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 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 پایابِ 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[3]، 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 (خلاءزایی) 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 حفره-های 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 سال۱۹۴۱ 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 تقریبًا 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 تاثیر کمان‌های مختلف تاج در بالادست سرریز تاج دایره‌ای را بر چند فراسنج هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در کمان های ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و۹۰ درجه از تاج بالادست انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تاثیر 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 بهنجار 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

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

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 می‌یابد.

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 سیلاب‌های 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 آن‌ها نشان داد که شبیه عددی مورد استفاده شده توانایی خوبی در شبیه‌سازی 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 آن‌ها نشان دادند که با پیشروی روی سرریز سرعت افزایش یافته و فشار ایستا نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه شاخ حفره سازی افزایش یافته و احتماال وقوع حفره سازی بیشتر می‌شود. 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 آن‌ها نشان داد که با مقایسه مقادیر ضریب حفره سازی با مقدار بحرانی آن (۰/۲۵) در تمام حالات مقادیر ضریب حفره سازی از مقدار بحرانی بیشتر است که نشان می دهد خوردگی اتفاق نمی‌افتد.

عشرتی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی اثر انحنای سرریز منحنی پیوند بر عملکرد هیدرولیکی آن پرداختند. مقایسه نتایج به‌دست آمده از دو شبیه نشان می‌دهد که برای سرریز در شکل بهنجار و با شرایط هیدرولیکی مشابه استغراق سریع، ضریب بده به ازای بده‌های برابر کمتر است. به‌طور کلی، عامل قوس محوری باعث افزایش ضریب بده و کارایی سرریز می‌شود که این مسئله به وسیله‌ی مورالس و همکاران (۲۰۱۲) به برررسی 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 داده‌های به‌دست آمده از یک نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. از نیمرخ سرعت مشاهده می‌شود که توزیع حداکثر سرعت در وجه میانی سرریز اتفاق افتاده و این ناحیه با کاهش ارتفاع سرریز در بده ثابت، به‌سمت بالادست و با کاهش بده در ارتفاع ثابت سرریز به سمت پایین‌دست کشیده می‌شود.

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

مواد و روش‌ها

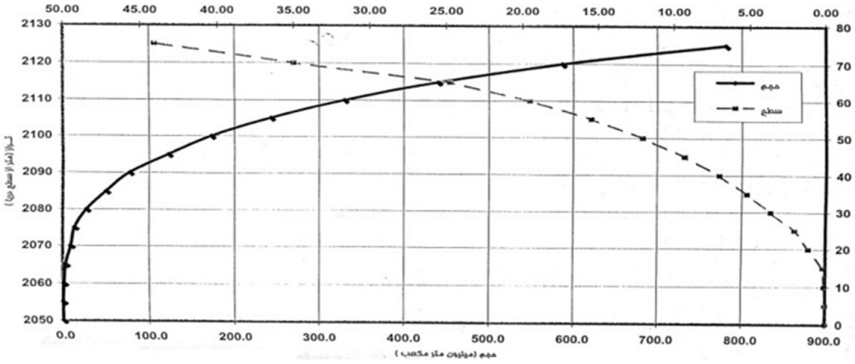
الف) سد مطالعه شده

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 بهره‌برداری 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

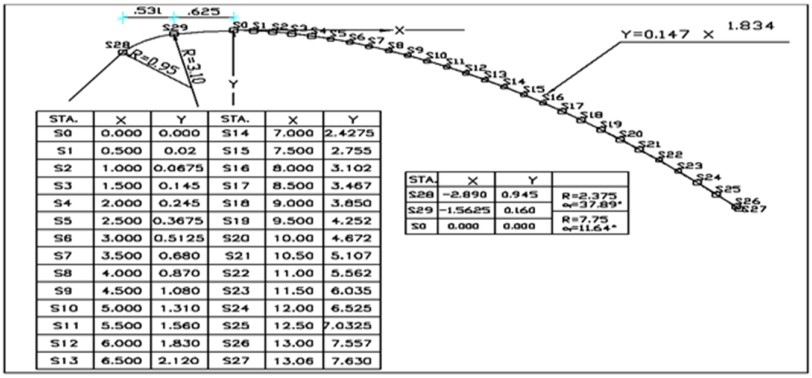
جدول۱- مشخصات کلی سد ملاصدرا.

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



شکل۱- روابط سطح و حجم با ارتفاع در مخزن سد ملاصدرا در ایران.

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



STA.	X	Y	STA.	X	Y
S0	0.000	0.000	S14	7.000	2.4275
S1	0.500	0.02	S15	7.500	2.755
S2	1.000	0.0675	S16	8.000	3.102
S3	1.500	0.145	S17	8.500	3.467
S4	2.000	0.245	S18	9.000	3.850
S5	2.500	0.3675	S19	9.500	4.252
S6	3.000	0.5125	S20	10.00	4.672
S7	3.500	0.680	S21	10.50	5.107
S8	4.000	0.870	S22	11.00	5.562
S9	4.500	1.080	S23	11.50	6.035
S10	5.000	1.310	S24	12.00	6.525
S11	5.500	1.560	S25	12.50	7.0325
S12	6.000	1.830	S26	13.00	7.557
S13	6.500	2.120	S27	13.06	7.630

STA	X	Y	
S28	-2.890	0.945	R=2.375 α=37.89°
S29	-1.5625	0.160	R=7.75 α=11.64°
S0	0.000	0.000	

شکل۲- جزییات خط الراس و شکل سرریز (گزارش طرح سد ملاصدرا).

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 ظرفیت عبوردهی رودخانه، حداکثر بده خروجی ۱۰۰۰۰ ساله و PMF[4] و تراز سطح آب در هر کدام از سیلاب‌های ذکر شده (جدول ۲).

[4] PMF: حداکثر سیلاب محتمل

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)	بده طرح(حداکثر سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله(متر مکعب بر ثانیه)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله(متر)	حداکثر سیلاب محتمل(PMF) (متر مکعب بر ثانیه)	حداکثر تراز سطح آب مخزن در هنگام حداکثر سیلاب محتمل(PMF)
۴۴۰	۲۱۱۶	۲۰۰۸	۲۱۱۹/۴	۳۳۴۷	۲۱۲۱/۱

نقشه‌های تصویر افقی و برش از مقاطع سرریز سد ملاصدرا به‌وسیله‌ی شرکت مهندسی مشاور آبان پژوه در مقیاس۱:۱۰۰۰ ترسیم گردیده است. جهت بررس نتایج آزمایش ها 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.

جدول۳- مشخصات سرریز سد ملاصدرا.

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

شکل۳- نمای کلی سرریز سد ملاصدرا

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 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.

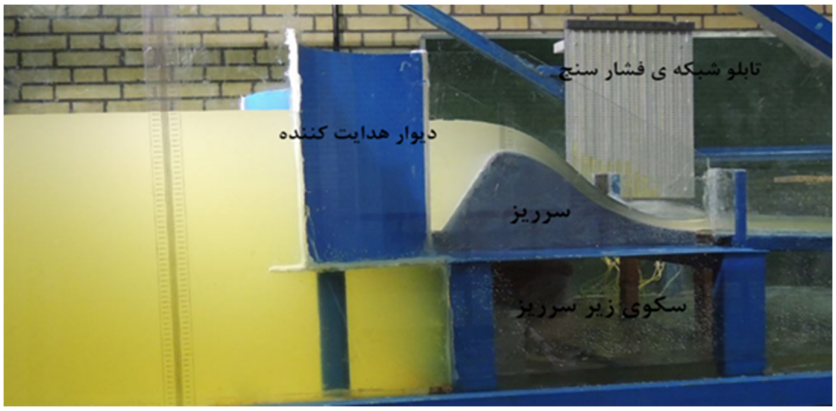
جدول۴- نسبت های مقیاس (بر پایه ی عدد فرود) برای مساحت، سرعت و بده جریان.

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

جدول۵- بده‌های اوج هیدروگراف در سد ملاصدرا و بده‌های شبیه در آزمایشگاه.

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

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید در یک نهر پایه دار آزمایشگاهی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶، ۱ و ۰/۵ 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 ۱/۴۰ 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 سکوئی در نهر آزمایشگاهی قرار داده و با چسب آکواریوم محکم و آب‌بندی کردیم. بالادست سرریز یک مخزن برای تغذیه‌ی مقدار بده مورد نیاز تعبیه شد. با توجه به مقیاس ۱/۴۰ ارتفاعی عرض شبیه سرریز۵۰ و ارتفاع آن ۲۲/۵ سانتی‌متر و با توجه به رقوم نقشه این سد برروی یک سکو به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری قرار گرفت. همچنین، با توجه به اینکه عرض سرریز ۵۰ سانتی‌متر بوده با استفاده از دیواره‌های هدایت کننده با شعاع ۲۵ سانتی متر (مطابق شبیه اصلی) به مخزن بالادست متصل گردید. در شکل ۴ نمایی از سرریز نصب شده در نهر آزمایشگاهی نمایش داده شده است.



شکل۴- نمایی از کارگذاری سرریز در نهر پایه دار.

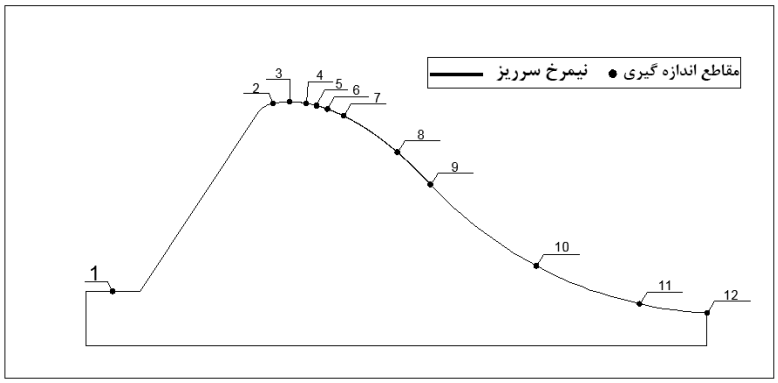
ج) برداشت اطلاعات آزمایشگاهی

۱– اطلاعات فشار ایستا

برای اندازه‌گیری فشار ایستا در این شبیه، فشارسنج درسرتاسر 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 ۱۲ 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 فشارسنج ها را بر روی سرریز، جدول ۶ محل قرارگیری فشارسنج ها 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 ۰/۶ عمق جریان اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری سرعت جریان از سرعت سنج (با دقت ۱/۵ ٪ ± سرعت واقعی) استفاده شده است. همچنین برای تهیه‌ی نیمرخ سطح آب در امتداد طولی و عرضی شبیه از خط



شکل۵-موقعیت فشارسنج های نصب شده بر روی سرریز با مقیاس۱/۴۰ ارتفاعی.

جدول۶- موقعیت فشارسنج های نصب شده بر روی سرریز با مقیاس۱/۴۰ 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

کش مقیاس میله‌ای(Point Gauge) با دقت ۰/۲ میلی-متراستفاده شده است.این دستگاه بر روی محور فوقانی نهر پایه دار بر روی یک شاسی نصب گردید. خط کش مقیاس میله‌ای قابلیت حرکت در دو محور طولی و عرضی را دارا است. تأمین آب نهر پایه دار به وسیله‌ی 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 جمع‌آوری آب و اندازه‌گیری بده و تخلیه آب به مخزن تغذیه تعبیه شده است. در این شبیه بده مورد نیاز به وسیله‌ی یک پمپ گریز از مرکز انجام شد.

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

$$Q = C_d L_e H_e^{3/2} \qquad (۱)$$

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 سانتی‌متر) هستند.

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

$$C_P = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_0} \qquad (۲)$$

در این رابطه P_0 فشار نقطه‌ی مورد نظر، P_v فشار بخار محلی و V_0 سرعت سیال 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:

$$\sigma = \frac{\frac{P_{Atm}}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} + hCos\,\theta \pm \left(\frac{h}{g} \times \frac{V_0^2}{r}\right)}{\frac{V_0^2}{2g}} \qquad (۳)$$

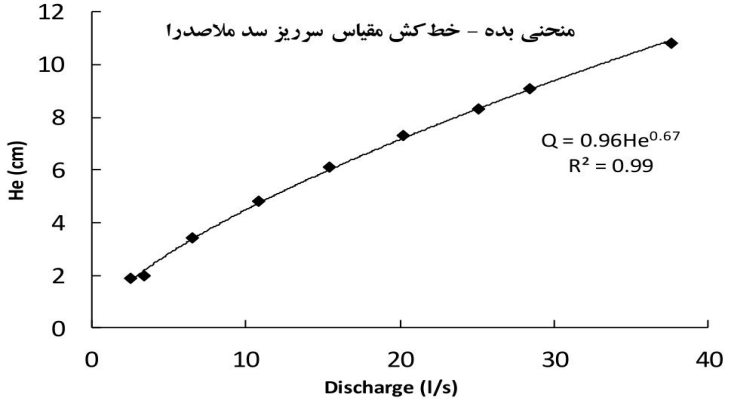
در رابطه فوق $P_{atm}) - \frac{P_{atm}}{\gamma}$ فشار نیوار و γ وزن مخصوص آب) فشار محیط اطراف می‌باشد که در شرایط آزمایشگاهی معادل یک نیوار یا ۷/۷۰ متر ستون آب (۷۵/۴۶ کیلو پاسکال) در نظر گرفته می‌شود. $\frac{Pv}{\gamma}$ - مقدار فشار بخار مایع است که در دمای حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل ۰/۳۲ مترآب (۳/۱۶ 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 می شود. $hCos\,\theta$ مقدار فشار (فشار نظیر ارتفاع آب و در آن h ارتفاع آب عمود بر سطح تندآب و θ زاویه کف تنداب 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=۱۰ متر، برابر $\frac{hV_0^2}{98.1}$ خواهد شد (r شعاع کف تنداب).

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 محاسبه ی 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 به‌طور متوسط حدود ۲/۱ است. نکته قابل ذکر اینکه در پراکندگی مزبور نقاط در مقادیر کم بده به علت عمق کم آب و تاثیر کشش سطحی است.

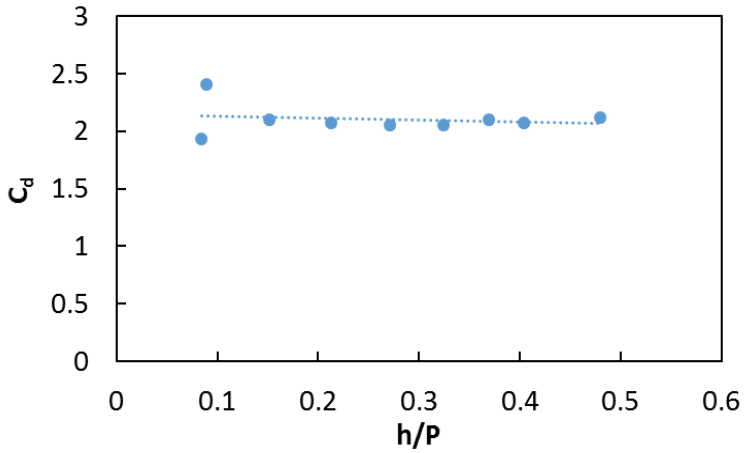
با جایگذاری مقادیر عددی مذکور در معادله‌ی ۳ در هر مقطع اندازه‌گیری، ضریب حفره سازی در آن مقطع محاسبه می‌گردد. در شکل ۸ منحنی تغییرات ضریب حفره سازی در امتداد محور طولی سرریز در بده‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۸ ضریب حفره سازی در طول سرریز دارای روندی نزولی است، زیرا با فاصله گرفتن از تاج سرریز 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

نتایج و بحث



شکل۶-منحنی بده- خط کش مقیاس سرریز منحنی پیوند.

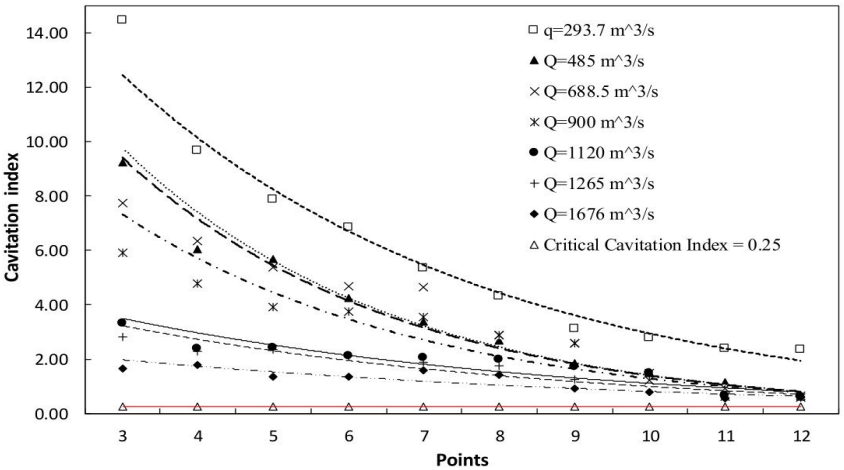


شکل ۷- تغییرات ضریب بده در مقابل نسبت h/P

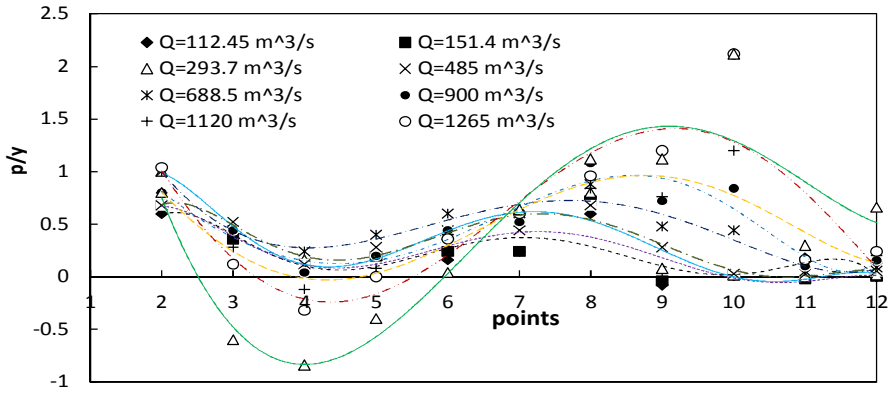
ولی با افزایش بده احتمال وقوع حفره سازی خصوصاً، در نقاط انتهایی سرریز، بالا می‌رود.

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.

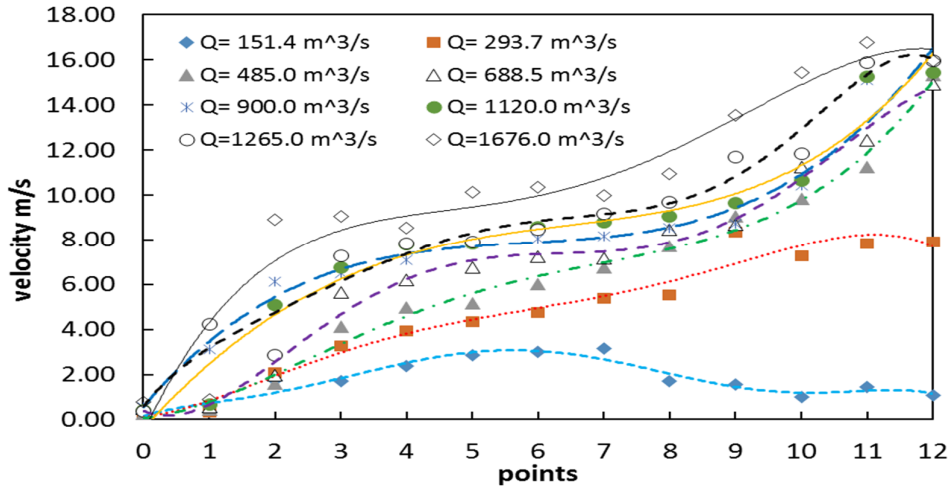
در این تحقیق عمق و سرعت جریان روی آستانه‌ی سرریز در تمامی بده‌های جریان اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۰ تغییرات سرعت بر روی سرریز در بده‌های مختلف نشان داده شده است. حداکثر سرعت جریان در طول سرریز تقریباً برای تمامی بده‌های مورد آزمایش در انتهای پای سرریز بوده و مقادیر آن مطابق جدول ۷ هستند. به‌طور کلی سرعت 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 می دهد. نکته‌ی قابل ذکر آنکه در انتهایی 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 ابتدایی، تقریباً در کل سرریز جریان فوق بحرانی است.



شکل۸- منحنی تغییرات ضریب خوردگی (حفره سازی) بر روی سرریز.



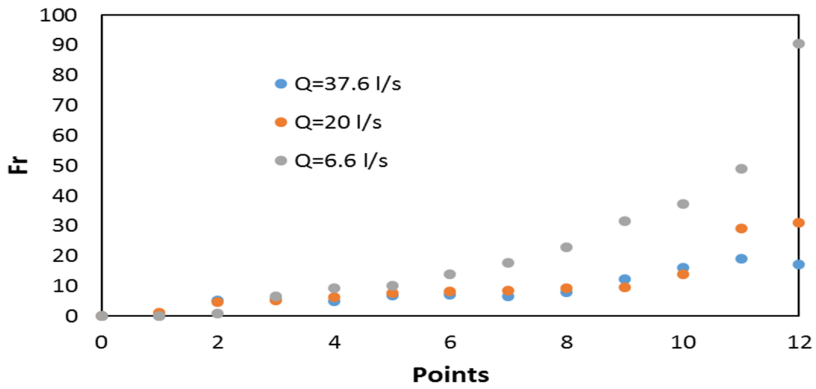
شکل۹- منحنی تغییرات فشارهای ایستا بر روی سرریز سد ملاصدرا.



شکل ۱۰- منحنی تغییرات سرعت جریان در طول سرریز.

جدول۷- حداکثر سرعت جریان در طول سرریز برای تمامی بده‌های مورد آزمایش.

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



شکل ۱۱- منحنی تغییرات عدد فرود در طول سرری

نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان بر روی سرریز سد ملاصدرا جهت حصول اطمینان از عملکرد مطلوب آن در دوران بهره‌برداری است. به‌همین منظور سرریز سد ملاصدرا طراحی و با مقیاس ۱/۴۰ ارتفاعی ساخته شد. مطابق نتایج این تحقیق ضریب بده به‌طور متوسط حدود ۲/۱ است. نتایج بررسی شاخص حفره سازی نشان می‌دهند که در طول سرریز ضریب حفره سازی دارای روندی نزولی است، خصوصاً در بده‌های بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه شاخص حفره سازی، خصوصاً در تاج سرریز، به سرعت به مقدار بحرانی حفره سازی نزدیک می‌شود. به‌طور کلی، در بده‌های مورد آزمایش در این تحقیق شاخص حفره سازی همواره بالاتر از مقدار بحرانی است، ولی با افزایش بده احتمال وقع حفره سازی، خصوصاً در نقاط انتهایی سرریز بالا می‌رود. مطالعه‌ی تغییرات فشار نشان می‌دهد که حداقل فشار در فاصله‌ی بین نقاط ۳ تا ۶، حداکثر فشار در فاصله‌ی بین ۸ تا ۱۰ هستند. 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 می افتد.

نمادها

H: عمق آب برروی سرریز ذوزنقه‌ای (به عرض ۲۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری بده

E_l: رقوم سطح آب داخل مخزن و پشت سرریز

H_d: ارتفاع آب روی سرریز

V_a: سرعت اب داخل مخزن و سرعت نزدیک شدن آب به سرریز

H_a: ارتفاع معادل سرعت $H_a = \frac{V_0^2}{2g}$

H_e: ارتفاع اب 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 شبیهFLOW3D، 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 انحنای 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.

۹) گلکـار، ف.، فرهمند، ع.، لیاقت، ع.، و صـــدقی، ح.، ۱۳۸۸، روندیابی مخزن سـد ملاصدرا جهت تعیین مقادیر ســـیلاب تعدیل شـــده با شـــبیه هیدرولوژیکی-HEC HMS،هشـتمین سـمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۱۰) محمودیان شـوشـتری، م.، ۱۳۸۷. اصول جریان در مجاری باز. انتشـارات دانشگاه شهید چمران اهواز. چاپ اول. جلد دوم. ص. ۵۰۸.

۱۱) مهری، م.، فتحی مقـدم، م.، ابن جلال، ر.، ۱۳۸۷. بررسی خلاء زایی(حفره سازی) بر روی سرریز سد بالارود بـا اســـتفـاده از شـــبیـه 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) Maynord, 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.

19) US Bureau of Reclamation (USBR) 1973. Design of small dams, Washington, D.C, USA.