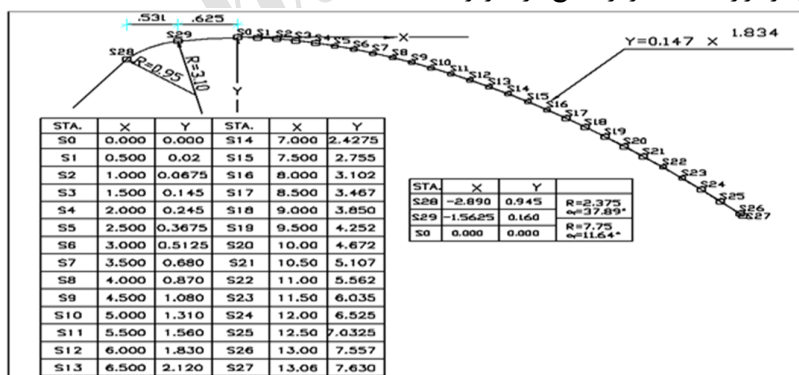
مقدار	مشخصات سد
۷۲ متر	ارتفاع سد از بستر
۶۲۰ متر	طول تاج
۲۰۵۰ متر از سطح دریا	تراز رودخانه در محل محور
۲۱۱۵ متر از سطح دریا	حداکثر تراز عادی بهره برداری
۲۱۲۲ متر از سطح دریا	تراز تاج سد
۴۴۰ میلیون متر مکعب	حجم مخزن در تراز عادی بهره برداری
۲۹ میلیون متر مکعب	حجم رسوبات ۵۰ ساله
۳۵۰ میلیون متر مکعب	متوسط حجم آورد سالانه



شکل ۱- روابط سطح و حجم با ارتفاع در مخزن سد ملاصدرا در ایران.

با ۷۰۳ میلیون مترمکعب است. سرریز این سد از نوع WES طراحی شده است (شکل ۲).

مطابق شکل مذکور، ملاحظه می‌گردد که حجم مخزن سد در رقوم ۲۱۱۵ متر از سطح دریا برابر با ۴۴۰ میلیون متر مکعب و در تراز ۲۱۲۲ متر از سطح دریا برابر



شکل ۲- جزییات خط الراس و شکل سرریز (گزارش طرح سد ملاصدرا).

ظرفیت عبوردهی رودخانه، حداکثر بده خروجی ۱۰۰۰۰ ساله و PMF^۴ و تراز سطح آب در هر کدام از سیلاب‌های ذکر شده (جدول ۲).

اطلاعات مورد نیاز برای ساختن شبیه سرریز سد ملاصدرا از مطالعات مرحله اول و دوم سد مخزنی ملاصدرا، که به وسیله‌ی آب منطقه‌ای شیراز انجام گرفته، تهیه شده است. این اطلاعات عبارتند از: اطلاعات هیدرولوژی شامل

^۴ حداکثر سیلاب محتمل: PMF

جدول ۲- اطلاعات آب شناسی رودخانه.

ظرفیت عبور دهی رودخانه(سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله(متر مکعب بر ثانیه)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله(متر)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله(متر)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله(متر)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله(متر)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله(متر)
۴۴۰	۲۱۱۶	۲۰۰۸	۲۱۱۹/۴	۳۳۴۷	۲۱۲۱/۱

نقشه‌های تصویر افقی و برش از مقاطع سرریز سد ملاصدرا به وسیله‌ی شرکت مهندسی مشاور آبان پژوه در مقیاس ۱:۱۰۰۰ ترسیم گردیده است. جهت بررسی نتایج آزمایش‌ها برای مقاطع سرریز و مقایسه آنها با محاسبات نظریه صورت گرفته در مرحله اول مطالعات، لازم است که نتایج محاسبات تحلیلی انجام شده نیز جمع‌آوری گردد (جدول ۳). شکل کلی سد به همراه سرریز در جناح چپ در شکل ۳ نمایش داده شده است.

نقشه‌های تصویر افقی و برش از مقاطع سرریز سد ملاصدرا به وسیله‌ی شرکت مهندسی مشاور آبان پژوه در مقیاس ۱:۱۰۰۰ ترسیم گردیده است. جهت بررسی نتایج آزمایش‌ها برای مقاطع سرریز و مقایسه آنها با محاسبات

جدول ۳- مشخصات سرریز سد ملاصدرا.

طول تاج سرریز(متر)	رقوم کف نهر تقرب(متر)	رقوم تاج سرریز(متر)
۸۸	۲۱۰۸	۲۱۱۵



شکل ۳- نمای کلی سرریز سد ملاصدرا

مقیاس (بر پایه ی عدد فرود) برای مساحت، سرعت و بده جریان سد ملاصدرا در جدول ۴ آورده شده اند. دامنه‌ی کامل بده‌های مورد انتظار در سد ملاصدرا و مقادیر شبیه نظیر آن را بر اساس ضریب مقیاس ۱/۴۰ در جدول ۵ ارائه شده اند.

(ب) نمونه‌ی آزمایشگاهی

یک شبیه در صورتی مشابه هندسی شبیه اصلی است که تمامی نسبت‌های طولی متناظر در شبیه و نمونه‌ی اصلی یکسان بوده و برابر با مقدار ثابت مقیاس باشند. تشابه حرکتی در حقیقت تشابه در حرکت است. نسبت‌های

جدول ۴- نسبت های مقیاس (بر پایه ی عدد فرود) برای مساحت، سرعت و بده جریان.

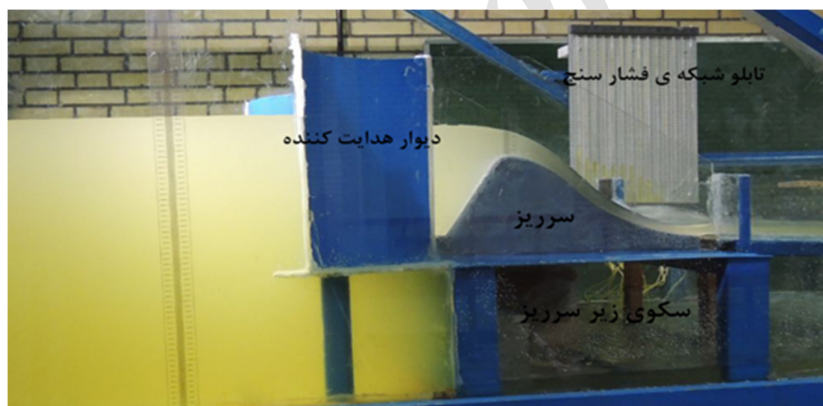
نسبت مقیاس	مقیاس شبیه	مقیاس	نوع کمیت
۱:۱۶۰۰	۱:۴۰	$A_r = L_r^2 =$	مساحت
۱:۶/۳۳	۱:۴۰	$V_r = \frac{L_r}{T_r} = L_r^{\frac{1}{2}} =$	سرعت
۱:۱۰۱۲۰	۱:۴۰	$Q = V_r A_r = L_r^{\frac{5}{2}} =$	بده

جدول ۵- بده‌های اوج هیدروگراف در سد ملاصدرا و بده‌های شبیه در آزمایشگاه.

بده‌های اوج سد ملاصدرا									
۱۶۷۶	۱۲۶۵	۱۱۲۰	۹۰۰	۶۸۸/۵	۴۸۵	۲۹۳/۷	۱۵۱/۴	۱۱۲/۴	(متر مکعب بر ثانیه)
بده‌های شبیه (لیتر بر ثانیه)									
۳۷/۶	۲۸/۲۴	۲۵/۱۶	۲۰/۲	۱۵/۴۶	۱۰/۸	۶/۵۹۶	۳/۳۹	۲/۵۳۰	

با چسب آکواریوم محکم و آب‌بندی کردیم. بالادست سرریز یک مخزن برای تغذیه‌ی مقدار بده مورد نیاز تعبیه شد. با توجه به مقیاس $1/40$ ارتفاعی عرض شبیه سرریز 50 و ارتفاع آن $22/5$ سانتی‌متر و با توجه به رقوم نقشه این سد بر روی یک سکو به ارتفاع 15 سانتی‌متری قرار گرفت. همچنین، با توجه به اینکه عرض سرریز 50 سانتی‌متر بوده با استفاده از دیواره‌های هدایت‌کننده با شعاع 25 سانتی‌متر (مطابق شبیه اصلی) به مخزن بالادست متصل گردید. در شکل ۴ نمایی از سرریز نصب شده در نهر آزمایشگاهی نمایش داده شده است.

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید در یک نهر پایه دار آزمایشگاهی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب 6 ، 1 و $0/5$ متر انجام شده است. در این تحقیق مقدار بده با استفاده از سرریز مثلثی تعبیه شده در پایین‌دست اندازه‌گیری شد. برای ساختن شبیه در ابتدا با توجه به نقشه‌های اجرایی و اعمال مقیاس انتخابی $1/40$ ارتفاعی، منحنی سرریز ترسیم، سپس قالب آن ساخته شده است. سپس PVC را ذوب کرده و در قالب‌ها ریخته شد تا سرد شود. آن گاه با پالیش موج‌هایی ایجاد شده روی سرریز صاف شد. بعد از ساخت سرریز آن را روی سکویی در نهر آزمایشگاهی قرار داده و



شکل ۴- نمایی از کارگذاری سرریز در نهر پایه دار.

بر روی سرریز، جدول ۶ محل قرارگیری فشارسنج‌ها را نسبت به محور مختصات نشان می‌دهد.

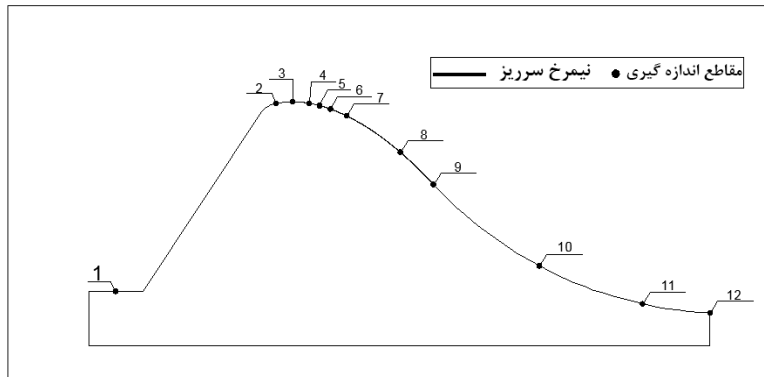
۲- اندازه‌گیری سرعت، نیمرخ سطح آب و بده جریان

یکی از مشخصه‌های مهم جریان که در طراحی سازه‌ای مورد نیاز است، سرعت آنی است که در قسمت‌های مختلف سازه در $0/6$ عمق جریان اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری سرعت جریان از سرعت سنج (با دقت $1/5$ % \pm سرعت واقعی) استفاده شده است. همچنین برای تهیه‌ی نیمرخ سطح آب در امتداد طولی و عرضی شبیه از خط

ج) برداشت اطلاعات آزمایشگاهی

۱- اطلاعات فشار ایستا

برای اندازه‌گیری فشار ایستا در این شبیه، فشارسنج در سرتاسر سرریز و در محور وسط نصب شد. در قسمت‌های منحنی شکل و یا به عبارت دیگر مناطقی که تغییر ناگهانی نصب دارند (تاج و منحنی سرریز) فشارسنج‌ها با تراکم بیشتر شدند. در مجموع از 12 عدد فشارسنج در تاج و منحنی سرریز در این شبیه استفاده شد. تابلوی فشارسنج در کنار نهر پایدار و لوله‌های فشارسنج از کف نهر مزبور به تابلو نصب شده‌اند. شکل ۵ محل قرارگیری فشارسنج‌ها را



شکل ۵- موقعیت فشارسنج های نصب شده بر روی سرریز با مقیاس ۱/۴۰ ارتفاعی.

جدول ۶- موقعیت فشارسنج های نصب شده بر روی سرریز با مقیاس ۱/۴۰ ارتفاعی نسبت به محور مختصات.

شماره فشارسنج ها	X	Y	شماره فشارسنج ها	X	Y
۱	-۱۸/۹۲۷	۱۷/۵۰	۷	۵/۰۰	۱/۳۱
۲	-۱/۵۶۲۵	۰/۱۶	۸	۱۰/۰۰	۴/۶۷۲۵
۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۹	۱۳/۰۶۷۵	۷/۶۳
۴	۱/۵۰	۰/۱۴۵	۱۰	۲۲/۹۰	۱۵/۱۵
۵	۲/۵۰	۰/۳۶۷۵	۱۱	۳۲/۵۰	۱۸/۶۷
۶	۳/۵۰	۰/۶۸	۱۲	۳۸/۷۸۲۵	۱۹/۴۸۷۵

$$Q = C_d L_e H_e^{3/2} \quad (1)$$

در رابطه ۱ C_d = ضریب تخلیه ($m^{1/2}/s$)، H_e = ارتفاع کل روی سرریز (مجموع ارتفاع ایستا و ارتفاع ناشی از سرعت) (m)، L_e = عرض سرریز (۵۰ سانتی متر) هستند.

برای جلوگیری از پدیده ی حفره سازی باید موقعیت نقاطی را که ممکن است در آن ها با افزایش سرعت، فشار تا حد فشار بخار کاهش شناسایی کرد. برای بررسی حفره سازی در سرریزها، از رابطه ی ۲ عدد حفره سازی محاسبه شده و در صورتی که مقدار آن از مقدار بحرانی ۰/۲۵ کمتر شود، پدیده حفره سازی رخ می دهد (دهدار بهبهانی و همکاران، ۱۳۹۰). ضریب فشار C_p را همچنین به عنوان فرانسج فشار و یا عدد اولر (Euler number) گویند.

$$C_p = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (2)$$

در این رابطه P_0 فشار نقطه ی مورد نظر، P_v فشار بخار محلی و V_0 سرعت سیال است.

کش مقیاس میله ای (Point Gauge) با دقت ۰/۲ میلی - متر استفاده شده است. این دستگاه بر روی محور فوقانی نهر پایه دار بر روی یک شاسی نصب گردید. خط کش مقیاس میله ای قابلیت حرکت در دو محور طولی و عرضی را دارا است. تأمین آب نهر پایه دار به وسیله ی سیستم گردش بسته است که قابلیت تأمین حداکثر بده تا ۳۸ لیتر بر ثانیه را دارد، مخزن تأمین آب در زیر آزمایشگاه به حجم ۲۰۰۰ لیتر در عمق حدود ۲ متر در زیر زمین قرار گرفته است. یک مخزن در ابتدای نهر پایه دار با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۶، ۱ و ۰/۷ برای آرام کردن آب ورودی به نهر پایه دار استفاده شده است. ضمناً در انتهای نهر پایه دار یک مخزن با حجم ۱۲۰۰ لیتر جهت جمع آوری آب و اندازه گیری بده و تخلیه آب به مخزن تغذیه تعبیه شده است. در این شبیه بده مورد نیاز به وسیله ی یک پمپ گریز از مرکز انجام شد.

بده در سرریزهای منحنی پیوند از رابطه ی عمومی سرریزها (رابطه ۱) محاسبه می گردد:

مطابق نتایج، ضریب بده (C_d) محاسبه و در شکل ۶ نشان داده شده است. سرعت ورودی بسیار کم بوده و ممکن است بدون آنکه محاسبه‌ی ضریب تخلیه را تحت تأثیر قرار دهد، نادیده گرفته شوند. همچنین در شکل ۶ منحنی بده-خط کش مقیاس سرریز نمایش داده شده است. مطابق شکل ۷ ضریب بده به طور متوسط حدود ۲/۱ است. نکته قابل ذکر اینکه در پراکندگی مزبور نقاط در مقادیر کم بده به علت عمق کم آب و تأثیر کشش سطحی است.

با جایگذاری مقادیر عددی مذکور در معادله‌ی ۳ در هر مقطع اندازه‌گیری، ضریب حفره سازی در آن مقطع محاسبه می‌گردد. در شکل ۸ منحنی تغییرات ضریب حفره سازی در امتداد محور طولی سرریز در بده‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۸ ضریب حفره سازی در طول سرریز دارای روندی نزولی است، زیرا با فاصله گرفتن از تاج سرریز سرعت افزایش یافته (مخرج رابطه‌ی ۳) و همچنین شیب تندآب افزایش و به دنبال آن فشار موثر بر کف تندآب کاهش می‌یابد (صورت کسر رابطه‌ی ۳).

مطابق شکل ۸ با افزایش بده، خصوصاً در بده‌های بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، مقدار شاخص حفره‌سازی خصوصاً در تاج سرریز به سرعت به مقدار بحرانی شاخص حفره سازی نزدیک می‌شود. شاخص حفره سازی در نقاط ۲ تا ۷ (تاج سرریز) در بده‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌دار بوده، ولی از نقطه‌ی ۸ به بعد در بده‌های مختلف دارای مقادیر خیلی نزدیک به هم است. به‌طور کلی در بده‌های مورد آزمایش در این تحقیق شاخص حفره سازی همواره بالاتر از مقدار بحرانی است

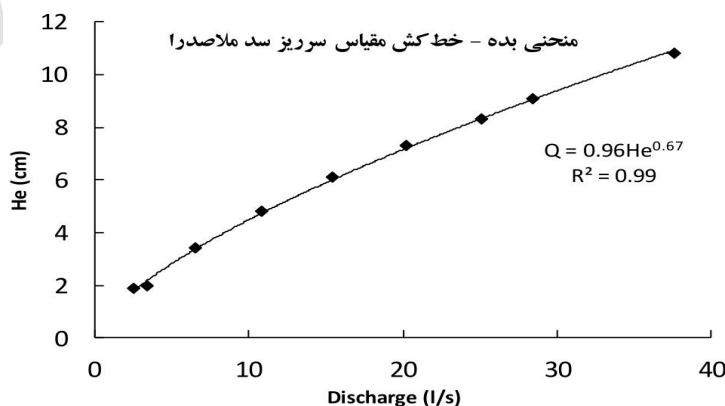
در طول سرریز، تعداد ۱۲ ایستگاه جهت اندازه‌گیری فراسنج فشار و سرعت در نظر گرفته شدند. در سطوح دارای قوس مانند سرریز جهت تعیین ضریب خوردگی از رابطه ۳ استفاده می‌کنیم:

$$\sigma = \frac{\frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + h \cos \theta \pm \left(\frac{h}{g} \times \frac{V_0^2}{r} \right)}{\frac{V_0^2}{2g}} \quad (3)$$

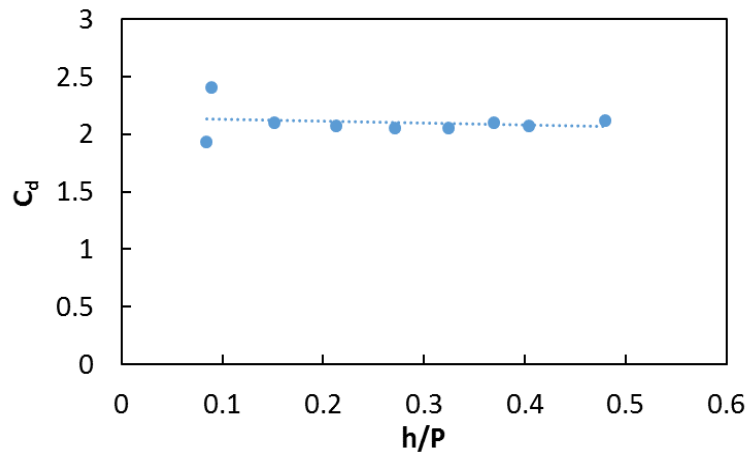
در رابطه فوق $\frac{P_{atm}}{\gamma}$ فشار نیوار و γ وزن

مخصوص آب) فشار محیط اطراف می‌باشد که در شرایط آزمایشگاهی معادل یک نیوار یا ۷/۷۰ متر ستون آب (۷۵/۴۶ کیلو پاسکال) در نظر گرفته می‌شود. $\frac{P_v}{\gamma}$ مقدار فشار بخار مایع است که در دمای حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل ۰/۳۲ مترآب (۳/۱۶ کیلو پاسکال) است. در محاسبه‌ای جهت در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب، این مقدار معادل ۱ متر آب (۹/۸ کیلو پاسکال) در نظر گرفته می‌شود. $h \cos \theta$ مقدار فشار (فشار نظیر ارتفاع آب و در آن h ارتفاع آب عمود بر سطح تندآب و θ زاویه کف تندآب است) که بر روی سازه در قسمت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. $\frac{V_0^2}{2g}$ ارتفاع نظیر سرعت (بر حسب متر) در مقطع مورد نظر است. $\pm \frac{h}{g} \times \frac{V_0^2}{r}$ اختلاف ارتفاع ناشی از قوس که در قسمت سرریز با توجه به شعاع قوس مقعر آن $r=10$ متر، برابر $\frac{hV_0^2}{98.1}$ خواهد شد (r شعاع کف تندآب).

نتایج و بحث



شکل ۶-منحنی بده- خط کش مقیاس سرریز منحنی پیوند.

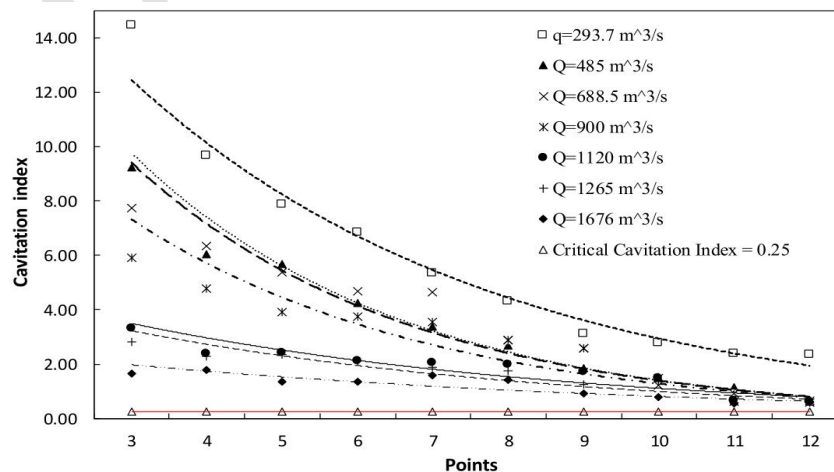


شکل ۷- تغییرات ضریب ضریب بده در مقابل نسبت h/P

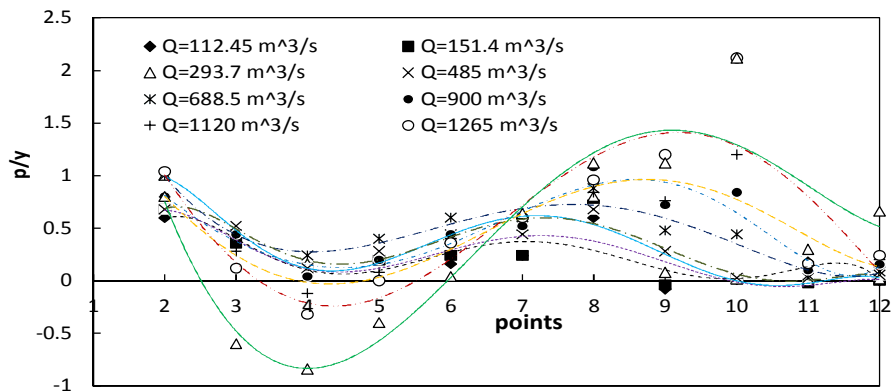
نشان داده شده است. حداکثر سرعت جریان در طول سرریز تقریباً برای تمامی بده‌های مورد آزمایش در انتهای پای سرریز بوده و مقادیر آن مطابق جدول ۷ هستند. به-طور کلی سرعت در امتداد سرریز افزایش یافته و همچنین با افزایش بده سرعت افزایش می‌یابد. افزایش سرعت با افزایش بده در نقاط ابتدائی و انتهائی سرریز با شدت بیشتری رخ می‌دهد. نکته‌ی قابل ذکر آنکه در انتهای سرریز، با افزایش بده، خصوصاً در بده‌های پایین، سرعت به شدت افزایش یافته، در مقادیر بزرگتر نرخ افزایش سرعت با افزایش بده کند است. در شکل ۱۱ تغییرات رژیم جریان در ۳ بده مختلف نمایش داده شده است. مطابق این شکل جز در نقاط ابتدائی، تقریباً در کل سرریز جریان فوق بحرانی است.

ولی با افزایش بده احتمال وقوع حفره سازی خصوصاً، در نقاط انتهائی سرریز، بالا می‌رود. در شکل ۹ منحنی تغییرات فشار در امتداد محور طولی در شبیه سرریز سد ملاصدرا نشان داده شده اند. نتایج نشان می‌دهند که حداقل فشار در فاصله‌ی بین نقاط ۳ تا ۶ و حداکثر فشار در فاصله بین ۸ تا ۱۰ رخ می‌دهد. همچنین، با افزایش بده شدت کاهش و افزایش فشار در فواصل بیان شده افزایش می‌یابد، در واقع، کمترین فشار در بده حداکثر در مقطع ۴، بیشترین فشار در بده حداکثر بین نقاط ۹ تا ۱۰ اتفاق می‌افتد.

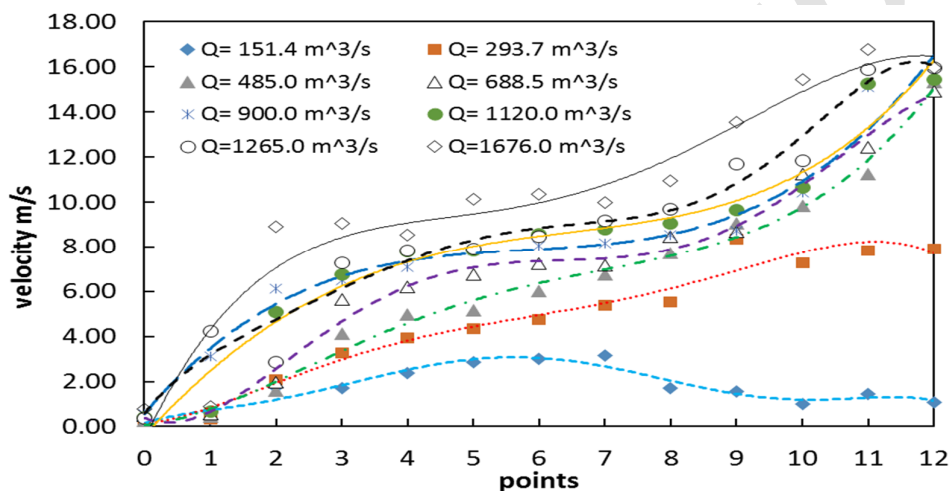
در این تحقیق عمق و سرعت جریان روی آستانه‌ی سرریز در تمامی بده‌های جریان اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۰ تغییرات سرعت بر روی سرریز در بده‌های مختلف



شکل ۸- منحنی تغییرات ضریب خوردگی (حفره سازی) بر روی سرریز.



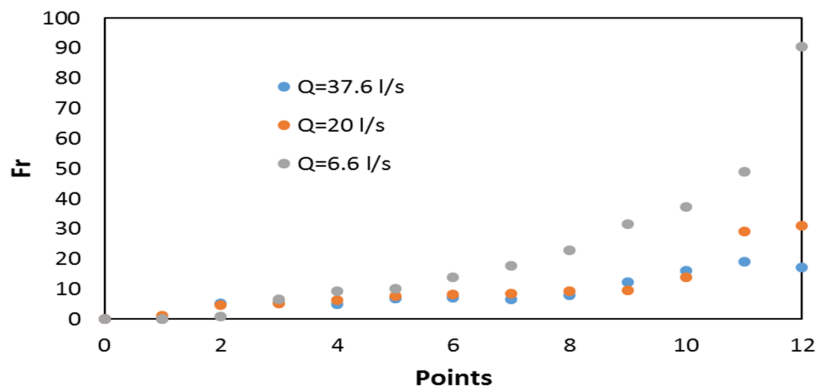
شکل ۹- منحنی تغییرات فشارهای ایستا بر روی سرریز سد ملاصدرا.



شکل ۱۰- منحنی تغییرات سرعت جریان در طول سرریز.

جدول ۷- حداکثر سرعت جریان در طول سرریز برای تمامی بده‌های مورد آزمایش.

حداکثر سرعت در بده‌های مختلف							
۱۶۷۶	۱۲۶۵	۱۱۲۰	۹۰۰	۶۸۸/۵	۴۸۵	۲۹۳/۷	بده (متر مکعب بر ثانیه)
۱۵/۹۴	۱۵/۹۴	۱۵/۴۳	۱۵/۶۲	۱۴/۹۳	۱۵/۳۱	۷/۹۱	سرعت (متر بر ثانیه)



شکل ۱۱- منحنی تغییرات عدد فرود در طول سرری

نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق، شبیه سازی هیدرولیکی جریان بر روی سرریز سد ملاصدرا جهت حصول اطمینان از عملکرد مطلوب آن در دوران بهره برداری است. به همین منظور سرریز سد ملاصدرا طراحی و با مقیاس ۱/۴۰ ارتفاعی ساخته شد. مطابق نتایج این تحقیق ضریب بده به طور متوسط حدود ۲/۱ است. نتایج بررسی شاخص حفره سازی نشان می دهند که در طول سرریز ضریب حفره سازی دارای روندی نزولی است، خصوصاً در بده های بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه شاخص حفره سازی، خصوصاً در تاج سرریز، به سرعت به مقدار بحرانی حفره سازی نزدیک می شود. به طور کلی، در بده های مورد آزمایش در این تحقیق شاخص حفره سازی همواره بالاتر از مقدار بحرانی است، ولی با افزایش بده احتمال وقوع حفره سازی، خصوصاً در نقاط انتهایی سرریز بالا می رود. مطالعه تغییرات فشار نشان می دهد که حداقل فشار در فاصله ی بین نقاط ۳ تا ۶، حداکثر فشار در فاصله ی بین ۸ تا ۱۰ هستند. همچنین، با افزایش بده شدت کاهش و افزایش فشار در فواصل بیان شده افزایش می یابد، در واقع، کمترین فشار در بده حداکثر در مقطع ۴، بیشترین فشار در بده حداکثر بین نقاط ۹ تا ۱۰ اتفاق می افتد.

نمادها

H: عمق آب بر روی سرریز دوزنقه ای (به عرض ۲۰ سانتی متر) اندازه گیری بده
 E_1 : رقوم سطح آب داخل مخزن و پشت سرریز
 H_d : ارتفاع آب روی سرریز
 V_a : سرعت آب داخل مخزن و سرعت نزدیک شدن آب به سرریز
 H_a : ارتفاع معادل سرعت $H_a = \frac{V_0^2}{2g}$
 H_e : ارتفاع آب موثر $H_e = H_a + H_d$
 h_d/P : نسبت عمق آب به ارتفاع سرریز (معادل ۷ سانتی متر)

مراجع

۱) ایراندوست، م.، ابراهیمی توکلانی، ن.، رستمی داوری، ا.، ۱۳۹۰. ساخت نمونه ی آزمایشگاهی سرریز سد کلوانس خوی و آنالیز رفتار الگوی جریان در آن. پنجمین

کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. انجمن مهندسی آبیاری و آب. کرمان.
 ۲) آزموده، م.، سناوندی، ح.، ریاسی، ع.، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی پدیده ی حفره سازی بر روی شبیه تست در کانال روباز سرریز منحنی پیوند با در نظر گرفتن تغییرات شیب بستر کانال. هفتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، ۱ تا ۳ اسفند.
 ۳) حیدرپور، م.، ایزدی نیا، ا.، سعادت پور، ع.، ۱۳۸۲. تاثیر کمان های مختلف تاج در بالادست سرریز تاج دایره ای بر پارامترهای هیدرولیک. مجموعه مقالات هشتمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۷ و ۸ بهمن.، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۶ و (۳): ۵۱-۶۱.
 ۴) دهدار بهبهانی، ص.، فتحی مقدم، م.، حسینی، ح.، فاضلی پور، ش.، ۱۳۹۰. بررسی پدیده حفره سازی در طول پرتابه جامی شکل سرریز سد بالارود با استفاده از شبیه سازی FLOW3D، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، رشت، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
 ۵) خسروجردی، الف.، مهرجردی، م.، ۱۳۸۶. بررسی هیدرولیکی سرریز منحنی پیوند در شرایط قوس محوری. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر.
 ۶) عشرتی، ط.، فضل اولی، ر.، صانعی، م.، عمادی، ع.، ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر انحنا ی سرریز منحنی پیوند بر عملکرد هیدرولیکی آن، اولین همایش ملی الکترونیکی کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران.
 ۷) فرقانی، ا.، و ایدی، ض.، ۱۳۸۲. خسارات حفره سازی در سرریزها و راههای جلوگیری از آن. دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
 ۸) کریمی چهارطاقی، م.، و نظری، س.، ۱۳۹۲. بررسی تغییرات شاخص حفره سازی در سرریز سد ملاصدرا توسط شبیه فیزیکی، ششمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک کشور، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران.

- 19) US Bureau of Reclamation (USBR) 1973. Design of small dams, Washington, D.C, USA.
- ۹) گلکار، ف.، فرهمند، ع.، لیاقت، ع.، و صدقی، ح.، ۱۳۸۸، روندیابی مخزن سد ملاصدرا جهت تعیین مقادیر سیلاب تعدیل شده با شبیه هیدرولوژیکی-HEC HMS، هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۱۰) محمودیان شوشتری، م.، ۱۳۸۷. اصول جریان در مجاری باز. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. چاپ اول. جلد دوم. ص. ۵۰۸.
- ۱۱) مهری، م.، فتحی مقدم، م.، ابن جلال، ر.، ۱۳۸۷. بررسی خلاء زایی (حفره سازی) بر روی سرریز سد بالارود با استفاده از شبیه فیزیکی. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران.
- 12) Davis, C. V., 1952. Handbook of applied hydraulics, 2nd Edition, McGraw-Hill.
- 13) Falvey, H. T. 1990. Cavitation in chutes and spillways" Engineering monograph, United States, Department of the Interior-Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- 14) Maynard, S. T. 1985. General spillway investigation. Tech. Rep. HL-85-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, Miss.
- 15) Morales, V., Tokyay T.E., & Garcia M. 2012. Numerical modeling of ogee crest spillway and tainter gate structure of a diversion dam on Canar River. Ecuador, XIX International Conference on Water Resources. 17-22 June. University of Illinois at Urbana-Champaign, Ecuador, USA.
- 16) Murphy, T. E. 1973. Spillway crest design. MP H-73-5. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- 17) U.S. Army Corp of Engineers (USACE) 1990. Hydraulic design of spillways. EM 110-2-1603, Department of the Army, Washington, D.C.
- 18) US Army Corps of Engineers (USACE) 1988. Hydraulic design criteria. Mississippi, USA.