



اثر ارتفاع و فاصله اولین زبری در استهلاک انرژی سرریزهای کلیدپیانویی

محبوبه قنونی^۱، سید محسن سجادی^۲ و جواد احدیان^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
 ۲- نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز sajjadi.mohsen@gmail.com
 ۳- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۱۰

دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۵

چکیده

یکی از مشخصه‌های مهمی که تاکنون در سرریزهای کلیدپیانویی کمتر به آن پرداخته شده، استهلاک انرژی می‌باشد. با توجه به این ویژگی بررسی استهلاک انرژی جریان روی سرریز کلیدپیانویی هدف اصلی مطالعه حاضر می‌باشد. بدین منظور در این مطالعه بلوک‌هایی در کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی مستطیلی تعبیه شد. برای ارزیابی تأثیر پارامترهای ارتفاع موانع (H_b) و فاصله اولین ردیف موانع مستطیلی از تاج کلید خروجی (D_s)، یک مدل فیزیکی از سرریز کلیدپیانویی به عرض ۹۰ سانتی‌متر ساخته شد. این سرریز روی یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۳ متر، عرض ۹۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ متر تعبیه گردید. سپس موانع روی کلید خروجی سرریز قرار داده شد. آزمایش‌ها با دبی‌های مختلف از ۵ تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه صورت پذیرفت و میزان استهلاک انرژی سرریز مورد ارزیابی قرار گرفت. موانع در دو ارتفاع متفاوت (۱۲ و ۸ سانتی‌متر) و دو فاصله ($\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{3}$ طول کلید خروجی از ابتدای آن) قرار داده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ارتفاع موانع و افزایش فاصله‌ی اولین ردیف نصب، میزان استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد. از طرفی پارامتر ارتفاع نسبت به فاصله، اثر بیشتری را در افزایش استهلاک انرژی دارد و میزان استهلاک انرژی در مدل با ارتفاع مانع ۱۲ سانتی‌متر، اختلاف چندانی با مدل ۸ سانتی‌متری نداشت؛ ولی حدود ۱۰ درصد بیشتر از مدل بدون مانع بود. همچنین استهلاک انرژی در مدل با فاصله‌ی $\frac{1}{3}$ به اندازه‌ی ۴ درصد بیشتر از مدل با فاصله‌ی $\frac{1}{4}$ و به اندازه‌ی ۱۰ درصد نیز بیشتر از مدل بدون مانع است. همچنین با افزایش دبی، میزان استهلاک انرژی کاهش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: سرریز کلیدپیانویی، استهلاک انرژی، کلید خروجی، موانع مستطیلی.

مقدمه

یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها برای اصلاح سرریزهای موجود می‌باشند، چرا که علاوه بر جنبه اقتصادی، حجم مخزن را افزایش داده و میزان جریان عبوری را به میزان قابل توجهی نیز زیاد می‌کنند. هندسه خاص این سرریز، جریان، جت‌ها و همچنین استهلاک انرژی متفاوتی را در پایین‌دست ایجاد می‌کند (Machiels, 2012). سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی برای استهلاک انرژی جنبشی اضافی جریان به کار می‌روند. آن مستهلک‌کننده‌ی انرژی مؤثر می‌باشد که قادر به کند کردن حرکت سریع جریان آب بدون وارد کردن خسارت به سازه یا کانال پایین‌دست سازه باشد. دو نوع مستهلک‌کننده‌ی انرژی عبارتند از: مستهلک‌کننده‌های نوع پرش هیدرولیکی و مستهلک‌کننده‌های نوع ضربه‌ای. مستهلک‌کننده‌های نوع ضربه‌ای آب را به مانع‌هایی هدایت می‌کند که جریان را در همه‌ی مسیرها منحرف می‌کند و سطوح بالایی از آشفته‌گی را تولید و بدین صورت انرژی جریان را مستهلک می‌کنند (Akbarian, 2009). کاهش انرژی جریان روی سرریزها قبل از آن که جریان به پایین‌دست منتقل

در کنار امکانات و پیشرفت‌های گسترده در امر ساخت سدهای بزرگ، لزوم توسعه روش‌های طراحی و ساخت سیستم‌هایی که بتوانند سیلاب‌ها را به درستی تخلیه کنند، مطرح می‌گردد. شوت‌ها و سرریزها باید به گونه‌ای طراحی شوند که در حین عملکرد، هیچ‌گونه صدمه عمده‌ای به خود سازه و همچنین محیط اطراف آن وارد نیابند. طبق تعریف هر مانعی که بر سر راه جریان در کانال قرار گیرد و باعث شود تا آب در پشت آن بالا آمده و بر سرعت آب در ضمن عبور از روی آن افزوده شود، سرریز نامیده می‌شود (Abrishami and Hoseini, 2011). سرریزهای کلیدپیانویی جدیدترین نوع سرریزهای تاج طولانی هستند. هندسه ویژه آن‌ها، امکان احداث روی تاج بسیاری از سدهای موجود را فراهم می‌آورد. تفاوت اساسی آن‌ها با سایر سرریزهای غیر خطی معمول عبارتند از: امکان قرارگیری آنها در تاج سد مخزنی و افزایش دبی مخصوص (Epicum and Machiels, 2011). سرریزهای کلیدپیانویی

صاف، سطح شیبدار پلکانی (دو بعدی)، سطح شیبدار سه بعدی منظم، سطح شیبدار پلکانی با موانعی که به صورت منظم روی پله‌ها قرار داشتند (نامنظم سه بعدی). تحقیقات نشان داد که سرریز کلیدپیانویی همراه با سرریز پلکانی تنها برای استفاده در سدهای متوسط تا بلند و فقط برای بخش پایینی سد مفید خواهد بود. اشکال پیچیده‌تر (سه بعدی)، اتلاف انرژی جریان را به طور قابل توجهی افزایش نمی‌دهند و حتی ممکن است مقداری خطا ایجاد کنند. Erpicum و Machiels (2011) به مقایسه میزان استهلاک انرژی در دو هندسه متفاوت از سرریز کلید پیانویی و سرریز اوجی پرداختند. به این صورت که هر کدام از سرریزها، سرریز کلید پیانویی شماره ۱، سرریز کلید پیانویی شماره ۲ و سرریز اوجی استاندارد را از پایین دست یک سرریز پلکانی وصل کردند. در هر دو سرریز کلید پیانویی نسبت ابعاد هندسی تقریباً یکسان بوده با این تفاوت که ابعاد PKW_2 حدوداً $1/6$ برابر کوچکتر از ابعاد PKW_1 بود. نتایج نشان داد که در خصوص استهلاک انرژی، هیچ تفاوت آشکاری میان سرریزهای مورد آزمایش وجود ندارد. به عبارت دیگر، میزان استهلاک انرژی در طول سازه برای هر سه نوع سرریز تقریباً برابر است؛ ولی به ازای دبی‌های مخصوص یکسان، بسته به نوع سرریز، تفاوت‌های معنی‌داری در جریان بالادست سرریز پلکانی مشاهده شد. Erpicum et al. (2012) مطالعه‌های خود را روی سرریزهای کلید پیانویی انجام دادند. آن‌ها با بررسی پروفیل‌های سرعت، فشار، سطح آب و هم‌چنین عدد فرود، و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی که همگی به صورت $1/50$ ، $2/50$ و $3/50$ سیکل ساخته شد، به نتایج زیر دست یافتند: برای نسبت‌های کم $\frac{H_t}{P}$ انواع تبدیل جت‌های جریان، از چسبنده (Clinging Nappe) به فشرده (Leaping Nappe) و از جت فشرده به جت آزاد یا پرشی (Springing Nappe) بر روی سرریزهای کلید پیانویی قابل مشاهده است که به شکل و ضخامت تاج سرریز بستگی دارند. برای مدل‌هایی که در آن‌ها نسبت $\frac{P}{W_u}$ کمتر از مقدار بهینه اقتصادی است، تأثیر شیب از افزایش ارتفاع (به واسطه وجود دیواره سپری) کمتر است. تأثیر وجود دیواره‌های سپری بر راندمان سرریز در مدل‌هایی با نسبت $\frac{P}{W_u} = 0.34$ ، بیشتر از مدل‌هایی است که با نسبت $\frac{P}{W_u} = 1.33$ ساخته شده‌اند. لازم به ذکر است که پارامتر H_t ، ارتفاع استاتیکی آب در بالادست سرریز (ارتفاع تیغه آب روی سرریز به علاوه ارتفاع آب معادل انرژی جنبشی)، P ، ارتفاع سرریز، W_u ، عرض یک سیکل از سرریز می‌باشد. Javaheri و (2011) Kabiri-samani، با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی سرریز کلید پیانویی و با استفاده از نرم افزار SPSS، رابطه‌ای بهینه برای ضریب جریان در حالت آزاد سرریزهای کلید پیانویی ارائه و به این ترتیب دبی عبوری از این سرریز را محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ارتفاع سرریز (P)، طول

شود، یکی از راه‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان از تخریب احتمالی خود سازه، سازه‌های پایین دست و نیز هزینه‌های مازادی که به خاطر ایجاد سازه‌های حفاظتی مستحکم بر سازندگان سازه‌های هیدرولیکی تحمیل می‌شود، جلوگیری به عمل آورد و نیز کاهش هزینه‌های اضافی ساخت سازه‌های حفاظتی و ابعاد بزرگتر حوضچه‌ی آرامش را به دنبال دارد (Katourani and Kashefipour, 2012). در خصوص کاربرد مانع و یا بلوک، آزمایش‌ها و نتایج سازمان احیای اراضی آمریکا نشان داده است که با به کار بردن بلوک‌های با ابعاد زیاد که باعث جداشدگی جت عبوری جریان و در نتیجه تلاطم می‌گردد، می‌توان به طور مؤثری انرژی جنبشی جریان را مستهلک نمود. از خصوصیات اصلی این نوع شیب‌شکن آن است که به پایاب نیاز نداشته و در صورتی که پایاب تشکیل یک استخر را بدهد، آب‌شستگی بستر نیز کاهش می‌یابد. در واقع این شیب‌شکن از شتاب‌گیری بیش از حد جریان جلوگیری کرده و یک سرعت نهایی قابل قبول را فراهم می‌آورد. این نوع سازه‌های مستهلک‌کننده، انرژی جریان را به صورت پیوسته در طول سرریز کاهش می‌دهند (Barani and Abbasi-parvin, 2009). تاکنون مطالعات گسترده‌ای در رابطه با راندمان هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی انجام گردیده است که می‌توان به مطالعات Machiels (2012)؛ Lempèrière و Ouamane (2003)؛ Erpicum و (2011) Machiels؛ Javaheri و Kabiri-samani (2011)؛ Afzalian و Ahadian (2014)؛ و Yarmohammadi (2015) اشاره کرد. ولی در مقایسه با آن، مطالعه‌های با موضوع استهلاک انرژی در سرریزهای کلید پیانویی بسیار اندک بوده است. Peterka (1958) به بررسی طراحی هیدرولیکی این نوع از تلف‌کننده‌های انرژی پرداخت و بعد از مطالعه‌های گسترده مقادیر آن را استاندارد نمود. Lempèrière و Ouamane (2003) مفهوم سرریز کلید پیانویی را همراه با دو مزیت آن در مقایسه با سایر سرریزهای غیرخطی معمول توصیف کردند: امکان قرارگیری سرریز در تاج سد مخزنی، افزایش دبی مخصوص. تحقیق مورد نظر در دانشگاه هوچی مین (Technology (HCMUT) Ho Chi Minh University of) با همکاری موسسه هیدروکوپ فرانسه با هدف مطالعه ساختار سرریز کلید پیانویی، امکان افزایش استهلاک انرژی جریان در قسمت پایین دست سد و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه آرامش پایین دست آن انجام شد. نتایج این تحقیق، در ارتباط با نتایج به دست آمده از آزمایشگاه‌های هیدرولیک در سرتاسر جهان، نشان می‌دهد که طراحی سرریزهای کلید پیانویی بهترین راه‌حل برای اصلاح سرریز چند سد موجود در ویتنام و فرانسه هستند که دبی مخصوص زیادی دارند. هدف از این تحقیق بررسی اتلاف انرژی جریان در پنجه سد بود. لذا از چندین مدل فیزیکی با کف زیر به اشکال مختلف برای وجه پایین دست سد مخزنی به این صورت استفاده شد: سطح شیبدار

سرریز (L)، طول لبه آویزان بالادست (C) و تعداد سیکل‌ها که در نهایت به افزایش طول کلی سرریز می‌انجامد، باعث افزایش ضریب دبی و در نهایت دبی عبوری از سرریز می‌شود. بنابراین سرریز کلیدیپانویی می‌تواند به‌عنوان سازه‌ای اقتصادی با کارایی بالا در سدها و سیستم‌های انتقال آب و شبکه‌های آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار گیرد. Ahadian و Afzalian (2014) با استفاده از دو مدل سرریز کلیدیپانویی به بررسی اثر شکل پایه‌های مختلف و سپس اثر تغییر ارتفاع دیواره‌ی سپری بدون شیب بر راندمان هر دو مدل پرداختند. به این صورت که از پایه‌های مختلف مثلثی، تخت و نیم استوانه‌ای و دیواره سپری با سه ارتفاع ۲/۵۰، ۴/۵۰ و ۶/۵۰ سانتی‌متر و سه شیب مختلف ۳، ۵/۵ و ۸ درجه در جهت جریان و در خلاف آن استفاده کردند. نتایج نشان داد که پایه نیم‌استوانه‌ای دارای راندمان بیشتری نسبت به پایه‌های تخت و سرریز بدون پایه می‌باشد. همچنین وجود دیواره سپری بدون شیب در مدل یک بی‌تأثیر است. اما در مدل دو با افزایش ارتفاع دیواره‌ی سپری راندمان افزایش می‌یابد. Yarmohammadi (2015) با استفاده از مدل‌های ساخته شده توسط Ahadian و Afzalian (2014)، به بررسی اثر دیواره‌ی سپری بر استغراق ورودی در سرریز کلید پانویی پرداخت. مدل‌های دیواره سپری به‌صورت پیوسته بر کل تاج سرریز، عدم پیوستگی در تاج کلید خروجی و عدم پیوستگی در تاج کلید ورودی و خروجی ارائه گردید. مدل‌های دیواره‌ی سپری شیب‌دار نیز در سه ارتفاع ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ سانتی‌متری دیواره‌ی سپری ارائه شدند. بررسی‌ها نشان داد که قرارگیری دیواره‌ی سپری بر روی کل تاج سرریز در مدل یک، تأثیر معنی‌داری ندارد، در حالی که در مدل دو عملکرد سرریز را حدود ۱۵ درصد بهبود می‌بخشد. همچنین قرارگیری غیرپیوسته‌ی دیواره‌ی سپری بدون شیب در هر دو مدل، در بارهای آبی کم، با کاهش ظرفیت تخلیه منجر به افزایش تراز آب بالادست می‌شود، در حالی که در بارهای آبی زیاد راندمان سرریز را افزایش می‌دهد.

بر اساس آنچه که در مروری بر منابع گذشت، می‌توان بیان نمود در تحقیق‌های انجام شده بر روی سرریزهای کلیدیپانویی کمتر به موضوع استهلاک انرژی هم‌زمان و بدون تأثیر در بازدهی تخلیه سرریز، توجه شده است؛ لذا تحقیق حاضر بر این اساس استوار گردید. در این تحقیق، بررسی نتایج آزمایشگاهی ارتفاع و فاصله متفاوت موانع بر میزان استهلاک انرژی سرریز کلیدیپانویی مستطیلی با کلید خروجی مانع‌دار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

امکانات آزمایشگاهی و روش انجام تحقیق

کلیه مراحل انجام این تحقیق در آزمایشگاه شماره ۲ مدل‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب تهران انجام شد. طول فلوم

آزمایشگاهی ۱۳ متر، ارتفاع فلوم در ۱ متر ابتدایی ۲ متر، در ۲/۵ متر دوم ۱/۵ متر، در ۸ متر سوم ۱ متر و در ۱/۵ متر انتهایی که کف فلوم به اندازه‌ی ۰/۵ متر پایین‌تر رفته و هم تراز با کف آزمایشگاه قرار می‌گیرد، نیز ۱/۵ متر می‌باشد. با توجه به ضخامت دیواره فلوم، عرض مفید فلوم ۹۰ سانتی‌متر می‌باشد. اندازه‌گیری دبی جریان توسط سرریز مستطیلی و لیمنومتر که در انتهای فلوم قرار داشت، انجام می‌گرفت. در ورودی لوله تغذیه‌کننده فلوم، شیر فلکه کنترل دبی جریان وجود داشت و برای آرام کردن جریان آب در ابتدای فلوم از صفحه مشبک فلزی و مقداری پوشال استفاده شد. همچنین در انتهای فلوم مخزنی وجود دارد که به‌منظور تخلیه جریان از فلوم تعبیه شده است. لازم به ذکر است که در کلیه آزمایش‌های این تحقیق شیب مجرای فلوم آزمایشگاه برابر صفر تنظیم شده است. پلان و مقطع فلوم مورد استفاده در شکل (۱) نمایش داده شده است. در این تحقیق مدل‌های فیزیکی با وجود موانع با آرایش ضربدری در دو ارتفاع متفاوت در ردیف‌های متوالی ($H_{b1} = 12\text{cm}$ و $H_{b2} = 8\text{cm}$) و قرارگیری در دو فاصله‌ی متفاوت از ابتدای کلید خروجی سرریز ($D_1 = \frac{1}{4}L_0$ و $D_2 = \frac{1}{3}L_0$) ساخته شدند. در شکل (۲)، نمایی سه‌بعدی از سرریز مورد استفاده در آزمایش‌های این تحقیق نشان داده شده است. سپس با انجام ۴۵ آزمایش با دبی‌های ۵، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۶۵، ۸۰، ۹۵، ۱۲۰ و ۱۳۵ لیتر بر ثانیه، میزان استهلاک انرژی سازه در سرریز کلیدیپانویی با کلید خروجی مانع‌دار مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۹ آزمایش در حالت بدون مانع و ۳۶ آزمایش با مدل‌های مانع‌دار انجام شد. لازم به یادآوری است که موانع در دو ارتفاع متفاوت و همچنین دو فاصله متفاوت در نظر گرفته شدند. برای ایجاد موانع از جنس چوب به ضخامت ۴ سانتی‌متر استفاده شد. همچنین ابعاد سرریز بر اساس نسبت $\frac{P}{W_{ti}} = 1.33$ (مدل بهینه هیدرولیکی) به‌دست آمد. به این صورت نسبت بهینه مانند $\frac{W_i}{W_o}$ (نسبت عرض کلید ورودی به عرض کلید خروجی سرریز)، $\frac{B_i}{B_o}$ (نسبت طول شیروانی پایین‌دست به طول شیروانی بالادست سرریز) و $\frac{L}{W}$ (طول کل تاج و عرض تمام سرریز است) رعایت می‌شود و از طرفی از نظر اقتصادی مجموع مساحت قطعه‌ها پس از برش با مساحت صفحات پلکسی‌گلاس موجود در بازار (۱۲۰ در ۱۸۰ سانتی‌متر) هم‌خوانی دارد. نوع ساختار تاج سرریز تاج صاف بوده و دماغه ورودی سرریز تخت می‌باشد. مدل آزمایشگاهی به‌صورت تیپ A، و با تعداد ۱/۵ سیکل ساخته شد. لذا پارامتر $\frac{B_i}{B_o}$ برابر ۱ می‌باشد. تیپ A از سرریزهای کلیدیپانویی یکی از ۴ نوع تیپ مختلف این نوع سرریز می‌باشد. تفاوت تیپ‌های مختلف این سرریز در وجود شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست می‌باشد که تیپ A، شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست را شامل می‌شود. نهایتاً با استفاده از نرم‌افزار Autocad، سرانجام ابعاد مطابق جدول (۱) برای مدل انتخاب شد. پس از ساخته شدن هر مدل و نصب آن در

این مقطع می‌باشد که با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی محاسبه می‌گردد. فاکتور اصلاحی انرژی جنبشی (α) نیز برابر واحد فرض شده است. در حقیقت، مقادیر مختلف این پارامتر در شرایط آزمایشگاهی دارای محدوده‌ی (۱/۰۵ - ۱/۰۸) (Chen, 1992) بوده است، که عملاً تأثیری روی نتایج ندارد. پس از تعیین مقدار V_1 ، انرژی پای سرریز از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2)$$

که در این رابطه E_1 انرژی جریان در پای سرریز، y_1 عمق جریان در پای سرریز و V_1 سرعت متوسط در این مقطع می‌باشد که با استفاده از رابطه‌ی پیوستگی محاسبه می‌گردد. در نهایت مقدار افت انرژی و افت نسبی انرژی به صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند:

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (3)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} \quad (4)$$

فلوم آزمایشگاهی به این صورت عمل گردید که ابتدا آزمایش‌ها در محدوده دبی تعریف شده در حالت بدون موانع (آزمایش‌های شاهد)، انجام شد. به این صورت که در شرایط جریان ماندگار، پارامترهای مختلف جریان از جمله عمق جریان بالادست و پای سرریز اندازه‌گیری گردید. سپس آزمایش‌های مربوط به مدل‌های مانع‌دار (در دو ارتفاع و دو فاصله‌ی متفاوت) در ۹ دبی مذکور انجام شد. در این تحقیق دبی جریان با استفاده از لیمنومتر و سرریز مستطیلی مستقر در انتهای فلوم اندازه‌گیری شد. همچنین جهت اندازه‌گیری عمق یا رقوم سطح آب در هر مقطع از شاخص مدرج استفاده شد. همچنین سرعت جریان با استفاده از معادله پیوستگی جریان محاسبه گردید. در این تحقیق، میزان انرژی جریان در بالادست سرریز از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

$$E_0 = y_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (1)$$

که در این رابطه E_0 انرژی کل جریان در بالادست سرریز، y_0 عمق بالادست سرریز که با نوار مدرج در فاصله‌ای مناسب از بالادست سرریز برداشت شده است. همچنین V_0 سرعت متوسط در

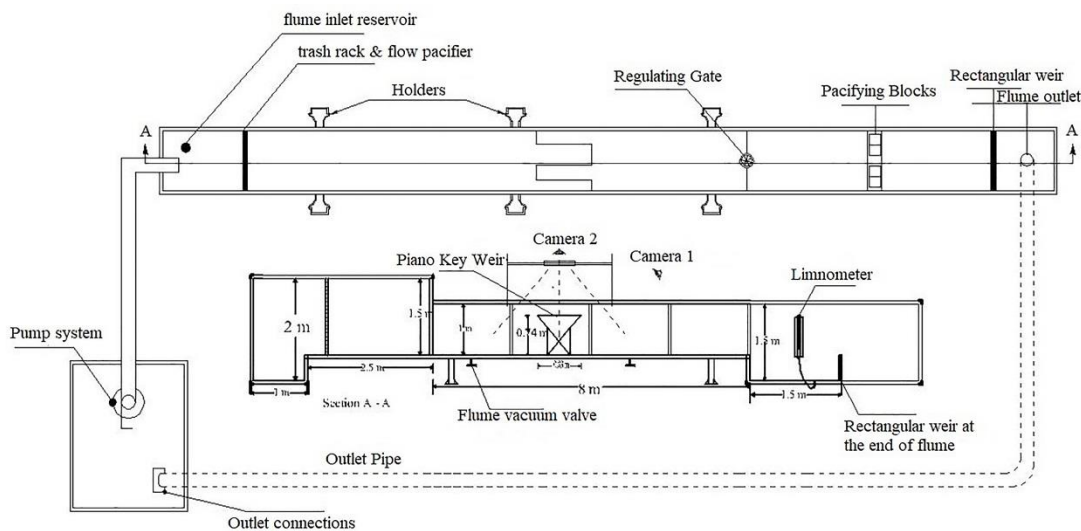


Fig. 1- Flume plan and section laboratory equipments
شکل ۱- پلان و مقطع فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

جدول ۱- ابعاد سرریز مورد استفاده در این تحقیق (سانتی‌متر)

Table 1- The dimensions of used weir in this research (centimeter)

P	$B_i=B_o$	B_d	B	T_s	W_u	W_o	W_i
74	19.5	44.3	83.3	1.00	55.2	21.4	31.8

تحلیل ابعادی

به منظور نیل به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای مختلفی که بر استهلاک انرژی این سرریز مؤثر می باشد، اقدام شد. پارامترهای مؤثر در این تحقیق به قرار زیر است:

$$F(W_i, W_o, W_u, W, B, B_i, B_o, Q, H_r, H_s, y_c, H, \sigma, \rho, \mu, P, L, L_o, H_b, D, g, \frac{\Delta E}{E_0})=0 \quad (5)$$

در این رابطه W_i : عرض کلید ورودی، W_o : عرض کلید خروجی، W_u : عرض یک سیکل، W : عرض فلوام آزمایشگاهی، B : طول بالادست تا پایین دست سرریز، B_i : طول شیروانی پایین دست، B_o : طول شیروانی بالادست، Q : دبی جریان، H_r : عمق آب پای سرریز، H_s : ارتفاع تیغه آب روی نوک سرریز، y_c : عمق بحرانی جریان، H : ارتفاع تیغه آب روی سرریز، σ : کشش سطحی آب، ρ : جرم واحد حجم آب، μ : لزوجت دینامیکی آب، P : ارتفاع سرریز، L : طول تاج سرریز، L_o : طول کلید خروجی سرریز، H_b : ارتفاع موانع، D : فاصله نصب اولین ردیف موانع از ابتدای کلید خروجی، g : شتاب ثقل و $\frac{\Delta E}{E_0}$ پارامتر استهلاک انرژی جریان می باشد. با استفاده از تئوری Π باکینگهام، رابطه (۶) می تواند به صورت اعداد بدون بعد زیر توضیح داده شود:

$$f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{H_b}{H_r}, \frac{H_b}{H}, \frac{y_c}{H}, \frac{\Delta E}{E_0}, We, Re\right)=0 \quad (6)$$

با توجه به این که برای انجام آزمایش های این تحقیق از مدل سرریز کلیدپیانویی بهینه هیدرولیکی با ابعاد هندسی ثابت استفاده شده است، پارامترهای $W_i, W_o, W_u, W, B, B_o, B_i$ ثابت بوده و

حذف می گردند. همچنین پارامتر $Re = \frac{\rho v l}{\mu}$ عدد رینولدز جریان می باشد. با توجه به اینکه حداقل عدد رینولدز آزمایش های تحقیق حاضر برابر با ۵۴۳۰ بوده و بیش از ۲۰۰۰ می باشد، بنابراین در آزمایش های این تحقیق از عدد رینولدز صرف نظر شد. همچنین با توجه به این که حداکثر عمق اندازه گیری شده جریان روی سرریز برابر با ۷۰ میلی متر بوده و کمتر از ۷۵ میلی متر می باشد، نیروی کشش سطحی و در نتیجه عدد وبر در آزمایش های این تحقیق مؤثر می باشد (Shafai Bejestan, 2011). لذا استهلاک نسبی انرژی جریان می تواند به صورت رابطه (۷) بیان شود:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{H_t}{P}, \frac{H_s}{P}, \frac{H_s}{D}, \frac{H_b}{H_r}, \frac{H_b}{H}, \frac{y_c}{H}, We\right)=0 \quad (7)$$

دامنه ی پارامترهای مؤثر در تحقیق حاضر در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

آزمایش های مورد نظر برای نه دبی از ۵ تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه بر روی مدل های ساخته شده انجام گرفت و با اندازه گیری عمق آب بالادست، روی تاج و پای سرریز و محاسبه ی سرعت متوسط با استفاده از رابطه ی پیوستگی، میزان استهلاک انرژی جریان محاسبه گردید. آزمایش های برنامه ریزی شده تحقیق حاضر در پنج سری خلاصه می شود که یک سری از آنها مدل بدون مانع می باشد و سری های دیگر بیانگر ارتفاع و فاصله ی موانع در هر آزمایش می باشد (شکل ۳).

جدول ۲- دامنه تغییرات پارامترهای مؤثر در این تحقیق

Table 2- The range of variation of the effective parameters in this research

Parameters	Dimension	Range
Q	Lit/s	5 – 135
H_b/H_r	-	0.2 – 1.17
H_t/P	-	0.013 – 0.117
H_s/P	-	0.019 – 0.12
H_s/D	-	0.056 – 0.35
H_s/H_b	-	0.11 – 0.74
We	-	29.39 – 3880.6
Y_c/H	-	1.46 – 1.78
$\Delta E/E_0$	-	0.51 – 0.86

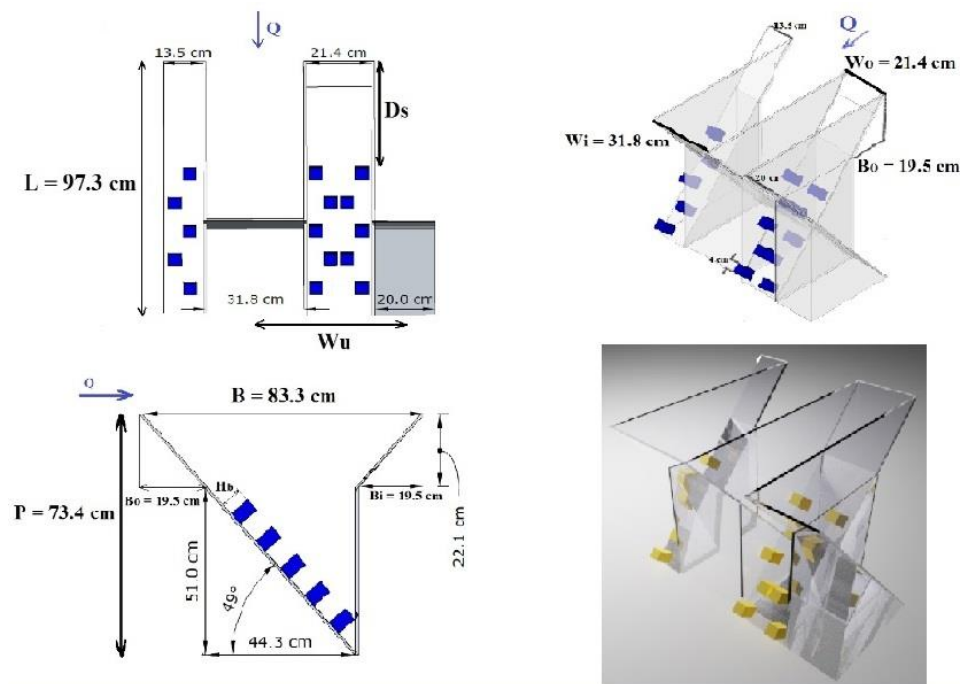


Fig. 2- The 3D weir view in the present research

شکل ۲- نمای سه بعدی سرریز مورد استفاده در آزمایش‌های تحقیق حاضر



(ب) (الف)

(الف) (ب)

Fig. 3- The baffles placement on outlet key of piano key weir, a) The model with baffle height 8 cm and distance of $\frac{1}{4}$ and b) The model with baffle height of 12 cm and distance of $\frac{1}{4}$ during the experiment - Discharge of 5 lit/s.

شکل ۳- نحوه قرارگیری موانع در کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی، (الف) مدل با ارتفاع موانع ۸ سانتی‌متر و فاصله‌ی $\frac{1}{4}$ و (ب) مدل با ارتفاع موانع ۱۲ سانتی‌متر و فاصله $\frac{1}{4}$ حین انجام آزمایش - دی ۵ لیتر بر ثانیه

بدون مانع و ۳۶ آزمایش برای مدل‌های مانع‌دار انجام گردید و با توجه به این اندازه‌گیری‌ها تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی موانع بر روی میزان استهلاک نسبی انرژی جریان بررسی گردید (شکل‌های ۴ و ۵).

در این تحقیق هدف اصلی بررسی اثر ارتفاع و فاصله‌ی نصب اولین ردیف موانع از ابتدای کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی بر میزان استهلاک انرژی می‌باشد. در مجموع تعداد ۹ آزمایش برای مدل

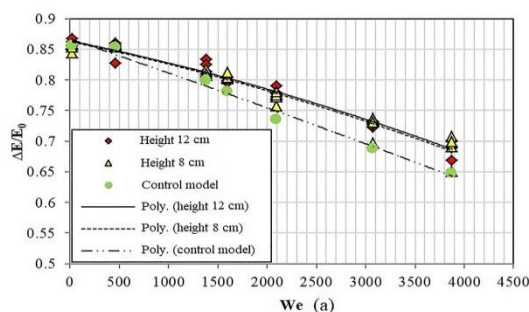


Fig. 4- Variation of flow dissipating energy against Weber's number for different baffle's height compared to control model

شکل ۴- تغییرات استهلاک انرژی جریان در برابر عدد وبر برای ارتفاع متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد

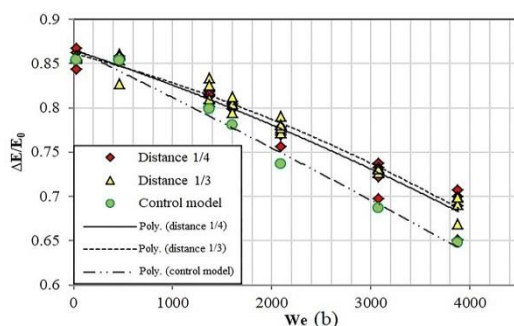


Fig 5- Variation of flow dissipating energy against Weber's number for different baffle's distances compared to control model

شکل ۵- تغییرات استهلاک انرژی جریان در برابر عدد وبر برای فاصله‌ی متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد

می‌شود، در نتیجه ناحیه‌ی کم‌فشار تشکیل شده در پشت مانع بزرگتر می‌شود که نتیجه‌ی آن افزایش نیروی درگ فشاری است. از طرفی نیروی درگ اصطکاکی با افزایش سطح مانع بزرگتر می‌شود. بنابراین با افزایش ارتفاع موانع، نیروی درگ کل وارد بر جریان بیشتر شده و در نتیجه مقدار افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که میزان افت نسبی انرژی در مدل شاهد از حدود ۰/۸۵ به حدود ۰/۶۴، در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر از حدود ۰/۸۶ به حدود ۰/۶۶ و در مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر از حدود ۰/۸۵ به حدود ۰/۶۴ کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد وبر از میزان بسیار کم (۳۹/۳۹) تا میزان بسیار زیاد (۳۸۸۰/۶)، میزان استهلاک انرژی در مدل شاهد ۲۴/۷ درصد، در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر ۲۳/۲۵ درصد و در مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر ۲۴/۷ درصد می‌باشد. لازم به توضیح است که در مقادیر پایین عدد وبر که ناشی از عمق آب کم و دبی کم است، به دلیل این‌که انرژی جریان چندان بالا نیست و از طرفی هد آب روی سرریز بسیار کم است، اثر کشش سطحی و هم‌چنین شرایط تداخل، باعث تلفات زیاد انرژی به صورت نسبی می‌گردد. در این حالت، اختلاف انرژی بالادست و پایین‌دست، تنها بر اثر ارتفاع سرریز می‌باشد و جریان عبوری چندان سرعتی را طی نمی‌نماید. به همین دلیل، میزان استهلاک نسبی انرژی، زیاد

در شکل (۴) تغییرات استهلاک انرژی در برابر عدد وبر برای ارتفاع متفاوت موانع رسم شده است. با توجه به این شکل با افزایش مقدار عدد وبر مقدار استهلاک نسبی انرژی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دبی، عمق جریان و در نتیجه عدد وبر افزایش می‌یابد و اثر اصطکاکی مرزها بر جریان کم می‌شود. شایان ذکر است که یکی از عوامل استهلاک انرژی در کلید خروجی سرریز کلیدپیانویی بدون مانع، طول مسیر طی شده توسط جریان است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که میزان استهلاک انرژی در مدل‌های با مانع بیشتر از مدل شاهد می‌باشد. به عبارت دیگر در عدد وبر یکسان، وجود موانع در کلید خروجی می‌تواند بر شدت استهلاک انرژی در سرریز کلیدپیانویی بیفزاید. هم‌چنین مشاهده می‌شود که میزان استهلاک انرژی در مدل با ارتفاع مانع ۱۲ سانتی‌متر بیشتر از مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین در دبی یکسان، تفاوت در ارتفاع موانع، باعث تفاوت در میزان استهلاک انرژی می‌شود. علت این‌که با افزایش ارتفاع موانع، افت انرژی افزایش می‌یابد، این است که در طول کلید خروجی با مانع در جهت جریان هم نیروی درگ اصطکاکی و هم نیروی درگ فشاری از سیال بر موانع اثر می‌کنند. با شرایط هیدرولیکی یکسان، هر چقدر ارتفاع موانع بزرگتر باشد، به دلیل این‌که سطحی از ذرات که در برابر جریان قرار می‌گیرد، بزرگتر

پارامتر بی بعد y_c/H ، به ترتیب برای ارتفاع متفاوت موانع و برای فاصله‌ی متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد رسم شده است. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌گردد که به ازای مقادیر پایین دبی (۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه)، با افزایش این نسبت، میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود. در این حالت با دور شدن جریان از حالت بحرانی، مقدار عمق جریان H از مقدار عمق بحرانی Y_c فاصله می‌گیرد. در این حالت میزان کاهش استهلاک انرژی برای مدل شاهد، $8/23$ درصد، برای مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $6/97$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $4/7$ درصد می‌باشد. پس از آن به ازای دبی در محدوده $135-50$ لیتر بر ثانیه، مقدار y_c/H کاهش یافته و از مقدار $1/78$ به مقدار $1/55$ می‌رسد. با کاهش این نسبت، مقدار استهلاک انرژی نیز کاهش می‌یابد. در این حالت نیز میزان کاهش استهلاک انرژی برای مدل شاهد، $34/61$ درصد، برای مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $26/25$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $28/39$ درصد می‌باشد. با مشاهده‌ی نمودار و این مقادیر، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر تفاوت زیادی با مدل با ارتفاع مانع ۸ سانتی‌متر ندارد. علاوه بر این میزان استهلاک انرژی به ازای دبی $135-50$ لیتر بر ثانیه، در ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $31/39$ درصد و در ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $31/76$ درصد می‌باشد. با افزایش نسبت y_c/H در دبی بالا، مقدار افزایش استهلاک انرژی برای مدل با ارتفاع مانع ۱۲ سانتی‌متر و همچنین مدل با ارتفاع مانع ۸ سانتی‌متر نسبت به مدل شاهد $19/6$ درصد می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی این است که در عمق بحرانی و عمق آب یکسان روی تاج سرریز، موانع نصب شده، میزان استهلاک انرژی را نسبت به مدل بدون مانع افزایش داده و از طرفی پارامتر ارتفاع موانع، میزان استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل شاهد ایجاد می‌کند. در حالیکه در دبی پایین در مقادیر پایین نسبت y_c/H ، میزان استهلاک انرژی برای مدل‌های مانع‌دار نسبت به مدل شاهد، تفاوت قابل توجهی ندارد.

پیش‌بینی می‌شود و این در حالی است که با افزایش دبی، اثر کشش سطحی کاسته‌شده و شرایط واقعی‌تری نسبت به شرایط میدانی به وجود می‌آید و این باعث می‌شود که میزان برآورد استهلاک انرژی واقعی‌تر باشد. در شکل (۵) تغییرات استهلاک انرژی در برابر دبی برای فاصله‌ی متفاوت موانع رسم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که میزان استهلاک انرژی در مدل‌های با مانع بیشتر از مدل شاهد می‌باشد. همچنین میزان استهلاک انرژی در مدل با فاصله $1/3$ نسبت به مدل با فاصله $1/4$ تفاوت معنی‌داری ندارد. بنابراین در عدد و بر یکسان، تفاوت در فاصله‌ی موانع از ابتدای کلید خروجی، تأثیری در میزان استهلاک انرژی ندارد. همچنین با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که میزان استهلاک نسبی انرژی برای فاصله $1/4$ از حدود $0/86$ به حدود $0/65$ و برای فاصله‌ی $1/3$ از حدود $0/86$ به حدود $0/66$ کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عدد و بر از مقدار $29/39$ تا $3880/6$ ، میزان استهلاک انرژی برای فاصله $1/4$ ، $24/42$ درصد و برای فاصله‌ی $1/3$ ، $23/25$ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش عدد و بر در دبی بالا، میزان افزایش استهلاک انرژی برای فاصله‌ی $1/3$ نسبت به مدل شاهد، حدود ۱۰ درصد می‌باشد ولی فاصله‌ی $1/4$ نسبت به مدل شاهد تفاوت معنی‌داری ندارد. بعبارتی مدل با فاصله‌ی $1/3$ ، انرژی جریان را بیشتر مستهلک می‌کند. در فاصله $1/4$ طول قطعه‌ی صاف (بدون مانع) کمتر بوده و در نتیجه جدایی جریان از سطح کلید خروجی بیشتر است. این مسئله باعث کاهش نیروی برشی و در نتیجه کاهش افت انرژی نسبی می‌گردد. در حالی که در فاصله‌ی $1/3$ به دلیل طول بیشتر کلید خروجی، سطح تماس جریان با کلید افزایش و منطقه جدایی کاهش یافته و این امر باعث می‌شود جریان فرصت بیشتری برای عبور از میان و روی موانع داشته باشد. با درگیری موانع بیشتر، افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. در شکل‌های (۶) و (۷)، تغییرات استهلاک انرژی در برابر

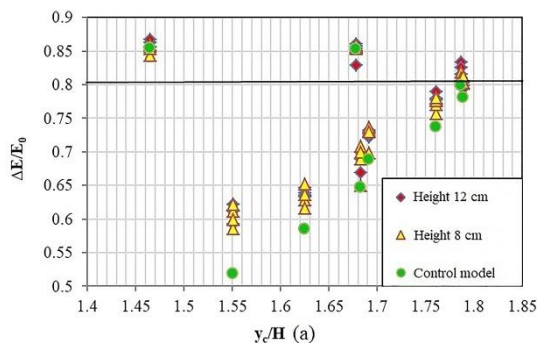


Fig. 6- Variation of flow dissipating energy against parameter y_c/H for different baffle's height compared to control model

شکل ۶- تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر y_c/H برای ارتفاع متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد

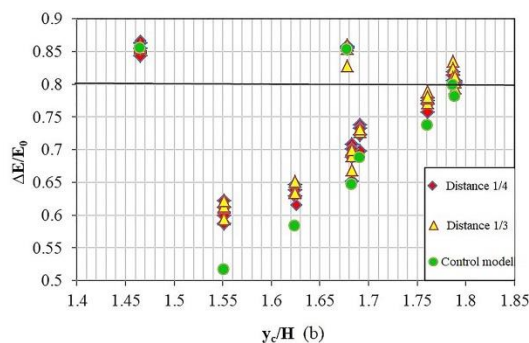


Fig. 7- Variation of flow dissipating energy against parameter y_c/H for different baffle's distances compared to control model

شکل ۷- تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر y_c/H برای فاصله متفاوت موانع نسبت به مدل شاهد

کلید خروجی، تأثیری در میزان استهلاک انرژی ندارد. علاوه بر این میزان استهلاک انرژی به ازای دبی ۵ تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه، در فاصله $\frac{1}{4}$ ، ۳۲/۵۵ درصد و در فاصله $\frac{1}{3}$ ، ۳۱/۳۹ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی در دبی بالا، میزان استهلاک انرژی در مدل‌های مانع‌دار نسبت به مدل بدون مانع بیشتر بوده و این نشان‌دهنده این است که در عمق بحرانی و عمق آب یکسان روی تاج سرریز، موانع نصب‌شده، میزان استهلاک انرژی را نسبت به مدل بدون مانع افزایش داده و از طرفی پارامتر فاصله موانع، میزان استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل شاهد ایجاد می‌کند. در شکل (۸)، تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر بی‌بعد H_s/H_b برای فاصله‌ی متفاوت موانع رسم شده است.

با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت H_s/H_b ، که ناشی از افزایش دبی است، میزان استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد که دلیل این امر در بخش‌های قبل توضیح داده شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در دبی و ارتفاع یکسان موانع، به دلایلی که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد، میزان افت انرژی نسبی در فاصله $\frac{1}{3}$ از فاصله $\frac{1}{4}$ بیشتر است. علاوه بر این با افزایش نسبت H_s/H_b در محدوده $0/48-0/11$ ، در بخش اول نمودار با شیب زیاد، مقدار کاهش استهلاک نسبی انرژی در مدل با فاصله $\frac{1}{4}$ ، ۲۴/۴۲ درصد و برای مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ ، ۲۲/۳۵ درصد می‌باشد. همچنین در محدوده $0/48-1/11$ ، شیب نمودار کمتر بوده و مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با فاصله $\frac{1}{4}$ ، ۱۰/۷۶ درصد و برای مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ ، ۱۰/۶ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، به ازای دبی در محدوده $5-135$ لیتر بر ثانیه میزان استهلاک انرژی در مدل با فاصله $\frac{1}{4}$ ، ۳۲/۵۵ درصد و در مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ ، ۳۰/۵۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین میزان استهلاک انرژی در مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ ، تفاوت قابل توجهی با مدل با فاصله $\frac{1}{4}$ ندارد.

با توجه به این که سرریز مورد استفاده در تحقیق حاضر از نوع سرریز کلیدپیانویی می‌باشد، طول تاج آن نسبت به سرریزهای خطی بسیار بیشتر از عرض فلوم بوده و به تبع آن عمق آب ایجادشده روی سرریز کاهش می‌یابد. در حالی که y_c در این جا با فرض سرریز خطی در عرض مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین عمق آب خطی را به ما نشان می‌دهد؛ ولی مقدار H مربوط به سرریز غیر خطی است. در واقع مقادیر بالای نسبت y_c/H به همین دلیل است. داده‌های استهلاک انرژی بالاتر از $0/8$ مربوط به محدوده دبی $50-135$ لیتر بر ثانیه می‌باشند. با افزایش نسبت y_c/H ، به طور کلی میزان استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که به ازای مقادیر پایین y_c/H در محدوده $1/46-1/78$ استهلاک انرژی جریان کاهش می‌یابد. ولی پس از آن با کاهش این پارامتر بی‌بعد از $1/78$ به $1/55$ (در محدوده دبی $50-135$ لیتر بر ثانیه) مقدار استهلاک انرژی نیز کاهش می‌یابد. روند خاص این نمودار به دلیل تغییرات روند پارامتر y_c/H (ابتدا افزایش و سپس کاهش) می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (۷)، مشاهده می‌گردد که به ازای مقادیر پایین دبی (۵ تا ۵۰ لیتر بر ثانیه)، با افزایش این نسبت، میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود. در این حالت میزان کاهش استهلاک انرژی برای مدل شاهد، ۸/۲۳ درصد، برای مدل با فاصله $\frac{1}{4}$ و فاصله $\frac{1}{3}$ نیز، ۶/۹۷ درصد می‌باشد. پس از آن به ازای دبی در محدوده $50-135$ لیتر بر ثانیه، مقدار y_c/H کاهش یافته و از مقدار $1/78$ به مقدار $1/55$ می‌رسد. با کاهش این نسبت، مقدار استهلاک انرژی نیز کاهش می‌یابد. در این حالت نیز میزان کاهش استهلاک انرژی برای مدل شاهد، ۳۴/۶۱ درصد، برای مدل با فاصله $\frac{1}{4}$ ، ۲۷/۵ درصد و برای مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ ، ۲۶/۲۵ درصد می‌باشد. با مشاهده نمودار و این مقادیر، میزان کاهش استهلاک انرژی در مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ ، با فاصله $\frac{1}{4}$ تفاوت قابل توجهی ندارد. بنابراین در نسبت y_c/H یکسان، تفاوت در فاصله‌ی اولین ردیف موانع از ابتدای

آن هم این است که در فاصله $\frac{1}{3}$ نسبت به $\frac{1}{4}$ چون طول کلید خروجی بدون مانع بیشتر است، اختلاف ارتفاع جریان خروجی بیشتر شده و این مسئله منجر به افزایش سرعت برخورد جریان به موانع شده، ناحیه‌ی جداشدگی تشکیل شده در پشت مانع بزرگتر شده و میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

در شکل‌های (۹) و (۱۰) مقدار تغییرات افت انرژی نسبی در برابر پارامتر بی‌بعد H_s/P برای دو ارتفاع متفاوت موانع در دو مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{4}$ رسم شده است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع موانع، در عمق آب یکسان، مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با فاصله $\frac{1}{3}$ کاهش می‌یابد؛ و دلیل

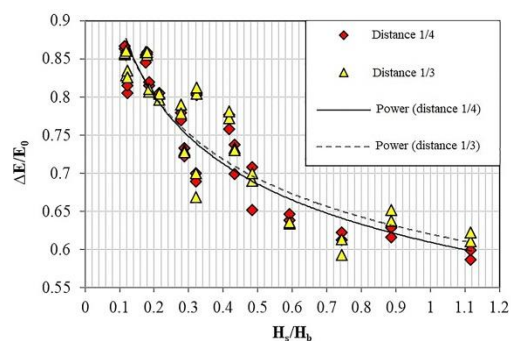


Fig. 8- Variation of flow dissipating energy against parameter H_s/H_b for different baffle's distances
 شکل ۸- تغییرات استهلاک انرژی در برابر پارامتر H_s/H_b برای فاصله‌ی متفاوت موانع

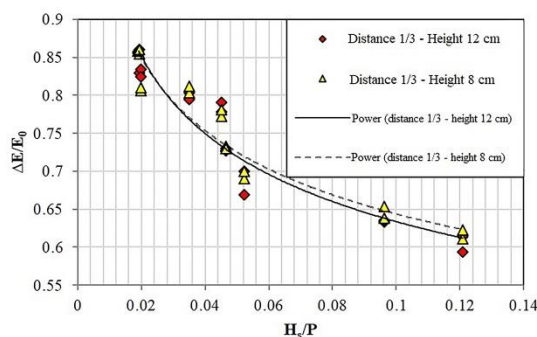


Fig. 9- Variation of flow dissipating energy against parameter H_s/P for different baffle's height in model with distance of $\frac{1}{3}$

شکل ۹- نمودار تغییرات افت انرژی نسبی در برابر پارامتر H_s/P برای ارتفاع متفاوت موانع در مدل با فاصله $\frac{1}{3}$

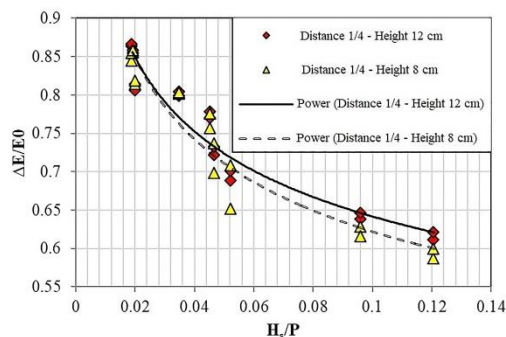


Fig. 10- Variation of flow dissipating energy against parameter H_s/P for different baffle's height in model with distance of $\frac{1}{4}$

شکل ۱۰- نمودار تغییرات افت انرژی نسبی در برابر پارامتر H_s/P برای ارتفاع متفاوت موانع در مدل با فاصله $\frac{1}{4}$

- در تمامی مدل‌ها، میزان استهلاک انرژی مدل‌های مانع‌دار بیشتر از مدل بدون مانع است. همچنین با افزایش دبی در مدل‌های مختلف مقدار استهلاک نسبی جریان کاهش می‌یابد. در دبی‌های کم به دلیل اینکه انرژی جریان چندان بالا نیست و از طرفی هد آب روی سرریز بسیار کم است، اثر کشش سطحی و همچنین شرایط تداخل، باعث تلفات زیاد انرژی به صورت نسبی می‌گردد. ولی با افزایش دبی، اثر کشش سطحی کاسته شده و شرایط واقعی‌تری نسبت به شرایط میدانی به وجود می‌آید و این باعث می‌شود که میزان برآورد استهلاک انرژی واقعی‌تر باشد.
 - در ارتفاع و فاصله متفاوت موانع، با افزایش دبی، اختلاف بین مقادیر استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.
 - پارامتر ارتفاع موانع تأثیر بیشتری را نسبت به پارامتر فاصله‌ی موانع بر میزان استهلاک انرژی جریان دارد.
 - تفاوت در فاصله‌ی نصب اولین ردیف موانع از ابتدای کلید خروجی، تفاوت معنی‌داری در میزان استهلاک نسبی انرژی جریان ایجاد نمی‌کند. ولی با افزایش فاصله نصب اولین ردیف موانع نسبت به مدل بدون مانع میزان استهلاک انرژی جریان افزایش می‌یابد.
 - میزان استهلاک انرژی در مدل با ارتفاع مانع ۱۲ سانتی‌متر اختلاف چندانی با مدل ۸ سانتی‌متری ندارد؛ ولی حدود ۱۰ درصد بیشتر از مدل بدون مانع می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش ارتفاع موانع نسبت به مدل شاهد تفاوت قابل توجهی در میزان استهلاک انرژی این نوع سرریز در این تحقیق وجود دارد. ولی میزان استهلاک انرژی در مدل با ارتفاع مانع ۱۲ سانتی‌متر نسبت به مدل با ارتفاع مانع ۸ سانتی‌متر تفاوت قابل توجهی ندارد.
 - با افزایش نسبت y/H ، میزان استهلاک نسبی جریان کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دبی ابتدا مقدار نسبت y/H از مقدار $1/46$ تا مقدار $1/78$ افزایش می‌یابد و با افزایش این نسبت، میزان استهلاک انرژی کاسته می‌شود. در این محدوده، مقدار استهلاک انرژی به دلیل تأثیر کشش سطحی و تداخل تیغه‌های جریان، واقعی نیست. پس از آن مقدار نسبت y/H کاهش یافته و در این حالت با کاهش این نسبت، میزان استهلاک انرژی جریان نیز کاهش می‌یابد.
- دلیل دیگر آن تشکیل جریان ریزشی در دبی‌های ۶۵-۱۳۵ لیتر بر ثانیه است، که در اولین ردیف نصب موانع در فاصله $1/3$ و ارتفاع مانع ۸ سانتی‌متر اتفاق افتاد و به افزایش بیشتر افت انرژی نسبی جریان منجر شد. همچنین با افزایش ارتفاع موانع، مقدار افت انرژی نسبی در مدل با فاصله‌ی $1/4$ به دلایلی که در بخش‌های قبل عنوان شد، افزایش می‌یابد. می‌توان گفت، با افزایش نسبت H_3/P ، در مدل‌های مختلف، که ناشی از افزایش دبی است، مقدار افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که با افزایش دبی و در نتیجه افزایش عمق جریان، از اثرات مانع بر مقاومت جریان کاسته شده و به دنبال آن مقدار افت انرژی نسبی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت H_3/P در محدوده‌ی $0.052-0.19$ ، در بخش اول نمودار با شیب زیاد، مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $20/93$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $23/53$ درصد کاهش می‌یابد. در محدوده‌ی $0.12-0.052$ ، شیب نمودار کمتر بوده و مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $10/29$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $10/77$ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت H_3/P در محدوده‌ی $0.052-0.19$ ، در بخش اول نمودار با شیب زیاد، مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $22/35$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، 20 درصد کاهش می‌یابد. همچنین در محدوده‌ی $0.12-0.052$ ، شیب نمودار کمتر بوده و مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $10/6$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $10/3$ درصد کاهش می‌یابد. می‌توان گفت، در نمودار شکل ۹ با افزایش نسبت H_3/P در محدوده‌ی $0.12-0.19$ ، در بخش اول نمودار با شیب زیاد، مقدار استهلاک نسبی انرژی در مدل با فاصله‌ی $1/4$ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $29/07$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $31/76$ درصد، برای مدل با فاصله‌ی $1/3$ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، $30/58$ درصد و برای مدل با ارتفاع ۸ سانتی‌متر، $28/23$ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت مدل با فاصله‌ی $1/4$ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، به میزان $2/7$ درصد نسبت به ارتفاع ۸ سانتی‌متر و مدل با فاصله‌ی $1/3$ و ارتفاع ۸ سانتی‌متر، به میزان $2/35$ درصد نسبت به ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر انرژی جریان را بیشتر مستهلک می‌کند.

نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر ارتفاع و فاصله‌ی متفاوت موانع در سرریز کلیدپایویی مستطیلی با کلید خروجی مانع‌دار بود که به‌طور خلاصه نتایج کلی گرفته شده از این تحقیق عبارتند از:

تشکر و قدردانی

بدینوسیله مؤلفین مقاله از مؤسسه تحقیقات آب تهران و به‌ویژه از زحمات جناب آقایان مهندس رضا روشن و مهندس سهند اکبریان به دلیل در اختیار قرار دادن تجهیزات و فلوام آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

- 1- Abrishami, J. and Hoseini, M., 2011. *Open – Channel Hydraulics*. Astan Quds Razavi Publishing House, Mashhad Iran. (In persian).
- 2- Afzalian, A. and Ahadian, J., 2014. Piano key weirs with sloped parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(2), pp.91-102. (In Persian).
- 3- Akbarian, A., 2009. *Design of hydraulic structures*. Amidi Publishing House Iran. (In persian).
- 4- Barani, Gh. and Abbasi parvin, Y., 2009. *Energy dissipating in hydraulic structures (dissipating structure field study)*. University Jahad Publishing House, Amirkabir Industrial Unit. Iran. (In persian).
- 5- Chen, C. L., 1992. Momentum and energy coefficient based on power low velocity profile. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11), pp.548-571.
- 6- Erpicum, S. and Machiels, O., 2011. Energy dissipation on a stepped spillway downstream of a Piano Key Weirs – Experimental study, Labyrinth and piano key weirs-PKW 2011, *Taylor & francis Group, London*, pp.105-111.
- 7- Erpicum, S., Machiels, O., Dewals, B.J., Piroton, M., Archambeau, P., 2012. Numerical and Physical hydraulic modeling of Piano Key Weirs. *HECE Research Group, ArGenCo Department*, University of Leige. Wallonia. Belgium.
- 8- Javaheri, A. and Kabiri-Samani, A. R., 2011. Flow hydraulic on piano key weirs. *M. Sc. Thesis. Faculty of Civil Engineering. Esfahan University of Technology*. (in Persian)
- 9- Katourani, S. and Kashefipour, S. M., 2012. Effect of the geometric characteristics of baffle on hydraulic flow conditions in baffled apron drop. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(2), pp.51-59. (In Persian).
- 10-Lempèrière F. and Ouamane A., 2003. The piano key Weir: a new cost-effective solution for spillways, *International Journal of Hydropower and Dams*, 10 (5), pp.144-149.
- 11-Machiels, O., 2012. Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs, *Phd Dissertation, Faculty of Applied Science*, University of Liege. Wallonia. Belgium.
- 12-Peterka, A., 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, *United States Department of the Interior*. USBR. NO. 25.
- 13-Shafai Bejestan, M., 2011. *Basic concepts and application of physical-hydraulic modeling*. Shahid Chamran University of Ahvaz Publishing House. Ahvaz. Iran. (In persian).
- 14-Yarmohammadi, B., 2015. Effect of parapet wall on the inlet submergence in piano key weirs. *M. Sc. Thesis. Faculty of Water Engineering. Shahid Chamran University of Ahvaz. Ahvaz, Iran*. (in Persian).