

بررسی آزمایشگاهی اثر ضخامت تیغه‌ها در سازه ترکیبی سرریز اوجی - تخلیه تحتانی بر اتلاف انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست

سهیل علوانی^{۱*}

سید محمود کاشفی پور^۲

محمد محمودیان شوشتری^۳

چکیده

در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر نصب تیغه‌ها در مدل ترکیبی سرریز اوجی با تخلیه تحتانی بر اتلاف انرژی سازه و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین دست پرداخته شده است. برای دستیابی به اهداف این تحقیق، یک مدل فیزیکی از سرریز اوجی با تخلیه تحتانی ساخته شد که در آن جت خروجی از تخلیه تحتانی تحت زاویه ۳۰ درجه با جریان روگذر از سرریز تداخل پیدا می‌کرد. نصب تیغه‌ها در بالادست شکاف تخلیه تحتانی منجر به جداشدگی جریان و آشفتگی بیشتر در روی سرریز شده و در نتیجه موجب اتلاف انرژی بیشتری در روی سازه می‌شود. در این تحقیق دو ضخامت برای تیغه‌ها مورد استفاده قرار گرفت ($t_b/y_{1d} = 0/14$, $0/07$) و نتایج نشان می‌دهد که تیغه‌ها با ضخامت نسبی بیشتر ($t_b/y_{1d} = 0/14$) در اتلاف انرژی سازه و کاهش مقادیر مؤلفه‌های پرش هیدرولیکی پایین دست مؤثرتر هستند. مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که به طور متوسط اتلاف انرژی روی سرریز، کاهش طول و عمق نسبی ثانویه پرش هیدرولیکی به ترتیب برابر $47/6\%$ ، 40% و $23/2\%$ درصد است. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، استفاده از این سازه برای ساخت حوضچه‌های آرامش اقتصادی‌تر در پایین دست سدهای کوچک و تندآبراهه‌ها توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

استهلاک انرژی، تیغه‌های مسیر جریان، جداشدگی جریان، جریان ترکیبی، تندآبراه.

*۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، soheil_alvani67@yahoo.com

۲. استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳. استاد بازنشسته گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

مقدمه

پرش هیدرولیکی یکی از متداول ترین روش ها جهت استهلاک انرژی در پایین دست سازه های هیدرولیکی است. معمولاً در انتهای سازه هایی مانند سرریز سدها، تندآب ها و دریچه ها، به دلیل انرژی زیاد جریان، نیاز به سازه هایی برای استهلاک انرژی و کاهش سرعت جریان به منظور جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین دست است. یکی از رایج ترین سازه های مستهلک کننده انرژی، حوضچه آرامش است که در آن با شکل گیری پرش هیدرولیکی، انرژی جریان مستهلک می گردد. ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی به خصوص طول و عمق ثانویه پرش بستگی دارد. از آنجایی که بهینه کردن سازه ها، از نظر اقتصادی و پایداری از اهمیت بالایی برخوردار است، لزوم تحقیقات گسترده در زمینه کاهش ابعاد حوضچه های آرامش ضرورت یافته است. بدیهی است هرچه افت انرژی آب در طول سرریز بیشتر باشد، جریان ورودی به حوضچه آرامش انرژی کمتری دارد که در پی آن ابعاد حوضچه آرامش به تناسب کاهش انرژی، کاهش خواهد یافت. مطالعات صورت گرفته در دو زمینه، جریان ترکیبی^۱ روگذر و زیرگذر از سرریزها و اتلاف انرژی جریان و بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی^۲ در حوضچه های آرامش صورت گرفته است. جریان ترکیبی روگذر و زیرگذر از سرریز مدلی است که در دهه های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است ولی تحقیقات صورت گرفته در این بخش محدود است. نگم^۳ و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی مؤلفه های جریان ترکیبی بر روی سرریزها و دریچه های لبه تیز پرداختند. محققین دیگری مانند سامانی و مظاهری^۴ (۲۰۰۷ و ۲۰۰۹)، السعدی^۵ (۲۰۱۳) و آلتان ساکاریا و کوکپینار^۶ (۲۰۱۳) توسط روش های مختلف و اشکال مختلف سرریز- دریچه به بررسی ضریب دبی جریان ترکیبی روگذر و زیرگذر از سرریز پرداختند. ایشان روابطی جهت محاسبه دبی- اشل جریان ترکیبی به دست آوردند که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهند. قره گزلو و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی اثر سرریز بر دبی دریچه در مدل ترکیبی

سرریز- دریچه استوانه ای پرداختند. در بخش دیگر مطالعات که به مشخصات پرش هیدرولیکی می پردازد، پاگلیارا^۷ و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی بر روی بلوک رمپ ها در حالت های مختلف استغراق پرداختند. توننده جانی و کاشفی پور (۱۳۹۱) به بررسی افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه سرریز اوجی پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که تلاقی جت های آب با زاویه ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش طول پرش دارد. جیان هوا^۸ و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان توسط سازه شکافدار مستهلک کننده انرژی^۹ پرداختند، نتایج آن ها نشان داد که زاویه تنگ شدگی یک پارامتر مهم و تأثیرگذار بر مشخصات هیدرولیکی جریان است. جیان هوا و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی استهلاک انرژی جریان توسط سازه شکافدار چندگانه مستهلک کننده انرژی^{۱۰} پرداختند و در این سازه با جداسازی جت های جریان و اختلاط بیشتر و سطح تماس بیشتر با هوا به استهلاک انرژی بیشتری در مقایسه با مدل (STED) دست یافتند. گوپتا^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی تحت دو مؤلفه عدد رینولدز و عدد فرود پرداختند. صادقی عسگری و موسوی جهرمی (۱۳۹۳) به بررسی اثر دفלקتور در پرتاب کننده جامی سرریز اوجی بر طول پرش هیدرولیکی و تلفات انرژی پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد استفاده از دفלקتور با زاویه ۲۲ درجه و طول ۶ سانتی متر نسبت به سایر مدل ها نقش بیشتری در کاهش طول پرش دارد. شریف و رستمی راوری^{۱۲} (۲۰۱۴) به بررسی آزمایشگاهی و عددی استهلاک انرژی توسط جداسازی جریان در جام های مختلف سرریز اوجی پرداختند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که استفاده از جام دندانه دار با زاویه لبه کمتر در استهلاک انرژی جریان کارا تر است. صادقی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی تأثیر شکل دیواره های تبدیل های واگرا بر خصوصیات پرش هیدرولیکی پرداختند. اشکو و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی اثر تمایل بلوک ها بر مشخصات پرش

⁸ Jian-hua

⁹ Silt-type energy dissipater (STED)

¹⁰ Multiple silt-type energy dissipater (M-STED)

¹¹ Gupta

¹² Sharif & Rostami Ravori

¹ Simultaneous Flow

² Hydraulic Jump Characteristics

³ Negm

⁴ Samani & Mazaheri

⁵ AL-Saadi

⁶ Altan Sakarya & Kokpinar

⁷ Pagliara

تحتانی و نیز ناشی از تداخل جریان عبوری از روی سرریز با تیغه‌های واقع در بالادست شکاف تخلیه تحتانی، آنالیز ابعادی به روش نظریه π باکینگهام صورت گرفت که پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$f(Q, V_1, y_1, y_2, L_j, L_r, hf_1, Q_r, y_{1d}, t_b, g, \mu, \sigma, \rho) = 0 \quad (1)$$

با استفاده از نظریه π باکینگهام عوامل فوق به گروه‌های بی بعدی تبدیل شدند که به‌طور خلاصه در رابطه (۲) آمده‌اند:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{hf_1}{E_0}, Q_r, \frac{t_b}{y_{1d}}, Fr_1, We_1, Re_1\right) = 0 \quad (2)$$

در روابط فوق Q = دبی کل جریان، V_1 = سرعت جریان در پای سرریز قبل از پرش، y_1 = عمق جریان قبل از پرش، y_2 = عمق جریان پس از پرش، L_j = طول پرش هیدرولیکی، L_r = طول غلتاب‌ها، hf_1 = افت انرژی که برابر $(E_0 - E_1)$ است، E_0 = انرژی اولیه در بالادست سرریز، E_1 = انرژی جریان در پای سرریز قبل از پرش هیدرولیکی و $\frac{hf_1}{E_0}$ = افت انرژی نسبی که روی سازه (سرریز و متعلقات) اتفاق می‌افتد، Q_r = دبی نسبی تخلیه تحتانی به دبی کل، y_{1d} = عمق اولیه جریان تحت دبی طراحی، t_b = ضخامت تیغه‌ها، g = شتاب ثقل، μ = لزجت دینامیکی، σ = کشش سطحی، ρ = جرم واحد حجم سیال، Fr_1 = عدد بی بعد فروود در پای سرریز، We_1 = عدد بی بعد وبر در پای سرریز و Re_1 = عدد بی بعد فروود در پای سرریز. عدد وبر^۲ نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی است و معمولاً این پارامتر بی بعد برای جریان روگذر از سرریز هنگامی که عمق جریان از حدی کوچک‌تر شود اهمیت می‌یابد (باس، ۱۹۸۹)^۳. به علت اینکه در جریان ایجاد شده در پای سرریز نیروی اینرسی نسبت به نیروی کشش سطحی، غالب است می‌توان از عدد وبر صرف‌نظر نمود. همچنین به علت اینکه جریان ایجاد شده در پای سرریز در اثر جریان ترکیبی ناشی از تخلیه تحتانی و نیز ناشی از برخورد جریان روگذر با تیغه‌ها، جریانی آشفته و متلاطم است و عدد رینولدز آن در مجموع آزمایش‌های این تحقیق $173800 < Re_1 < 64700$ است، اثر نیروهای لزجی نسبت به نیروهای اینرسی خیلی کم بوده و تأثیری در حرکت جریان ندارد (چاو، ۱۹۸۸)^۴، لذا از عدد بی بعد رینولدز^۵ نیز صرف‌نظر شده است. با صرف‌نظر

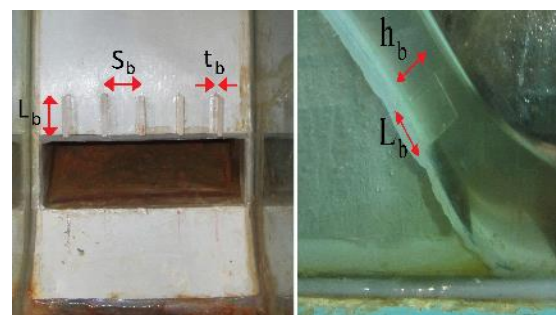
هیدرولیکی در حوضچه آرامش تیپ سه اداره عمران ایالت متحده^۱ پرداختند.

از آنجایی که سرریز اوجی به دلیل راندمان بالای تخلیه از جمله پرکاربردترین سرریزها در طراحی سازه‌های هیدرولیکی است و با توجه به اینکه در اکثر سدها تخلیه تحتانی موجود است، می‌توان با ترکیب این دو ساختار و ایجاد یک سازه ترکیبی به اقتصادی‌تر کردن ابعاد حوضچه‌های آرامش در اثر تداخل جریان روگذر از سرریز و زیرگذر از تخلیه تحتانی دست یافت. لذا در این تحقیق با استفاده از تیغه‌هایی به موازات مسیر جریان و روی بدنه سرریز اوجی در بالادست شکاف تخلیه تحتانی در سازه ترکیبی سرریز اوجی- تخلیه تحتانی و ایجاد آشفته‌گی در پای سرریز به بررسی اتلاف انرژی سازه و مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

با الگوبرداری از USBR در انتخاب ابعاد بلوک‌ها، مؤلفه‌های ارتفاع تیغه‌ها، طول تیغه‌ها و فاصله تیغه‌ها از یکدیگر برابر با ارتفاع عمق اولیه جریان در پای سرریز (y_1) تحت دبی طراحی (Q_d) در نظر گرفته شد ($h_b = L_b = S_b = y_{1design}$) (شکل ۱). لذا پارامتر y_{1d} در رابطه (۱) معرف هر سه مؤلفه فوق است.



شکل (۱): ابعاد هندسی تیغه‌ها (نما از روبرو و کنار)

جهت تعیین پارامترهای مهم و مؤثر در اتلاف انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی ناشی از تداخل جریان ترکیبی عبوری از روی سرریز اوجی و جریان خروجی از شکاف تخلیه

^۴ Chow (1988)

^۵ Reynolds Number (Re)

^۱ U.S. Bureau of Reclamation (USBR)

^۲ Weber Number (We)

^۳ BOS (1989)

مدل آزمایشگاهی

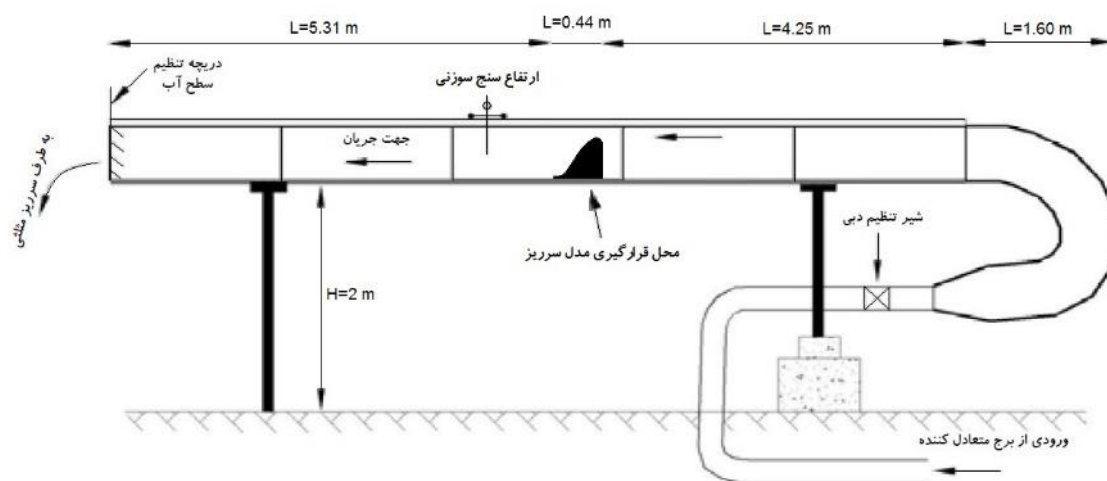
در جهت رسیدن به اهداف این تحقیق، آزمایش‌ها در فلومی با طول ۱۱/۶۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۸ سانتی‌متر با قابلیت تغییر شیب با جنس کف فلزی و دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (شکل ۳). شیب کف فلوم در تمامی آزمایش‌ها در حالت صفر درجه و به صورت کاملاً افقی قرار داشت.

از اعداد بی بعد رینولدز و وبر و با اعمال تغییراتی، رابطه (۲) به روابط (۳) و (۴) تبدیل شده است.

$$\frac{hf_1}{E_0} = f_1 \left(Q_r, \frac{t_b}{y_{1d}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{L_j}{y_2}, \frac{L_r}{y_2}, \frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Q_r, \frac{t_b}{y_{1d}}, Fr_1 \right) \quad (4)$$

از رابطه (۳) نتیجه می‌شود که اتلاف انرژی روی سرریز در این سازه ترکیبی، تابع دبی نسبی تخلیه تحتانی و ضخامت نسبی تیغه‌ها است. مشخصات پرش هیدرولیکی پایین‌دست نیز بر طبق رابطه (۴)، تابع دبی نسبی تخلیه تحتانی، ضخامت نسبی تیغه‌ها و عدد فرود قبل از پرش است.



شکل (۲): شمای مجموعه آزمایشگاهی، فلوم و جانمایی محل سرریز مورد استفاده



شکل (۳): مجموعه آزمایشگاهی و فلوم ۲۵ سانتی‌متری

USBR و بر اساس مشخصات فلوم و دبی طرح ۳۰ لیتر بر ثانیه طراحی شدند (اداره عمران ایالت متحده، ۱۹۸۷)^۱. درنهایت ارتفاع سرریز برابر ۲۹/۷ سانتی‌متر تعیین شد.

مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، سرریز اوجی استاندارد به‌عنوان مدل آزمایش‌های شاهد (شکل ۴)، مدل ترکیبی سرریز اوجی-تخلیه تحتانی (شکل ۵) و نیز مدل تخلیه دار با تیغه‌های بالادست (شکل ۱) است که به روش استاندارد



شکل (۵): پرش هیدرولیکی در مدل سرریز اوجی تخلیه دار

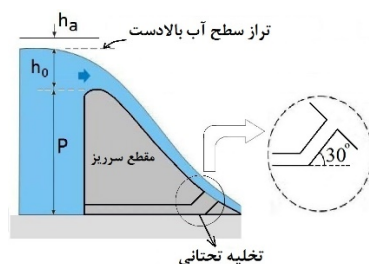


شکل (۴): پرش هیدرولیکی در مدل سرریز اوجی استاندارد

سرریز ایجاد شده و آب تحت تأثیر هد بالادست از این روزنه تحتانی تخلیه شود. به دلیل عملکرد بهتر تخلیه تحتانی تحت زاویه ۳۰ درجه در اتلاف انرژی جریان نسبت به سایر زوایای موردبررسی (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) (علوانی، ۱۳۹۵)، سازه خروجی از جنس پلکسی گلاس (شکل ۶) با زاویه ثابت طوری طراحی گردید که جریان خروجی از تخلیه تحتانی را تحت زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق با جریان عبوری از روی سرریز تلاقی دهد (شکل ۷). پس از نصب مدل تخلیه دار، سازه خروجی در آن نصب و آب‌بندی شد.



شکل (۶): سازه خروجی تخلیه تحتانی با زاویه ۳۰ درجه



شکل (۷): مدل ترکیبی سرریز اوجی تخلیه دار با زاویه تحتانی ۳۰ درجه

پس از انجام آزمایش‌های مذکور، آزمایش بر روی مدل تخلیه دار با تیغه‌های بالادست برای تعیین مشخصات پرش انجام شد. بر اساس نکته‌ای که در قسمت آنالیز ابعادی برای انتخاب

محل ابتدای پرش توسط دریچه خروجی پایین‌دست با تغییرات عمق پایاب به‌گونه‌ای تنظیم می‌شد که پرش به‌صورت آزاد در پای سرریز رخ دهد. محل انتهایی پرش نیز درست بعد از غلتاب‌ها^۱ که سطح آب صاف و افقی می‌شد به‌عنوان انتهای پرش در نظر گرفته می‌شد. به علت برخورد جت خروجی تخلیه تحتانی با جریان روگذر و همچنین به دلیل برخورد جریان روگذر با تیغه‌ها در پای سرریز جریانی آشفته و متلاطم تشکیل می‌شود که به علت ورود هوای زیاد به جریان امکان اندازه‌گیری مستقیم عمق اولیه جریان قبل از پرش هیدرولیکی مقدور نبود. لذا برای تعیین این عمق با تشکیل پرش هیدرولیکی و اندازه‌گیری عمق ثانویه پرش، با فرض ثابت بودن اندازه حرکت^۲ در دو انتهای پرش و صرف‌نظر از افت‌های اصطکاکی، عمق اولیه پرش از رابطه بین اعماق مزدوج (رابطه بلانگر^۳) تعیین گردید. همه آزمایش‌ها در شش دبی مختلف از ۱۶/۶۱ لیتر بر ثانیه الی ۴۴/۶۲ لیتر بر ثانیه انجام شدند. برای قابل تعمیم بودن نتایج برای استفاده در تحقیقات بعدی، پارامتر بی بعد نسبت دبی کل به‌صورت تقسیم دبی کل طراحی $(Q_d = 30 \text{ lit/s})$ بر مقادیر دبی کل عبوری محاسبه شد.

مراحل انجام آزمایش‌ها بدین‌صورت بود که آزمایش‌های بررسی میزان افت انرژی روی سرریز و تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز، ابتدا در سرریز اوجی استاندارد (شکل ۴) به‌عنوان آزمایش‌های شاهد انجام شد. پس از آزمایش‌های شاهد از سازه ترکیبی سرریز اوجی تخلیه دار (شکل ۵) بدون تیغه استفاده شد و مشخصات جریان و مشخصات پرش هیدرولیکی نیز در این مدل ثبت گردید. مدل تخلیه دار به نحوی طراحی شد که یک شکاف در پایین‌دست

³ Belanger

¹ Roller

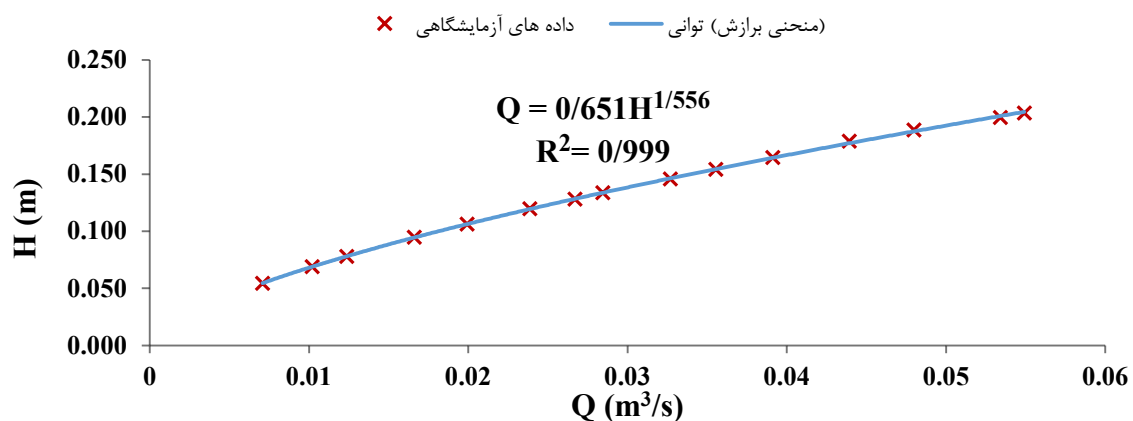
² Momentum

تخلیه تحتانی تعیین می‌شود، در نمودارها نیز با تقسیم دبی عبوری از مجرای تخلیه تحتانی به دبی کل پارامتر بی بعد دبی نسبی تخلیه تحتانی (Q_T) برحسب درصد مورد استفاده قرار گرفته است. در کلیه آزمایش‌ها عمق‌های جریان توسط ارتفاع سنج سوزنی^۱ با دقت ۰/۵ میلی‌متر برداشت شده است. آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب در انتهای فلوم مجهز به یک سرریز مثلثی ۵۳/۸ درجه استاندارد شده است که دبی جریان را می‌تواند با دقت نسبتاً بالا (۰/۲) لیتر بر ثانیه به ازای هر میلی‌متر قرائت اشل) اندازه‌گیری نماید.

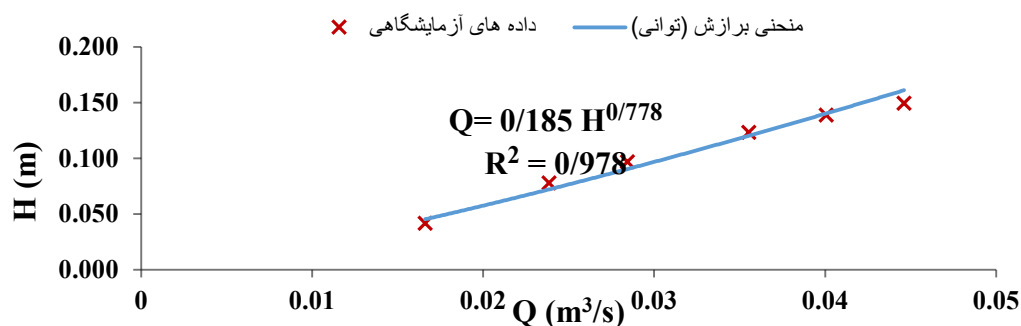
ارائه نتایج

در این تحقیق برای بررسی اثر هم‌زمان جریان روگذر و زیرگذر از سرریز و بررسی کارایی سیستم ترکیبی از نظر ضریب تخلیه دبی، منحنی دبی-اشل سرریز در حالت بدون تخلیه و با تخلیه با یکدیگر مقایسه شده است (شکل‌های ۸ و ۹).

ابعاد تیغه‌ها مطرح شد با تعیین عمق اولیه جریان تحت دبی طراحی (y_{1d}) در سرریز اوجی استاندارد، اندازه‌های ارتفاع، طول و فاصله بین تیغه‌ها مشخص می‌شود که در این آزمایش-ها با دبی طرح ۳۰ لیتر بر ثانیه y_{1d} برابر ۴/۳ سانتی‌متر محاسبه شده است. تعداد تیغه‌ها نیز با تقسیم طول سرریز بر فاصله بین تیغه‌ها برابر با پنج عدد به دست آمد. جهت بررسی اثر ضخامت تیغه‌ها بر مشخصات پرش از دو نوع تیغه به ضخامت‌های ۰/۳ و ۰/۶ سانتی‌متر استفاده شد؛ بنابراین در مدل‌های تخلیه دار با تیغه‌های بالادست از پنج تیغه به ابعاد $۴/۳ \times ۴/۳ \times ۰/۳$ سانتی‌متر و $۴/۳ \times ۴/۳ \times ۰/۶$ سانتی‌متر درست بالادست شکاف خروجی تخلیه تحتانی استفاده شد. برای تعیین دبی عبوری از مجرای تخلیه تحتانی، پس از برداشت تراز سطح آب روی سرریز بدون تخلیه تحتانی، معادله دبی-اشل سرریز تعیین شد (شکل ۸). در آزمایش‌های دیگر روی مدل‌های با تخلیه تحتانی با داشتن دبی کل و تعیین دبی روگذر از سرریز توسط رابطه دبی-اشل، دبی عبوری از مجرای



شکل (۸): منحنی سنج دبی-اشل سرریز اوجی استاندارد



شکل (۹): منحنی سنج دبی-اشل سرریز اوجی با تخلیه تحتانی

از مقایسه منحنی‌های دبی- اشل سرریز در حالت بدون تخلیه تحتانی با حالت سرریز تخلیه دار نمایان است که مدل‌های تخلیه دار ضریب دبی تخلیه بالاتری داشته و در یک هد ثابت در بالای سرریز میزان دبی عبوری از مجموعه در شرایط همراه با تخلیه تحتانی بیشتر می‌گردد. این مورد باعث می‌شود سرریز یک سد بدون نیاز به تغییر در طراحی، توانایی کنترل سیلاب- های با دبی بزرگ‌تر از دبی طرح را داشته باشد.

جهت بررسی اثر ضخامت تیغه‌های واقع در بالادست شکاف تخلیه تحتانی بر اتلاف انرژی جریان روی سرریز و مشخصات پرش هیدرولیکی پایین‌دست، آزمایش‌هایی انجام شده است که نتایج آن‌ها را در جداول (۱) و (۲) و در شکل‌های (۱۰) الی (۲۱) قابل مشاهده است. در جداول (۱) و (۲) پارامتر Q_d

جدول (۱): خلاصه نتایج آزمایشگاهی

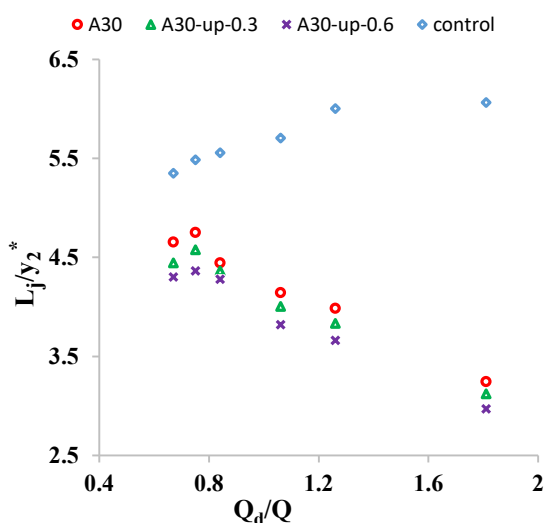
دبی کل (لیتر بر ثانیه)	$\frac{Q_d}{Q}$	مدل آزمایش‌های شاهد		مدل تخلیه‌دار ۳۰ درجه بدون تیغه				مدل تخلیه‌دار ۳۰ درجه با تیغه‌هایی به ضخامت ۰/۳ سانتیمتر				مدل تخلیه‌دار ۳۰ درجه با تیغه‌هایی به ضخامت ۰/۶ سانتیمتر			
		Fr_1	$\frac{hf_1}{E_0}$	Fr_1	Q_r	$\frac{hf_1}{E_0}$	$\frac{L_j}{y_2^*}$	Fr_1	Q_r	$\frac{hf_1}{E_0}$	$\frac{L_j}{y_2^*}$	Fr_1	Q_r	$\frac{hf_1}{E_0}$	$\frac{L_j}{y_2^*}$
۱۶/۶۱	۱/۸۱	۴/۵	۲۰/۸	۲/۱	۷۲/۲	۵۵/۸	۳/۲	۲/۱	۶۵/۸	۵۷/۶	۳/۱	۲	۶۴/۳	۵۸/۴	۳
۲۳/۸۵	۱/۲۶	۴	۱۶/۷	۲/۵	۴۸/۶	۴۲/۸	۴	۲/۴	۴۷/۲	۴۴/۳	۳/۸	۲/۳	۴۶/۵	۴۶/۳	۳/۶
۲۸/۴۳	۱/۰۶	۳/۸	۱۵/۴	۲/۶	۳۹/۵	۳۶/۷	۴/۱	۲/۵	۳۸/۸	۳۹/۳	۴	۲/۴	۳۹/۵	۴۰/۹	۳/۸
۳۵/۵۳	۰/۸۴	۳/۵	۱۴/۵	۲/۷	۲۹/۴	۲۸/۹	۴/۴	۲/۶	۲۹/۴	۳۰/۸	۴/۴	۲/۵	۲۹/۹	۳۲/۱	۴/۳
۴۰/۰۷	۰/۷۵	۳/۴	۱۳/۶	۲/۷	۲۴/۸	۲۴/۹	۴/۸	۲/۷	۲۶/۷	۲۵/۴	۴/۶	۲/۶	۲۸	۲۶/۹	۴/۴
۴۴/۶۲	۰/۶۷	۳/۲	۱۲/۹	۲/۶	۲۴/۲	۲۴/۳	۴/۷	۲/۵	۲۳/۲	۲۵/۹	۴/۴	۲/۵	۱۹/۶	۲۸	۴/۳

نکته: ضخامت تیغه‌های ۰/۶ سانتی‌متر معادل ضخامت نسبی ۰/۱۴ و ضخامت تیغه‌های ۰/۳ سانتی‌متر معادل ضخامت نسبی ۰/۰۷ است.

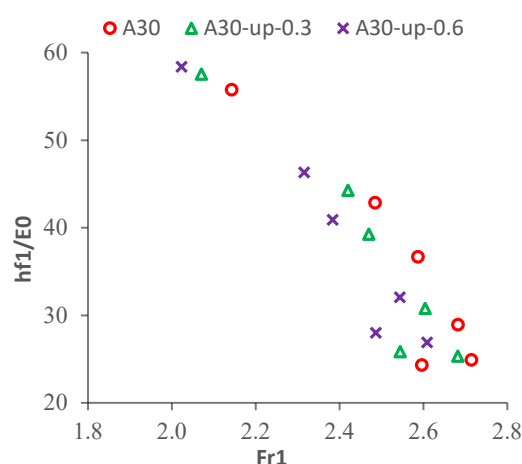
جدول (۲): مشخصات پرش هیدرولیکی پایین‌دست

دبی کل (لیتر بر ثانیه)	مدل آزمایش- های شاهد		مدل تخلیه‌دار ۳۰ درجه بدون تیغه				مدل تخلیه‌دار ۳۰ درجه با تیغه‌هایی به ضخامت ۰/۳ سانتیمتر				مدل تخلیه‌دار ۳۰ درجه با تیغه‌هایی به ضخامت ۰/۶ سانتیمتر			
	L_j	y_2	L_j	T%	y_2	D%	L_j	T%	y_2	D%	L_j	T%	y_2	D%
	(cm)	(cm)	(cm)		(cm)		(cm)		(cm)		(cm)		(cm)	
۱۶/۶۱	۹۹	۱۶/۳	۵۳	۴۶/۵	۱۱/۷	۲۸/۴	۵۱	۴۸/۵	۱۱/۵	۲۹/۶	۴۸/۵	۵۱	۱۱/۴	۳۰/۴
۲۳/۸۵	۱۱۹	۱۹/۸	۷۹	۳۳/۶	۱۶	۱۹/۳	۷۶	۳۶/۱	۱۵/۸	۲۰/۳	۷۲/۶	۳۹	۱۵/۵	۲۲
۲۸/۴۳	۱۲۴	۲۱/۷	۹۰	۲۷/۴	۱۸/۳	۱۵/۶	۸۷	۲۹/۸	۱۷/۹	۱۷/۵	۸۳	۳۳	۱۷/۶	۱۸/۹
۳۵/۵۳	۱۳۵	۲۴/۳	۱۰۸	۲۰	۲۱/۶	۱۱	۱۰۶	۲۱/۵	۲۱/۳	۱۲/۲	۱۰۴	۲۳	۲۱/۱	۱۳/۲
۴۰/۰۷	۱۴۲	۲۵/۹	۱۲۳	۱۳/۴	۲۳/۶	۹	۱۱۸/۵	۱۶/۶	۲۳/۴	۹/۵	۱۱۳	۲۰/۴	۲۳/۱	۱۰/۷
۴۴/۶۲	۱۴۶	۲۷/۳	۱۲۷	۱۳	۲۴/۸	۹/۲	۱۲۱/۳	۱۶/۹	۲۴/۶	۱۰	۱۱۷/۴	۱۹/۶	۲۴/۳	۱۱

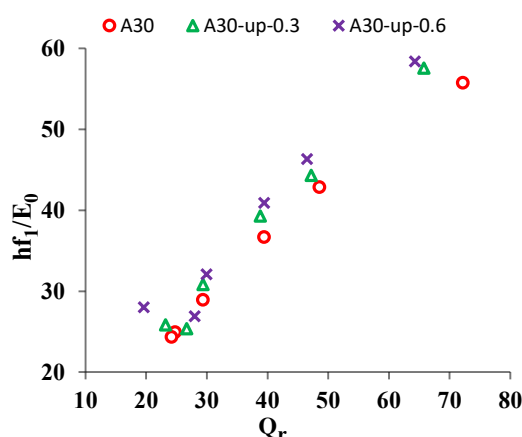
موجب اتلاف انرژی بیشتری روی سرریز شده است. مدل تخلیه دار با تیغه‌های به ضخامت نسبی ۰/۱۴ به‌طور متوسط موجب اتلاف انرژی جریان به میزان ۴۷/۶ درصد تا دبی طرح شده است (از آنجایی که در این تحقیق دبی‌های کمتر از دبی طرح تا دبی‌های بیش از دبی طرح مورد بررسی قرار گرفته است لذا متوسط اتلاف انرژی بین دبی‌های کمتر از دبی طرح تا دبی طرح در نظر گرفته شده است). همچنین این مدل موجب کاهش بیشتری در اعداد فرود پای سرریز نسبت به سرریز اوجی استاندارد و نسبت به سایر مدل‌های تخلیه دار شده است. با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۲)، هرچه دبی کل جریان کمتر باشد، نسبت دبی تخلیه تحتانی به دبی کل بیشتر است (در شکل‌های (۱۰) و (۱۲) از چپ به راست) و هرچه دبی کل افزایش یابد با افزایش بار روی سرریز، نسبت دبی تخلیه تحتانی به دبی کل نیز کاهش می‌یابد. ولی در حالت حداکثر دبی که نسبت دبی تخلیه تحتانی به دبی کل کم شده است، عملکرد این مدل در اتلاف انرژی خیلی بهتر از سرریز اوجی استاندارد است.



شکل (۱۰) رابطه اتلاف انرژی نسبی روی سرریز با نسبت دبی کل

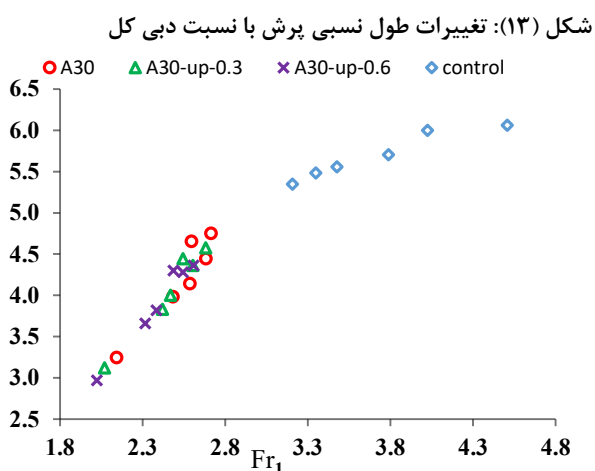


شکل (۱۱) رابطه اتلاف انرژی نسبی روی سرریز با عدد فرود پای سرریز



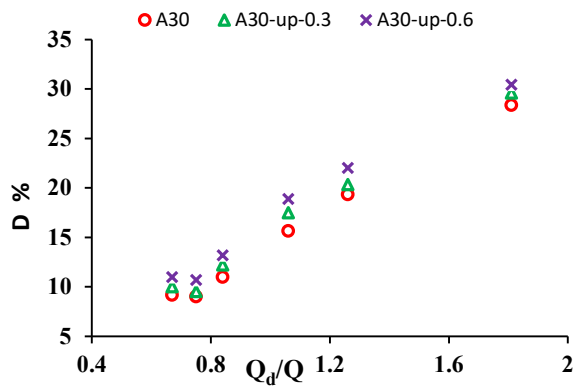
شکل (۱۲) رابطه اتلاف انرژی نسبی روی سرریز با دبی نسبی تخلیه تحتانی

با توجه به شکل‌های (۱۰) تا (۱۲)، مدل‌های تخلیه دار به‌ویژه مدل‌های تیغه دار موجب اتلاف انرژی جریان بیشتری ناشی از تداخل جریان روگذر با تیغه‌ها و نیز ناشی از تداخل دو جریان روگذر و زیرگذر هستند. از بین این مدل‌ها، مدل با ضخامت نسبی تیغه بیشتر (۰/۱۴) (t_b/y_{1d}) نسبت به سایر مدل‌ها

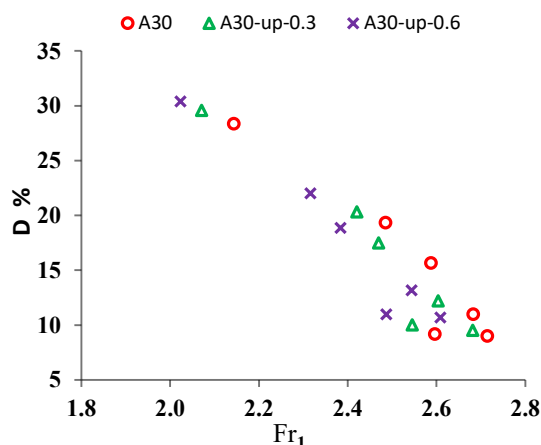


شکل (۱۳) تغییرات طول نسبی پرش با نسبت دبی کل

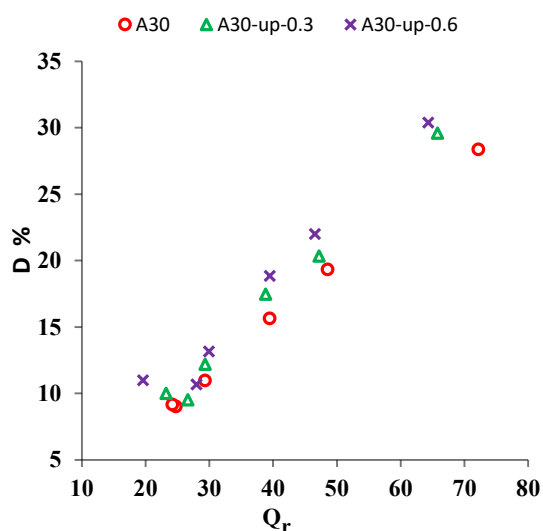
شکل (۱۴) تغییرات طول نسبی پرش با عدد فرود پای سرریز



شکل (۱۶): درصد کاهش عمق نسبی پرش با نسبت دبی کل

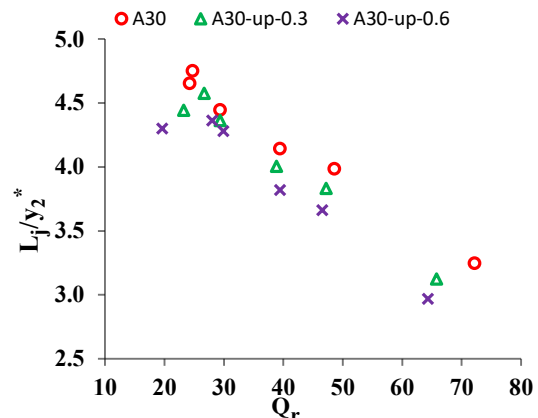


شکل (۱۷): درصد کاهش عمق نسبی پرش با عدد فرود پای سرریز



شکل (۱۸): درصد کاهش عمق نسبی پرش با دبی نسبی تخلیه تحتانی

با توجه به شکل‌های (۱۶) تا (۱۸)، اضافه کردن تیغه‌ها به سازه ترکیبی موجب کاهش بیشتر عمق نسبی ثانویه پرش شده است و با افزایش ضخامت تیغه‌ها این درصد کاهش عمق نسبی



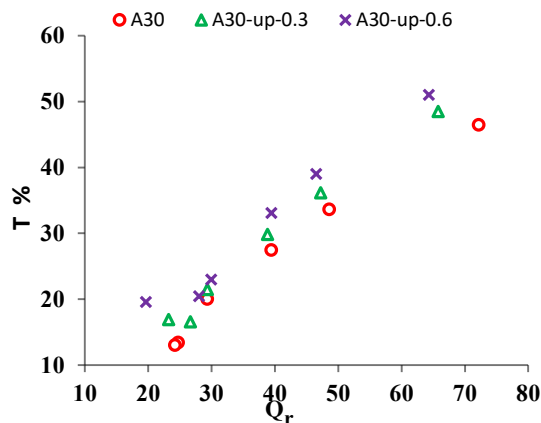
شکل (۱۵): تغییرات طول نسبی پرش با دبی نسبی تخلیه تحتانی

در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵)، $L_j =$ طول پرش و $y_2^* =$ عمق ثانویه پرش کلاسیک. برای بی بعد کردن طول پرش از نسبت بی بعد L_j/y_2^* استفاده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، مدل‌های تخلیه دار به‌خصوص مدل‌های با تیغه‌های بالادست، نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش کلاسیک را به میزان زیادی نسبت به سرریز اوجی استاندارد کاهش داده‌اند و این کاهش طول در اعداد فرود کمتر مشاهده می‌شود. از بین مدل‌های تیغه دار، مدل با ضخامت نسبی تیغه بزرگ‌تر (۰/۱۴) بیشتر موجب کاهش نسبت طول به عمق ثانویه پرش، به نسبت سایر مدل‌ها شده است و نسبت طول به عمق ثانویه پرش کلاسیک در مدل با ضخامت نسبی تیغه بیشتر، از ۳ تا ۴/۳ در دبی‌های مختلف متغیر بوده و به‌طور متوسط تا دبی طرح برابر ۳/۵۳ ایجاد شده است.

پارامتر کاهش عمق نسبی (D)، توسط اید و راجاراتنام^۱ (۲۰۰۲) ارائه شده و به شکل رابطه (۵) محاسبه می‌شود که در نمودارها نیز به‌صورت درصد کاهش عمق مورد استفاده قرار گرفته است.

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، $y_2^* =$ عمق ثانویه پرش کلاسیک سرریز اوجی استاندارد و $y_2 =$ عمق ثانویه پرش در مدل‌های ترکیبی مختلف با و بدون تیغه‌های بالادست است.



شکل (۲۱) درصد کاهش طول نسبی پرش با دبی نسبی تخلیه تحتانی

همان‌طور که در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) مشاهده می‌شود، مدل با ضخامت تیغه بالاتر موجب افزایش درصد کاهش طول نسبی پرش شده است و میزان این درصد کاهش طول پرش برای مدل با تیغه‌هایی با ضخامت نسبی ۰/۱۴ از سایر مدل‌ها بیشتر و از ۵۱ درصد در دبی حداقل تا ۱۹/۶ درصد در دبی حداکثر این تحقیق متفاوت است. این مدل به‌طور متوسط موجب کاهش ۴۰ درصدی طول پرش و طول حوضچه آرامش تا دبی طرح شده است.

با افزایش دبی کل و کاهش نسبت Q_r ، به علت افزایش بار روی سرریز، اثر تخلیه تحتانی کاهش می‌یابد. درحالی‌که در مدل‌های با تیغه‌های بالادست، جریان آب روگذر از سرریز پس از برخورد با تیغه‌ها دچار یک جداسازی عرضی به ازای هر تیغه شده است (شکل ۱۷). جداسازی عرضی آب در تیغه‌های بالادست مانعی برای جریان روگذر می‌شود و در این حالت کارایی تخلیه تحتانی بهتر می‌شود. لذا تیغه‌هایی با ضخامت بیشتر، منجر به جداسازی عرضی بیشتری در جریان روگذر شده و به نسبت عرض جداسازی، کارایی تخلیه تحتانی نیز بالاتر می‌رود.

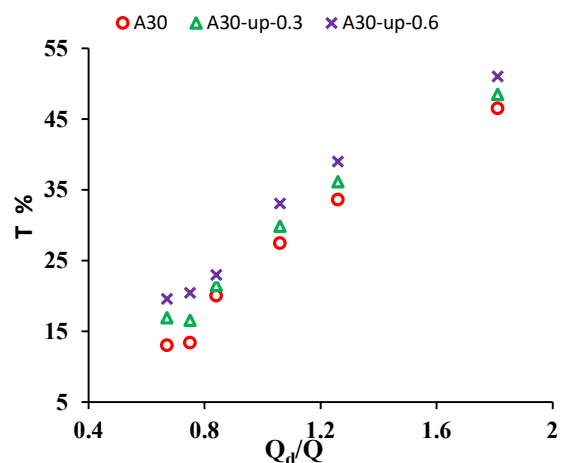


شکل (۲۲) جداسازی عرضی جریان روگذر برخورد کرده با تیغه‌ها

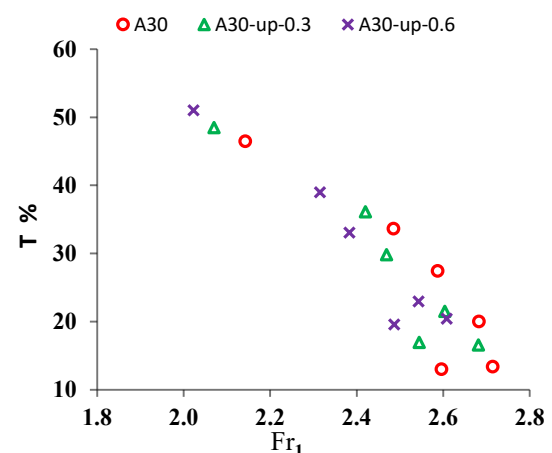
نیز افزایش می‌یابد. بیشترین کاهش عمق نسبی در بین مدل‌های مورد استفاده، در مدل با تیغه‌های بالادست به ضخامت نسبی ۰/۱۴ مشاهده می‌شود. این مدل موجب کاهش عمق نسبی از ۳۰/۴ درصد در دبی‌های کم تا ۱۱ درصد در حداکثر دبی این تحقیق شده است و به‌طور متوسط موجب کاهش ۲۳/۲ درصدی عمق نسبی ثانویه پرش تا دبی طرح شده است. به‌منظور بررسی کاهش طول نسبی پرش، مشابه روش اید و راجاراتنام در تعیین کاهش عمق نسبی عمل شده و رابطه (۶) تعیین کننده کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی (T) در مدل‌های مختلف است.

$$T = \frac{L_{j^*} - L_j}{L_{j^*}} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، L_{j^*} = طول پرش کلاسیک سرریز اوجی استاندارد و L_j = طول پرش در مدل‌های ترکیبی مختلف با و بدون تیغه‌های بالادست.



شکل (۱۹): درصد کاهش طول نسبی پرش با نسبت دبی کل



شکل (۲۰) درصد کاهش طول نسبی پرش با عدد فرود

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران به دلیل تأمین مالی تحقیق از محل پژوهانه نویسنده دوم تشکر می‌نمایند.

مراجع

۱- اشکو، ز. احمدی، ا. و دهقانی، ا. ا. (۱۳۹۴). "مطالعه آزمایشگاهی اثر تمایل بلوک‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش تیپ سه USBR." مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۴): ۲۳۱-۲۴۲.

۲- توننده جانی، م. و کاشفی پور، س. م. (۱۳۹۱). "بررسی تغییرات افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه‌ی سرریز اوجی." مجله مهندسی آبیاری و آب، ۸(۱): ۱-۱۳.

۳- صادقی عسگری، م. و موسوی جهرمی، س. ج. (۱۳۹۳). "اثر دفلکتور در سرریز جامی شکل همراه با کانال نزدیک شونده روی طول پرش و تلفات انرژی." مجله پژوهش آب ایران، ۸(۱۵): ۶۳-۷۱.

۴- صادقی، ح.، دانشفراز، ر.، بهمنش، ج. و نیک پور، م. ر. (۱۳۹۴). "تأثیر شکل دیواره‌ی تبدیل‌های واگرا در خصوصیات پرش هیدرولیکی." مجله مهندسی عمران شریف، ۲-۳۱(۲/۲): ۵۷-۶۲.

۵- علوانی، س. (۱۳۹۵). "بررسی آزمایشگاهی اثر تیغه‌های واقع در مسیر جریان سرریز اوجی بر اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی ناشی از جریان ترکیبی با تخلیه تحتانی." پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۶- قره گزلو، م.، مسعودیان، م.، هابر، ب. و صالحی نیشابوری، ع. ا. (۱۳۹۲). "اثر سرریز بر دبی دریچه در مدل ترکیبی سرریز-دریچه استوانه‌ای." مجله مهندسی آبیاری و آب، ۳(۱۱): ۸۶-۹۵.

7- Al-saddi, A. K. I. (2013). "Study Coefficient of Discharge for a Combined Free Flow over Weir and under Gate for Multi Cases." Euphrates Journal of Agriculture Science. 5(4), 26-35.

8- Altan-Sakarya, B. A. and Kokpinar, M. A. (2013). "Computation of discharge for simultaneous flow over weirs and below gates (H-weirs)." Journal of flow Measurement and Instrumentation. (29), 32-38.

9- Bos, M. G. (1989). "Discharge measurement structures." Wageningen. International Institute

از آنجایی که دبی طراحی سرریز برابر ۳۰ لیتر بر ثانیه است و ارتفاع تیغه‌ها برابر عمق y_1 تحت دبی طراحی است تا دبی ۲۸/۴۳ لیتر بر ثانیه (بیشترین دبی کوچک‌تر از دبی طرح در این تحقیق) که نسبت دبی طراحی به دبی کل در این دبی برابر ۱/۰۶ است و هنوز تا این دبی ارتفاع سطح آب کمتر از ارتفاع تیغه‌ها است، جداسازی عرضی ناشی از هر تیغه کاملاً مشهود بوده ولی در دبی ۳۵/۵۳ لیتر بر ثانیه (کمترین دبی بزرگ‌تر از دبی طرح در این تحقیق) که نسبت دبی طراحی به دبی کل در این دبی برابر ۰/۸۴ است و ارتفاع سطح آب بیشتر از ارتفاع تیغه‌ها شده است، تیغه‌ها به حالت استغراق کامل درآمده و تقریباً جداسازی ناشی از تیغه‌ها دیده نخواهد شد.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل ترکیبی جریان روگذر از سرریز و زیرگذر از تخلیه تحتانی و تداخل جریان در پای سرریز باعث می‌شود که جریان ورودی به حوضچه آرامش انرژی کمتری داشته باشد و مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش کاهش یابد. با افزایش هد جریان در بالادست، میزان دبی جریان روگذر نسبت به جریان زیرگذر بیشتر شده و نسبت دبی جریان عبوری از زیرگذر کمتر از دبی روگذر از سرریز خواهد شد. به همین دلیل کارایی تخلیه تحتانی در اتلاف انرژی کمتر می‌گردد و در این شرایط تیغه‌ها باعث می‌شوند که اثر تخلیه تحتانی بیشتر شود.

مدل ترکیبی با تیغه‌های بالادست با ضخامت نسبی بیشتر ($t_b/y_{1d} = ۰/۱۴$)، موجب اتلاف انرژی جریان بیشتر، کاهش بیشتر ابعاد پرش هیدرولیکی و به تبع آن کاهش ابعاد حوضچه آرامش نسبت به سایر مدل‌ها می‌شود. میزان اتلاف انرژی جریان، کاهش طول و عمق نسبی ثانویه پرش در این مدل به‌طور متوسط به ترتیب برابر ۴۷/۶، ۴۰ و ۲۳/۲ درصد است.

مدل‌های تخلیه دار، نسبت L_j/y_2^* کمتری نسبت به پرش کلاسیک سرریز اوجی استاندارد دارند و از بین این مدل‌ها، مدل ترکیبی با تیغه‌های بالادست با ضخامت نسبی بیشتر ($t_b/y_{1d} = ۰/۱۴$) این نسبت را بیش از سایر مدل‌ها کاهش می‌دهد. میزان L_j/y_2^* برای این مدل به ۳/۵۳ کاهش یافته است.

- 20- USBR. (1987). "Design of Small Dams." Washington, DC. A Water Resources Technical Publication. Third Edition: p. 860.
- for Land Reclamation and Improvement. Third revised edition: p. 401.
- 10- Chow, V. T. (1988). "Open-channel hydraulics." New York. McGraw-Hill Book Company: p. 680.
- 11- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. (2002). "Hydraulic jumps on corrugated bed." Journal of Hydraulic Engineering. 128(2), 656-663.
- 12- Gupta, S. K., Mehta, R. C. and Dwivedi, V. K. (2013). "Modeling of relative Length and relative energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel." 3rd International Conference on civil, chemical and mechanical Engineerings ©Elsevier. (51), 529-537.
- 13- Jian-hua, W., Fei, M. and Li, Y. (2012). "Hydraulic Characteristics of Silt-type Energy Dissipaters." Journal of Hydrodynamics ©Elsevier. 24(6), 883-887.
- 14- Jian-hua, W., Li, Y. and Fei, M. (2014). "Hydraulics of a Multiple Silt-type Energy Dissipater." Journal of Hydrodynamics ©Elsevier. 26(1), 86-93.
- 15- Negm, A. M., Al-Brahim, A. M., and Al-Hamid, A. A. (2002). "Combined-free flow over weirs and below gates." Journal of Hydraulic Research. 40(3), 359-365.
- 16- Pagliara, S., Das, R. and Palermo, M. (2008). "Energy Dissipation on Submerged Block Ramps." Journal of Irrigation and Drainage Engineering ©ASCE. 134(4), 527-532.
- 17- Samani, J. M. V. and Mazaheri, M. (2007). "Combined flow over weir and under gate." 7th Iranian hydraulic conference, Power and Water University of Technology. Tehran: 81-86.
- 18- Samani, J. M. V. and Mazaheri, M. (2009). "Combined flow over weir and under gate." Journal of Hydraulic Engineering ©ASCE, 135(3), 224-227.
- 19- Sharif, N. and Rostami Ravori, A. (2014). "Experimental and Numerical Study of the Effect of Flow Separation on Dissipating Energy in Compound Bucket." 2nd International Conference on Civil Engineering ©Elsevier. 9, 334-338.

Experimental Study of the Effects of Blade Thickness of the Combined Structure of Ogee Spillway - Lower Bypass on Energy Loss and Downstream Hydraulic Jump Characteristics

Soheil Alvani ^{*1}

Seyed Mahmood Kashefipour ²

Mohammad Mahmoodian Shooshtari ³

Abstract

In this research the effects of installed blades on the combined model of ogee spillway with lower bypass on energy loss of structure and downstream hydraulic jump characteristics has been experimentally investigated. In order to achieve the goal of this study, a physical model of ogee spillway with lower bypass was built, in which the output jet from the lower bypass (bottom outlet) was set to be at the angle of 30 degrees to the overflow of spillway. Installation of blades at the upstream of the lower bypass slit makes flow separation and more turbulence on spillway and as a result more energy dissipation on structure. In this research, two blades relative thickness including $t_b/y_{1d} = 0.07$ and 0.14 were used and the results showed that the blades with the higher relative thickness (i.e. $t_b/y_{1d} = 0.14$) was found to be more effective in energy dissipation on structure and less values for the downstream hydraulic jump parameters. The measured values showed that the average energy loss on spillway, and the reduction length and secondary relative depth of hydraulic jump were 47.6%, 40% and 23.2%, respectively. According to the results obtained in this research study, the use of this structure is recommended for economical stilling basin construction at the downstream of small dams and spillways.

Keywords

Energy Dissipation, Blades Flow Path, Flow Separation, Simultaneous Flow, Spillway.

1*. M.Sc. Student of Water and Hydraulic Structures Engineering, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, soheil_alvani67@yahoo.com.

2. Professor, Department of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz.

3. Retired Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz.

Received: 2016/10/26

Accepted: 2017/02/26