

## بررسی تغییرات افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه‌ی سرریز اوجی

محمد توزنده جانی<sup>۱</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۲۳

### چکیده:

از جمله سازه‌هایی که هزینه‌ی زیادی در هنگام ساخت سدها صرف آن می‌شود، حوضچه‌های آرامش در انتهای سرریزها و سدهای انحرافی می‌باشد. از این رو کاهش طول حوضچه‌های آرامش از لحاظ اقتصادی مسأله‌ی مهمی می‌باشد. ابعاد حوضچه‌ی آرامش بستگی به طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه‌ی پرش دارد. لذا هرچه افت انرژی آب در طول سرریز بیشتر باشد، آب ورودی به حوضچه آرامش دارای انرژی کمتری بوده و بنابراین طول پرش هیدرولیکی نیز کاهش می‌یابد. در این تحقیق به منظور افزایش افت انرژی آب در طول سرریز و در نتیجه کاهش طول و عمق مزدوج پرش از ترکیب دو جت آبی که ترکیبی از جریان عبوری از روی سرریز اوجی با استاندارد USBR و جریان خروجی از شکاف در بدنه سد می‌باشد، استفاده شد. در این آزمایش جت آب خروجی از شکاف ایجاد شده در بدنه‌ی سد با سه زاویه صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق با جریان عبوری از روی سد در نسبت‌های متفاوتی از دبی که در هر زاویه‌ی برخورد، شش نسبت دبی از شکاف عبور داده می‌شد، تلاقی داده شد و تأثیر هر یک بر روی میزان کاهش طول و عمق مزدوج پرش بررسی شد. نتایج آزمایشات نشان داد که تلاقی جت‌های آب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق بر روی بدنه سرریز بیشترین تأثیر را بر روی کاهش طول و عمق مزدوج پرش دارد و به طور متوسط با عبور ۲۶ درصد دبی از شکاف، حدود ۵۰ درصد نسبت به جهش کلاسیک طول پرش را کاهش می‌دهد. همچنین ترکیب جریان با زاویه‌ی افقی با میانگین عبور ۳۱/۴ درصد از دبی کل از طریق شکاف به طور میانگین ۷/۱۴ درصد نسبت به مدل بدون شکاف ارتفاع آب پشت سد را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: جریان ترکیبی، سرریز اوجی، ضریب دبی سرریز، کاهش طول پرش هیدرولیکی.

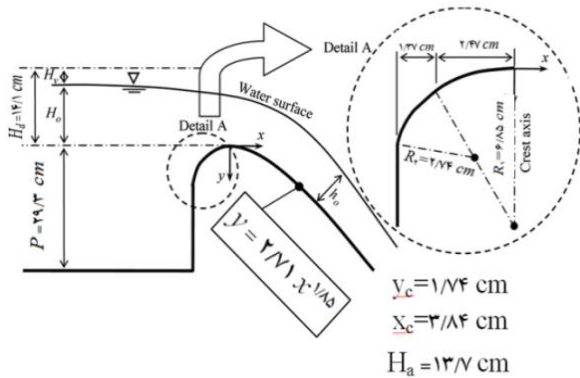
## مقدمه

به نام پارامتر زبری  $k = \frac{k_e}{y_1}$  معرفی کرد که  $k_e$  ارتفاع معادل زبری و  $y_1$  عمق جریان ورودی در بالای زبری هاست. او نشان داد طول پرش  $L_p$  و طول غلطابی  $L_r$  بر روی بسترهای زبر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۶]. امید و همکاران (۲۰۰۷)، خصوصیات جهش هیدرولیکی و اگر در حوضچه آرامش دوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نیز با به کارگیری اصول پیوستگی، انرژی و مومنتم استفاده از فرضیات ساده شونده، روابطی برای نسبت عمق ثانویه به اولیه، طول نسبی جهش ارائه گردید [۱۴]. پوزی و هسینگ، تأثیر شیب جانبی را بر طول جهش در حوضچه دوزنقه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی بر روی یک مدل آزمایشگاهی با شیب‌های جانبی ۰/۵:۱ تا ۲:۱ صورت گرفت، مشخص شد که کاهش شیب جانبی باعث کاهش طول جهش نسبت به جهش کلاسیک می‌شود [۱۵]. دیکسن، رابطه‌ای تئوری برای نسبت عمق ثانویه در مقطع دوزنقه‌ای ارائه کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش شیب جانبی، نسبت عمق ثانویه در مقطع دوزنقه‌ای در مقایسه با مقطع مستطیلی کاهش می‌یابد [۸]. ایلخانی‌پور (۱۳۸۷)، با معرفی مدلی با نام مدل ایلخانی‌پور اعلام کرد که، مدل ایلخانی‌پور مدل یک سد انحرافی جدید است که با تعبیه یک روزنه در بدنه سد و ترکیب جریان ورودی از روی سرریز اوجی با استاندارد USBR و جریان خروجی از روزنه، بدون استفاده از بلوک‌های حوضچه‌ای آرامش انرژی آب را تلف کرده و همزمان عمل تخلیه رسوب و همچنین کاهش بار آبی روی تاج سرریز را موجب می‌شود. در این مطالعه، تأثیر برخورد جریان خروجی از روزنه با جت آب ریزشی از روی دیواره سرریز و تغییر محل برخورد آن‌ها در فاصله جهش از دیواره سرریز، در دبی‌ها و عمق پایاب‌های مختلف تعیین گردید [۱]. او اعلام کرد که مدل ایلخانی‌پور برای سدهای انحرافی مدلی است که در سال ۲۰۰۷ در نهمین سمپوزیوم بین‌المللی کنترل، اندازه‌گیری، نمایش جریان سیال که در ایالت فلوریدای آمریکا برگزار شده بود، برای اولین بار ارائه شد. این مدل با استفاده از مکانیسم خاصی که دارد از برخورد دو جت آب در استهلاک انرژی استفاده می‌کند و می‌تواند با حذف تأسیسات مستهلاک کننده انرژی نظیر حوضچه‌ای آرامش که در پایاب سرریزهای انحرافی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در هزینه و زمان اجرای سد انحرافی صرفه جویی کند [۲].

حوضچه‌های آرامش یا حوضچه جهش آبی عبارت از قسمت کوتاهی از یک آبراهه کف سازی شده است که به صورت سازه‌ای در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری با جریان فوق بحرانی، ساخته می‌شود و تمام یا قسمتی از پرش هیدرولیکی در آن اتفاق می‌افتد هدف از ساختن حوضچه آرامش، مهار کردن پرش هیدرولیکی در داخل آن، کاستن طول آن و تبدیل جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی، در نتیجه کاهش انرژی جنبشی جریان و تبدیل انرژی مزبور به انرژی حرارتی می‌باشد تا بدین ترتیب ضمن کاستن از انرژی فوق‌العاده جریان قبل از ورود به قسمت کف سازی شده آبراهه از خرابی‌های احتمالی جلوگیری شود [۳]. با توجه به کاربرد فوق‌العاده پرش هیدرولیکی، این پدیده در هفتاد سال گذشته به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و اطلاعات جامعی نیز منتشر شده است. هدف عمده این مطالعات شناخت بهتر مکانیزم پرش و ایجاد روابطی برای پیش‌بینی خصوصیات پرش نظیر طول پرش، عمق پایاب مورد نیاز، میزان استهلاک انرژی، توزیع سرعت جریان، نوسانات فشار و نیز پروفیل سطح آب در طول پرش بوده است. برآورد دقیق این خصوصیات کمک کرده است تا سازه‌های مستهلاک کننده انرژی از نوع پرش هیدرولیکی اقتصادی‌تر و ایمن‌تر طراحی شوند [۱۱]. همچنین تاکنون تحقیقات متفاوتی به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی صورت گرفته است و روش‌های گوناگونی برای بهبود و افزایش کارایی پرش از سوی محققین مختلف پیشنهاد شده است که میتوان به استفاده از بلوک‌های کف، آستانه انتهایی، پله‌های مثبت یا منفی، شیب‌دار کردن کف و افزایش عرض مقطع اشاره کرد [۳]. در حوضچه‌های آرامش به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی از بلوک‌ها و ایجاد موانع در برابر جریان استفاده می‌کنند که وجود مانع در مقابل جریان باعث جداسازی خطوط جریان و استهلاک بیشتر انرژی و افزایش تنش برشی و نیز افزایش نیروی درگ می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند باعث کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی گردد بدون آنکه کاویتاسیونی رخ دهد زبری‌های کف می‌باشد [۱۸]. در ادامه برخی از تحقیقاتی که توسط محققین مختلف در این زمینه صورت گرفته است، بیان می‌شود.

راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش‌های بر روی بستر زبر انجام داد او یک پارامتر

شده در درون فلوم قرار داده می‌شود، سپس آب‌بندی و مهار آن توسط چسب آکواریوم صورت می‌گرفت. در هر آزمایش پس از ثابت شدن شرایط آزمایش و برقراری دبی مورد نظر در فلوم، طول پرش و ارتفاع آب بالای تاج سرریز برداشت می‌شد، سپس با استفاده از ارتفاع تراز سطح آب روی سرریز و داشتن دبی کل، معادله‌ی دبی اشل سرریز تعیین شد که در آزمایشات بعدی به منظور تعیین میزان دبی عبوری از مجرای تخلیه‌ی تحتانی استفاده شد. این دبی‌ها که عبارت بودند از ۱۶، ۲۳، ۲۸، ۳۵، ۴۳، ۴۴، ۵۳، ۶۱، ۶۲، ۷۶ و ۸۵ لیتر بر ثانیه، توسط سرریز مثلثی ۵۳ درجه‌ای که در انتهای فلوم بود و منحنی دبی اشل آن تعیین شده بود، اندازه‌گیری می‌شد. همچنین تنظیم دبی توسط شیر که در ابتدای فلوم قرار داشت صورت می‌گرفت. آزمایش‌ها در فلومی به عرض ۲۵ سانتیمتر و طول ۱۱/۹ متر با قابلیت تغییر شیب و دبی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. لازم به ذکر است که در هر سری از آزمایشات عرض شکاف به گونه‌ای تغییر می‌یافت که با توجه به زاویه‌ی برخورد آب با جریان روی سد، سطح مقطع عمود بر جریان یکسان باشد.



شکل (۱): پروفیل طراحی سرریز اوجی

پس از اتمام آزمایش‌های اولیه با مدل بدون تخلیه تحتانی، مدل‌های دیگری مشابه مدل قبلی ساخته شد با این تفاوت که این بار در بدنه‌ی پایین‌دست مدل شکافی ایجاد شده بود و پره‌هایی در داخل مدل نصب شده بودند که خطوط جریان را با سه زاویه‌ی صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق با جریان عبوری از روی سد تلاقی می‌دادند (شکل ۲). این نوع خروجی می‌تواند همانگونه که تخلیه‌های تحتانی در سدها ساخته می‌شود در بدنه‌ی سدها نیز احداث شود. همچنین لازم به ذکر است که این شکاف به صورت سراسری در بدنه پایین‌دست سرریز ایجاد شد. آزمایشات در

در مطالعه حاضر به منظور کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و به تبع آن کاهش ابعاد حوضچه آرامش و نیز عدم تجمع رسوبات در بالادست سد، جریان عبوری از روی سد را با جت آبی که از شکاف ایجاد شده در بدنه سد خارج می‌شد، با سه زاویه مختلف و نیز دبی‌های متفاوت طاقی داده شد و تأثیر آن روی کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و عدد فرود بررسی شد. در بررسی‌های اولیه، معمولاً به نظر می‌رسد که برخورد جت‌های آب در روی سرریز، موجب کاهش طول حوضچه آرامش می‌شود ولی مناسب‌ترین زاویه برخورد جت‌های آب باید با بررسی محل تشکیل جهش، طول جهش، عمق پایاب موردنیاز برای تشکیل جهش پایدار و اثرات متقابل جریان ریزشی از روی سرریز و خروجی از شکاف سد بر یکدیگر و شرایط جریان بالادست و پایین‌دست تعیین گردد.

## مواد و روش‌ها

به منظور به دست آوردن اطلاعاتی در زمینه میزان تأثیر جریان خروجی از تخلیه تحتانی و زاویه‌ی برخورد در کاهش طول پرش هیدرولیکی، عمق مزدوج پرش، ارتفاع آب روی تاج سرریز و نیز افزایش دبی عبوری از سرریز، پروفیل سرریز اوجی به روش استاندارد USBR [۱۹] مطابق شکل (۱) بر اساس مشخصات فلوم و دبی طرح ۳۰ لیتر بر ثانیه طراحی شد. در روش استاندارد USBR بخشی از نیم‌رخ که در بالادست قله تاج سرریز قرار دارد، یک منحنی دایره‌ای مرکب است در حالی که بخش پایین‌دست آن یک منحنی است که از رابطه (۱) پیروی می‌کند:

$$\frac{y}{H_d} = -k \left[ \frac{x}{H_d} \right]^n \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق  $H_d$ ، بار طراحی،  $x$  و  $y$  مختصات هر نقطه از منحنی،  $n$  و  $k$  ضرایبی هستند که مقادیر آنها به شیب وجه بالادست و سرعت جریان در بالادست بستگی دارد. به منظور تعیین ضرایب  $k$ ،  $n$ ،  $R_1$ ،  $R_2$ ،  $y_c$  و  $x_c$  که در شکل (۱) نشان داده شده از نمودارهای مختلفی که USBR (۱۹۸۷) ارائه نموده است استفاده شد. بعد از طراحی سرریز، قالب آن از چوب ساخته شد و در نهایت خود مدل با استفاده از قالب از جنس فایبرگلاس ساخته شد. آزمایش‌های اولیه بر روی مدل بدون تخلیه تحتانی در شش دبی مختلف انجام شد به این ترتیب که مدل ساخته

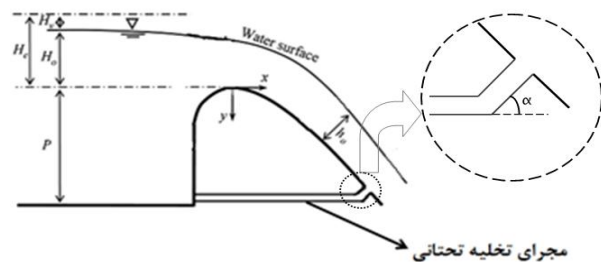
$S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  و در سه زاویه انجام شد، بعد از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، فرضیات به کار گرفته شده در استخراج روابط تئوری بررسی شده و نتایج تئوری و آزمایشگاهی مربوط به کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه و طول نسبی پرش و افت نسبی انرژی مورد مقایسه قرار گرفت و سپس داده‌ها و نمودارهای، درصد کاهش طول پرش در برابر درصد دبی عبوری از مجرای تحتانی، درصد کاهش طول پرش در برابر عدد فرود در محل عمق اولیه پرش، درصد کاهش عدد فرود اولیه در برابر نسبت دبی عبوری از شکاف و بالاخره نرخ اتلاف انرژی در برابر عدد فرود اولیه ترسیم شد. نتایج آزمایشاتی که از سرریز بدون شکاف به ازای شش دبی مطرح شده به دست آمد در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): اطلاعات آزمایش سرریز بدون تخلیه تحتانی

افت انرژی پرش (cm)	$Fr_1$	هد آب روی سرریز (cm)	$L_j$ (cm)	دبی کل (لیتر بر ثانیه)
۱۱/۳	۴/۰۸	۱۰/۸	۱۳۰	۱۶/۶۱
۱۲/۲	۳/۸۴	۱۲/۹	۱۴۶	۲۳/۸۵
۱۲/۹	۳/۸	۱۴/۳	۱۶۳	۲۸/۴۳
۱۳/۰	۳/۵۱	۱۶/۵	۱۷۹	۳۵/۵۳
۱۳/۷	۳/۴۴	۱۷/۷	۲۰۵	۴۴/۶۲
۱۴/۰	۳/۲۱	۲۰/۱	۲۲۱	۵۳/۷۶

به منظور تعیین ضریب دبی سرریز و تعیین معادله‌ی دبی اشل سرریز، علاوه بر شش دبی فوق، چهار دبی دیگر نیز از سرریز عبور داده شد و در مجموع با این ده دبی ضریب سرریز تعیین شد. در شکل (۳) منحنی دبی اشل سرریز رسم شده است. ضریب سرریز نیز  $C_d = 2/211$  محاسبه شد. از معادله‌ی دبی اشل بدست آمده در شکل (۳) به منظور تعیین میزان دبی عبوری از روی سرریز و نیز تعیین دبی عبوری از مجرای تحتانی در آزمایشات بعدی استفاده شد.

سه سری انجام شد و در هر سری عرض شکاف به گونه‌ای تغییر داده می‌شد که سطح مقطع عمود بر جریان در سه زاویه‌ی برخورد یکسان باشد. این سه سطح مقطع خروجی که  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  نامیده شدند به ترتیب عبارت بودند از: ۴۰، ۱۰۰ و ۱۲۳ سانتیمتر مربع. هدف از تغییر سطح مقطع جریان خروجی، عبور دادن نسبت‌های متفاوتی از دبی از شکاف سرریز بود. هر مدل با گشودگی و زاویه‌ی خاص خود در فلوم نصب می‌شد و شش دبی یاد شده از آن عبور داده می‌شد. با معلوم بودن معادله‌ی دبی اشل مدل و تراز سطح آب در هر آزمایش میزان دبی عبوری از روی سد مشخص شده و با کسر آن از دبی کل، دبی عبوری از شکاف و در نتیجه درصدی از دبی کل که از شکاف عبور می‌کرد، مشخص می‌شد. سپس طول پرش و عمق مزدوج پرش، ارتفاع آب روی تاج سرریز و نیز عدد فرود برداشت و با نتایج آزمایشات شاهد و مدل‌های دیگر مقایسه می‌شد.

شکل (۲): ترکیب جریان با زاویه‌ی  $\alpha = 45$  درجه

در تمام آزمایشات با استفاده از دریچه‌ای که در انتهای فلوم قرار داشت عمق پایاب بگونه‌ای تنظیم می‌شد که پرش در محل پنجه‌ی سرریز تشکیل شود، همچنین در طول تمام آزمایشات شیب کانال روی صفر تنظیم شد. در تمام آزمایشات مبنای یکسانی برای اندازه‌گیری طول پرش در نظر در نظر گرفته شد.

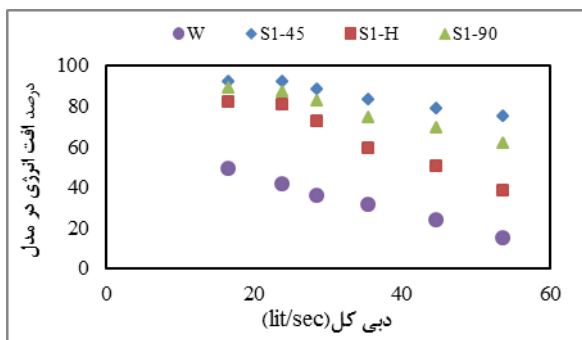
## نتایج و بحث

با توجه به اهداف مورد نظر در این تحقیق که شامل، بررسی خصوصیات جهش هیدرولیکی و افزایش ضریب آبگذری سرریز و بررسی تغییرات پارمترهای مهم جهش (نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه، طول نسبی جهش و نسبت طول جهش به عمق ثانویه) با استفاده از ترکیب جریان خروجی از مجرای تخلیه تحتانی سد با جریان عبوری از روی سرریز بود، ۶۰ آزمایش با زوایای مختلف و نسبت‌های متفاوتی از دبی انجام شد. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، برای هر سری از آزمایش‌ها که با سه سطح

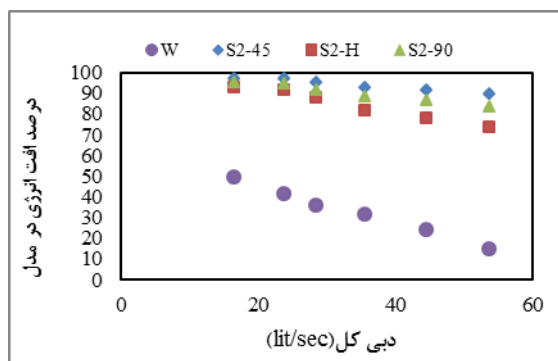
سرریز بدون شکاف کمتر می‌شود. این نکته در نمودارهای ۴ تا ۶ دیده می‌شود. بنابراین ترکیب خطوط جریان با زوایای مختلف تنها باعث می‌شود که بخشی از انرژی آب که تاکنون بیشتر توسط پرش هیدرولیکی و کمتر توسط سرریز اتلاف می‌شد و این خود باعث افزایش طول پرش می‌گشت، حال نسبت بیشتری از انرژی در سرریز اتلاف شود که این امر موجب ضعیفتر شدن پرش می‌گردد چون انرژی آبی که قرار است توسط پرش گرفته شود کمتر است.

$$E_j = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad (2)$$

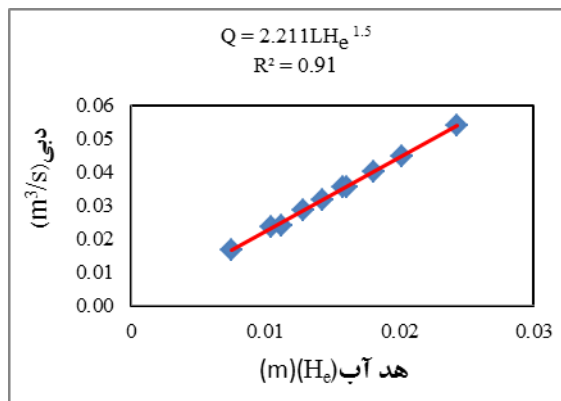
در شکل‌های ۴ تا ۶ درصد افزایش افت در مدل در اثر تلاقی خطوط جریان و کاهش افت اعمال شده توسط پرش هیدرولیکی رسم شده است. در کلیه اشکال منظور از W نتایج مربوط به مدل بدون شکاف می‌باشد و منظور از نسبت دبی، درصدی از دبی کل است که از طریق شکاف عبور می‌کند.



شکل (۴): تغییرات نسبت افت انرژی در مدل به افت انرژی کل در برابر دبی کل در مدل S<sub>۱</sub>



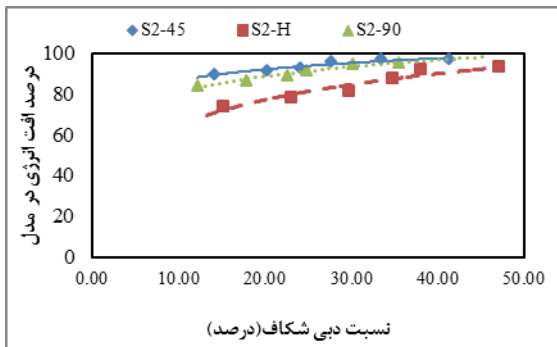
شکل (۵): تغییرات نسبت افت انرژی در مدل به افت انرژی کل در برابر دبی کل در مدل S<sub>۲</sub>



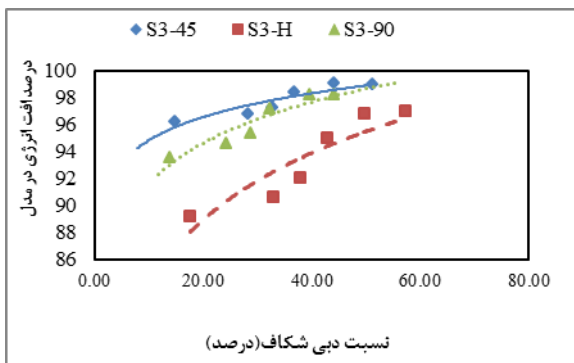
شکل (۳): منحنی دبی اشل سرریز اوجی

### تغییرات انرژی تلف شده در مدل و پرش هیدرولیکی

در این تحقیق به منظور کاهش طول پرش، از ترکیب خطوط جریان بر روی بدنه سرریز استفاده شد تا میزان افت انرژی در مدل را افزایش داده و در نهایت با کاهش سرعت آب، طول و عمق ثانویه پرش را کاهش داد. به منظور بررسی تغییرات افت انرژی در مدل و پرش هیدرولیکی ابتدا در آزمایشات شاهد که بر روی مدل بدون شکاف انجام شد، افت انرژی را که در مجموعه مدل و پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد با استفاده از تفاضل تراز سطح انرژی بین بالادست سرریز و پایین دست پرش محاسبه شد. همزمان افت انرژی پرش نیز از رابطه (۲) به دست آمد. با تفاضل این دو از یکدیگر میزان افت در مدل به دست آمد. همین محاسبات در مورد سرریزهای دارای مجرای تحتانی نیز انجام شد و افت کل و افت ایجاد شده در مدل و پرش هیدرولیکی به صورت جدا محاسبه شد. سپس به منظور مقایسه این افت‌ها با یکدیگر نمودارهای میزان افزایش افت کلی و افزایش افت مدل در برابر دبی و نسبت دبی شکاف رسم شد. البته مقدار افت کل در مدل بدون شکاف و مدل‌های شکافدار که از اختلاف تراز سطح آب بالادست سرریز با تراز سطح آب پایین دست پرش بدست می‌آید، زیاد تفاوتی ندارد و در چند دبی حتی از افت مدل‌های دارای شکاف بیشتر بود. چون در سیستم سرریز-شکاف، تلاقی خطوط جریان اگرچه عمق ثانویه پرش را کاهش می‌دهد و بر این اساس به ازای دبی یکسان باید افت در مقایسه با همان دبی در مدل ساده بیشتر شود ولی چون در اثر خروج آب از شکاف، تراز سطح آب بالادست نیز کاهش می‌یابد بنابراین اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین دست چندان تغییر نمی‌کند. حتی در دبی‌های کم که اثر شکاف بیشتر است و دبی بیشتری از شکاف عبور می‌کند، تراز آب بالادست بیشتر کاهش پیدا کرده و افت کل از افت



شکل(۸): تغییرات درصد افت انرژی در مدل در برابر درصد دبی شکاف در مدل S۲



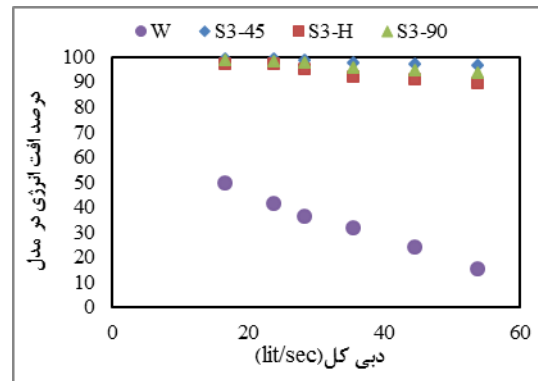
شکل(۹): تغییرات درصد افت انرژی در مدل در برابر درصد دبی در مدل S۳

مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت دبی شکاف افت در مدل افزایش می‌یابد و زوایای ۴۵ و ۹۰ بیشترین مقدار افت را ایجاد کرده‌اند. همان طور که گفته شد با افزایش افت در مدل توسط تلاقی جت‌های آب با یکدیگر در روی سرریز، میزان افتی که توسط پرش هیدرولیکی ایجاد می‌شود کاهش می‌یابد و سهم پرش هیدرولیکی از افت انرژی کل بین بالادست سرریز و پایین دست پرش کاهش می‌یابد.

#### بررسی تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش

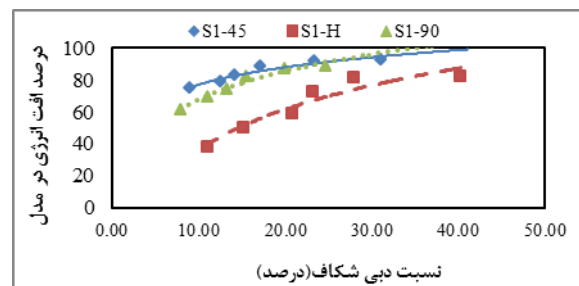
پس از انجام آزمایشات مشخص شد که نسبت اعماق مزدوج از رابطه‌ی بلانجر پیروی می‌کند ولی با این تفاوت که به دلیل افزایش اعداد فرود در مقاطع اولیه‌ی پرش در آزمایشات مربوط به سرریزهای شکاف دار، مقدار  $\frac{y_2}{y_1}$  نسبت به آزمایشات سرریز بدون شکاف کمتر می‌باشد. همچنین در مدل‌های ۴۵ درجه به دلیل افت انرژی بیشتر قبل از آغاز پرش هیدرولیکی مقدار  $\frac{y_2}{y_1}$  نسبت به مدل‌های دیگر کمتر می‌باشد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ تغییرات نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  در برابر

دبی کل برای مدل S۱ رسم شده است.



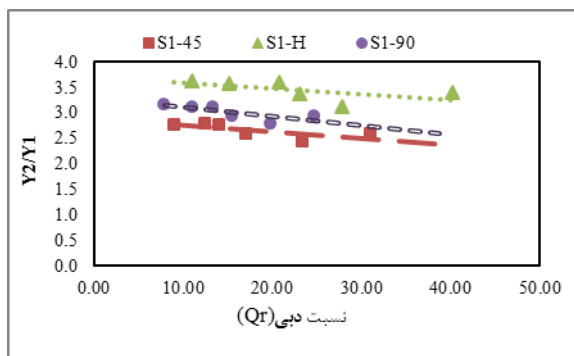
شکل(۶): تغییرات نسبت افت انرژی در مدل به افت انرژی کل در برابر دبی کل در مدل S۳

منظور از نسبت انرژی در نمودارهای ۴ تا ۶، عبارت است از نسبت افت ایجاد شده در مدل که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن توضیح داده شد به افت کل بین بالادست مدل و پایاب پرش. مشاهده می‌شود که بیشترین تأثیر را بر افزایش افت مدل، ترکیب جریان با زاویه‌ی ۴۵ درجه سپس ۹۰ درجه و در انتها زاویه افقی دارد و در کل طبق اشکال با افزایش دبی میزان افزایش افت در مدل کمتر می‌شود که این نیز به دلیل کاهش اثر شکاف با افزایش دبی می‌باشد چون با افزایش دبی کل و عمق آب روی سد، جریان عبوری از روی سرریز موجب پس‌زدگی جریان خروجی از شکاف شده و دبی شکاف را کاهش می‌دهد، همچنین چون دبی عبوری از سرریز با ارتفاع آب به توان ۱/۵ رابطه مستقیم دارد ولی دبی عبوری از شکاف با توجه به فرمول روزنه با ارتفاع آب به توان ۰/۵ رابطه دارد. بنابراین با افزایش تراز سطح آب، میزان دبی عبوری از روی سرریز نسبت به دبی شکاف بیشتر شده و بنابراین اثر شکاف در عبور دبی کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی نمودارها مشخص می‌شود که مدل S۳ بیشترین نسبت افت انرژی را دارد چون در این مدل ابعاد شکاف بزرگتر بوده و در نتیجه نسبت دبی شکاف بیشتر است، بنابراین با افزایش نسبت دبی شکاف میزان افت در مدل افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۷ تا ۹ این نکته برای مدل S۳ نشان داده شده است.

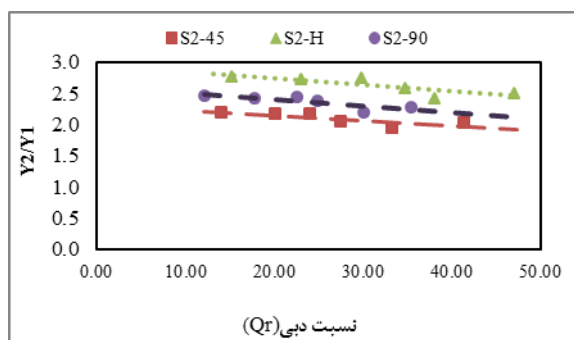


شکل(۷): تغییرات درصد افت انرژی در مدل در برابر درصد دبی در مدل S۱

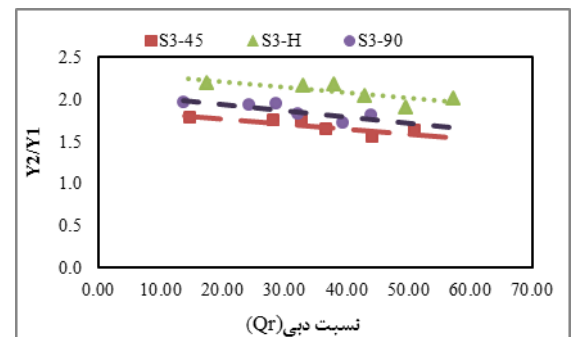
می‌یابد و به ازای نسبت‌های یکسان مدل‌های ۴۵ درجه کمترین مقدار نسبت اعماق مزدوج را دارد.



شکل (۱۳): نسبت اعماق مزدوج در برابر درصد دبی در مدل S1

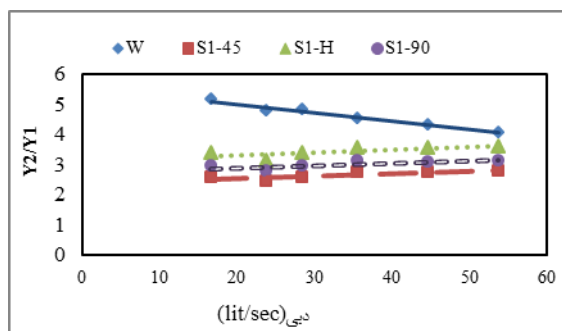


شکل (۱۴): نسبت اعماق مزدوج در برابر درصد دبی در مدل S2

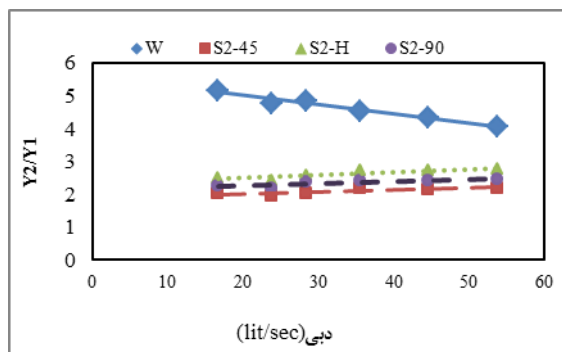


شکل (۱۵): نسبت اعماق مزدوج در برابر درصد دبی در مدل S3

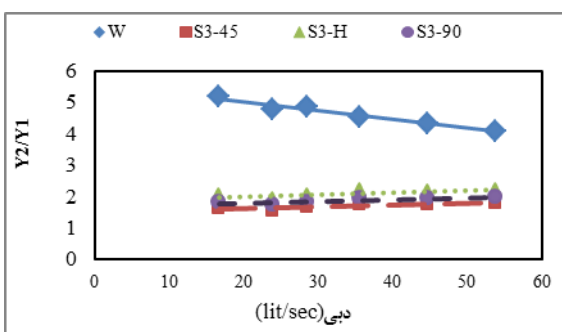
با توجه به بحث‌های مطرح شده در مورد اعماق مزدوج معلوم شد که تلاقی خطوط جریان با زاویه ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق ثانویه و نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  دارد. همچنین هر چه دبی عبوری از شکاف بیشتر شود اثر ترکیب خطوط جریان بر کاهش عمق مزدوج زیادتر می‌گردد. با استفاده از تئوری باکینگهام می‌توان با استفاده از پارامترهای مؤثر در این نوع جریان اعداد بدون بعدی ساخت که بتوان در ساخت مدل و بررسی شرایط جریان، از آن‌ها به کار گرفته شود. با انتخاب درست پارامترها می‌توان بهینه‌ترین



شکل (۱۰): نسبت اعماق مزدوج به دبی در مدل S1



شکل (۱۱): نسبت اعماق مزدوج به دبی در مدل S2



شکل (۱۲): نسبت اعماق مزدوج به دبی در مدل S3

در نمودارهای ۱۰ تا ۱۲، W نتایج آزمایشات سرریز بدون شکاف می‌باشد. با استفاده از شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشخص می‌شود که به ازای دبی‌های یکسان ترکیب جریان باعث کاهش نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  می‌شود و در هر سه مدل  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  زاویه ۴۵ درجه کمترین مقدار  $\frac{y_2}{y_1}$  را دارا می‌باشد. همچنین با افزایش دبی فلوم میزان کاهش نسبت اعماق مزدوج کمتر شده و مقادیر  $\frac{y_2}{y_1}$  در سرریزهای شکاف‌دار به مقادیر سرریز بدون شکاف نزدیک می‌شود. دلیل این امر کاهش اثر شکاف در اثر کاهش درصد دبی شکاف با افزایش دبی فلوم است. با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت دبی عبوری از شکاف سرریز، نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  کاهش

کاربرد ۹۰ درصد از داده‌ها به صورت زیر به دست آمد از ۱۰ درصد دیگر داده‌ها برای صحت سنجی روابط استفاده شد.

$$\frac{y_{2m}}{y_{1w}} = aFr_{1w}^b + c\sqrt{Qr} \quad (۶)$$

در این رابطه  $Qr$  نسبت دبی شکاف می‌باشد و از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$Qr = \frac{Qt - Qo}{Qt} \quad (۷)$$

که در آن  $Q_t$  دبی کل جاری شده در فلوم و  $Q_o$  میزان دبی جاری شده از روی سرریز است که از طریق معادله‌ی دبی اشل که در شکل (۳) به دست آمد با استفاده از عمق آب پشت سرریز محاسبه می‌شود. همچنین منظور از  $Fr_{1w}$  عدد فرود در مقطع اولیه‌ی پرش در آزمایشات سرریز بدون شکاف، و منظور از  $y_{2m}$  عمق ثانویه‌ی پرش در پایین دست سرریزهای شکاف دار و  $y_{1w}$  عمق اولیه‌ی پرش در پایین دست سرریز بدون شکاف می‌باشد. ضرایب  $a$ ،  $b$  و  $c$  در زوایای مختلف تلاقی خطوط جریان به شرح زیر است.

جدول (۲): ضرایب  $a$ ،  $b$  و  $c$  و نیز  $R^2$  در رابطه‌ی (۶) برای زوایای برخورد مختلف

زاویه شکاف	a	b	c	$R^2$
$\alpha=0$	۱/۴۵۶	۱/۱۰۰	-۴/۲۹۱	۰/۸۲۶
$\alpha=۴۵$	۱/۳۰۸	۱/۰۵۲	-۳/۴۹۵	۰/۸۷۳
$\alpha=۹۰$	۱/۴۰۰	۱/۰۴۹	-۴/۰۴۶	۰/۸۷۵

به منظور صحت سنجی رابطه‌ی فوق در هر زاویه با استفاده از داده‌هایی که در تعیین رابطه استفاده نشده بود نمودارهای مقادیر تئوری و آزمایشگاهی در برابر یکدیگر رسم شد.

نسبت‌ها را به وجود آورد. در رابطه‌ی ۳ پارامترهای مؤثر در طول و نسبت اعماق مردوج بیان شده است.

$$L_j = F(y_1, y_2, L_j, L_r, B, Qr, \theta, V_1, t, \rho, \mu, g) = 0 \quad (۳)$$

$Qr$  نسبت دبی شکاف به دبی کل و  $\theta$  زاویه‌ی خروج آب از شکاف می‌باشد. با در نظر گرفتن متغیرهای  $y_1$  و  $V_1$  و  $\mu$  به عنوان متغیرهای تکراری، اعداد بی بعد زیر به دست می‌آید.

$$\pi_3 = \frac{\rho V_1 y_1}{\mu} = Re, \quad \pi_2 = \frac{L_j}{y_1}, \quad \pi_1 = \frac{y_2}{y_1}$$

$$\pi_5 = \frac{Lr}{y_1}, \quad \pi_4 = \frac{g y_1}{v^2} = \frac{1}{\sqrt{Fr_1}}$$

$$\pi_9 = Qr, \quad \pi_8 = \theta, \quad \pi_7 = \frac{B}{y_1}, \quad \pi_6 = \frac{t}{y_1}$$

$$\pi_{6,7} = \frac{t}{B} \text{ از تقسیم } \pi_6 \text{ بر } \pi_7 \text{ داریم}$$

پارامتر  $\pi_{۷,۶}$  نسبت ابعاد شکاف سرریز می‌باشد. با توجه به اینکه جریان ایجاد شده از نوع متلاطم بوده ( $133400 < Re < 16700$ ) لذا نیروهای لزجت نسبت به اینرسی کم بوده و تأثیری در حرکت جریان ندارند، لذا از این ترم صرفه نظر می‌کنیم. با این تفاسیر توابع مورد نظر در پرش هیدرولیکی در مدل ترکیبی سرریز شکاف به صورت زیر استخراج می‌گردد:

$$\frac{L_r}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = F(Fr_1, \frac{t}{B}, \theta, Qr) \quad (۴)$$

با توجه به این که نسبت دبی شکاف تحت تأثیر ابعاد شکاف و هد روی سرریز می‌باشد، بنابراین  $Qr$  به طور غیر مستقیم شامل نسبت ابعاد شکاف نیز می‌باشد، بنابراین می‌توان به جای آن تنها نسبت دبی شکاف را قرار داد.

$$\frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = F(Fr_1, Qr, \theta) \quad (۵)$$

رابطه‌ی نسبت  $\frac{y_{2m}}{y_{1w}}$  با نسبت دبی شکاف و عدد فرود

در هریک از زوایای برخورد با برازش بهترین منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار spss-17 و نیز با



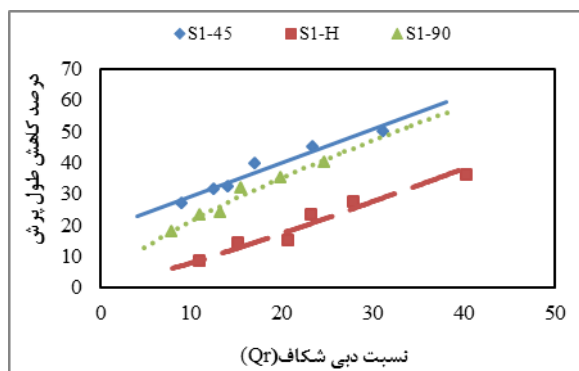
جدول (۳): مقادیر میانگین کاهش عمق مزدوج پرش

میانگین درصد کاهش عمق مزدوج پرش	میانگین درصد دبی شکاف	زاویه ی برخورد (α)
۱۹	۳۱	۰
۲۷	۴۵	۴۵
۲۳	۲۳	۹۰

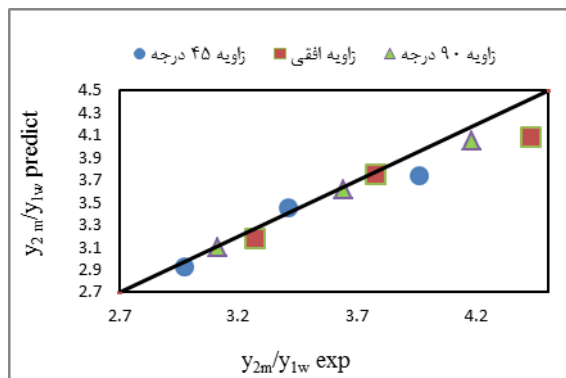
همان طور که از جدول ۳ پیداست زاویه ی ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق مزدوج داشته و زاویه ی افقی بیشترین نسبت دبی را از خود عبور داده است.

### بررسی تغییرات طول پرش در اثر تلاقی خطوط جریان

پس از انجام آزمایشات به منظور مقایسه ی طول های پرش با یکدیگر نمودارهای درصد کاهش طول پرش نسبت به پارامترهایی مانند دبی فلوم، نسبت دبی شکاف و عدد فرود رسم شد. مشاهده شد که مدل های ۴۵- $S_1$  بیشترین تأثیر را بر روی کاهش طول پرش دارند و زاویه ی ۹۰ درجه و افقی تأثیر کمتری بر روی کاهش طول پرش داشته اند. با افزایش دبی فلوم، میزان کاهش طول پرش کمتر می شود که این نیز به دلیل کاهش دبی شکاف در اثر افزایش دبی جاری شده در فلوم می باشد، چون با کاهش دبی شکاف، اثر جت آب خروجی از شکاف بر روی کاهش سرعت آب رسیده به پنجه ی سرریز کمتر می شود و در نتیجه افزایش عمق اولیه پرش کاهش می یابد. به منظور بررسی میزان آب عبوری از مجرای تحتانی بر کاهش طول، نمودارهای درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف رسم شد. در شکل های ۱۸ تا ۲۰ درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف برای هر سه مدل رسم شده است.



شکل (۱۸): تغییرات درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف (Qr) در مدل S1



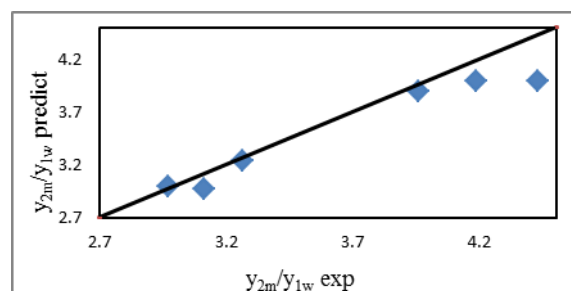
شکل (۱۶): ارزیابی رابطه برآورد عمق ثانویه

همان طور که مشاهده می شود، مطابقت بسیار خوبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده های آزمایشگاهی وجود دارد که نشان دهنده ی دقت بالای مدل می باشد. در این نمودار خط ترسیم شده خط ۴۵ درجه می باشد. همچنین به منظور برآورد رابطه کلی که شامل زاویه در رابطه باشد با استفاده از نرم افزار spss با ۹۰ درصد داده ها معادله کلی به دست آمد اما با توجه به این که تنها ۳ زاویه ی برخورد در آزمایشات استفاده شد دقت آن نسبت به روابط فوق کمتر است.

$$\frac{y_{2m}}{y_{1w}} = 1.39 F r \eta W^{1.065} - 3.392 \sqrt{Qr} (1 + \sin(\alpha))^{0.365} \quad (۸)$$

$$R^2 = 0.803$$

به منظور ارزیابی آن نیز با استفاده از ده درصد باقی مانده ی داده ها نمودار داده های مدل در برابر داده های آزمایشگاهی رسم شد.



شکل (۱۷): ارزیابی رابطه کلی عمق ثانویه

از شکل ۱۷ مشخص است که مطابقت بسیار خوبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده های آزمایشگاهی وجود دارد که نشان دهنده ی دقت بالای مدل می باشد. به طور کلی میانگین کاهش عمق مزدوج پرش هیدرولیکی در دبی های مختلف بر اساس میانگین دبی عبوری از شکاف در جدول زیر داده شده است.



شکل (۲۳): تغییرات نسبت طول پرش به عمق اولیه در برابر درصد دبی شکاف در مدل S<sub>۳</sub>

در تمام آزمایشات با افزایش نسبت دبی شکاف مقدار طول بی‌بعد پرش کاهش می‌آید و در این بین سرریزهای ۴۵ درجه دارای کمترین و سرریزهای داری شکاف با زاویه‌ی برخورد افقی دارای بیشترین مقدار  $\frac{L_j}{y_1}$  می‌باشند رابطه‌ی نسبت  $\frac{L_{jm}}{y_{1w}}$  با نسبت دبی شکاف و عدد فرود در هر یک از زوایای برخورد با برآزش بهترین منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار spss-17 و تنها با ۹۰ درصد از داده‌ها به صورت زیر به دست آمد.

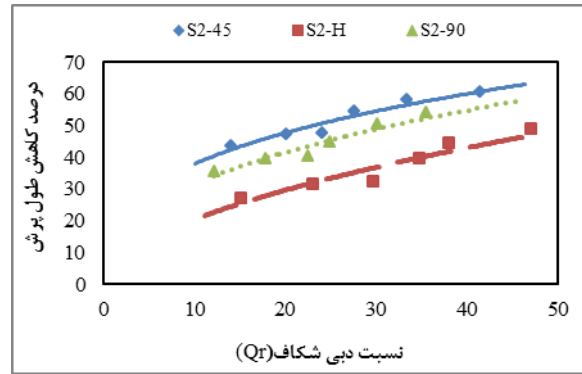
$$\frac{L_{jm}}{y_{1w}} = a(Fr_{1w} - 1)^b + c\sqrt{Qr} \quad (9)$$

ضرایب a, b, c در زوایای مختلف تلاقی خطوط جریان به شرح زیر است.

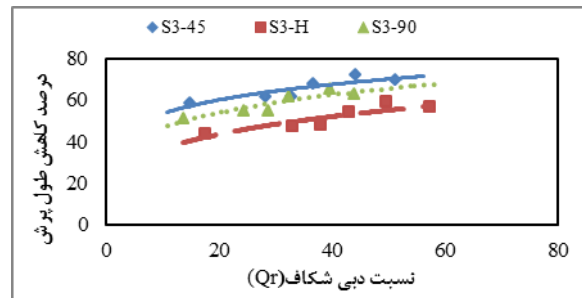
جدول (۴): ضرایب a, b, c و نیز R<sup>۲</sup> در رابطه‌ی (۹) در زوایای برخورد مختلف

زاویه‌ی شکاف	a	b	c	R <sup>۲</sup>
α=۰	۲۱/۰۵۸	۰/۹۷۷	-۶۰/۲۲۰	۰/۸۳۰
α=۴۵	۱۶/۴۸۵	۰/۹۶۷	-۵۱/۴۱۲	۰/۸۶۷
α=۹۰	۱۸/۵۴۴	۰/۹۴۵	-۵۸/۱۴۳	۰/۸۷۰

به منظور ارزیابی رابطه‌ی ۹ در هر زاویه با استفاده از داده‌هایی که در تعیین رابطه استفاده نشده بود نمودارهای مقادیر تئوری و آزمایشگاهی در برابر یکدیگر رسم شد.



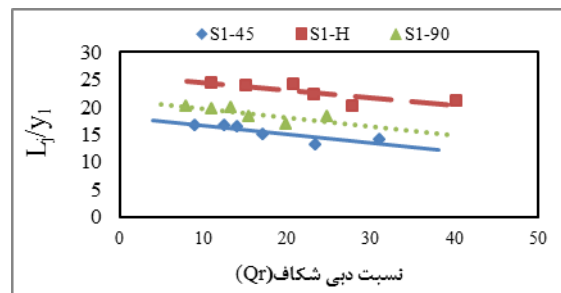
شکل (۱۹): درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف (Qr) در مدل S<sub>۲</sub>



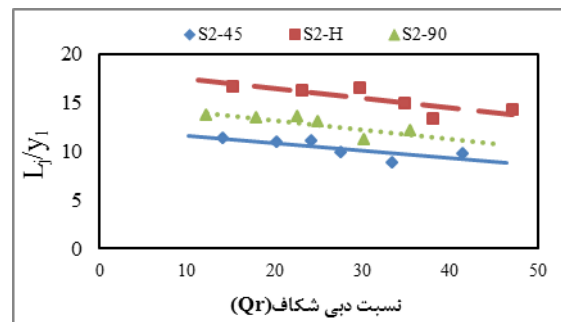
شکل (۲۰): درصد کاهش طول پرش در برابر نسبت دبی شکاف (Qr) در مدل S<sub>۳</sub>

به منظور مقایسه‌ی طول بی‌بعد پرش نمودارهای  $\frac{L_j}{y_1}$  در

برابر نسبت دبی شکاف در شکل‌های ۲۱ تا ۲۳ رسم شد تا مقایسه‌ی بهتری صورت گیرد.



شکل (۲۱): تغییرات نسبت طول پرش به عمق اولیه در برابر درصد دبی شکاف در مدل S<sub>۱</sub>



شکل (۲۲): تغییرات نسبت طول پرش به عمق اولیه در برابر درصد دبی شکاف در مدل S<sub>۲</sub>

جدول(۵): مقادیر میانگین کاهش طول پرش

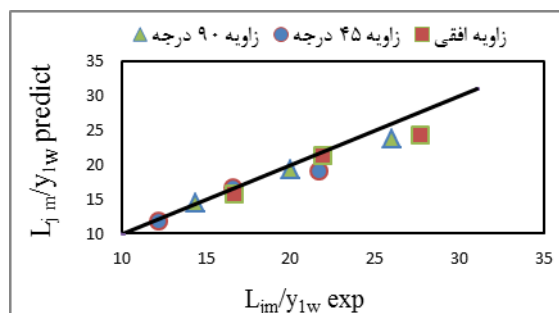
میانگین درصد کاهش طول پرش	میانگین درصد دبی شکاف	زاویه ی برخورد(α)
۳۶	۳۱	۰
۵۱	۲۶	۴۵
۴۳	۲۳	۹۰

در جدول(۵) مقادیر داده شده برای کاهش طول پرش مقادیری هستند که صرفاً از محاسبات به دست آمده‌اند ولی از آنجا که اندازه‌گیری طول پرش با توجه به ماهیت آن همواره دارای خطا می‌باشد لذا بایستی این مقادیر به صورت تقریبی در نظر گرفته شوند و به عنوان مثال گفته شود در زاویه ۴۵ درجه طول پرش حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در این مطالعه همچنین به منظور بررسی تأثیر جریان ترکیبی بر روی میزان کاهش تراز سطح آب، داده‌ها و نمودارهای درصد کاهش ارتفاع آب در برابر درصد دبی عبوری از مجرای تحتانی، ارتفاع تراز سطح آب در برابر دبی (منحنی دبی اشل) ترسیم شد. میانگین مقادیر مربوط به میزان کاهش تراز سطح آب در جدول شماره ۶ آمده است. طبق این جدول ترکیب جریان با زاویه افقی با میانگین عبور ۳۱/۴ درصد از دبی کل از طریق شکاف به‌طور میانگین ۷/۱۴ درصد نسبت به مدل بدون شکاف ارتفاع آب پشت سد را کاهش داده است.

جدول(۶): مقادیر میانگین کاهش تراز آب بالادست سرریز

میانگین درصد کاهش تراز سطح آب	میانگین درصد دبی شکاف	زاویه ی برخورد(α)
۷/۱	۳۱	۰
۶	۲۶	۴۵
۵/۳	۲۳	۹۰

همان‌طور که از جدول ۶ دریافت می‌شود در هر سه مدل  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  بیشترین درصد کاهش ارتفاع تراز سطح آب مربوط به جریان ترکیبی با زاویه ی برخورد مستقیم می‌باشد. در تمام منحنی‌های دبی اشل با افزایش دبی کل منحنی‌های مربوط به مدل‌های بدون شکاف به منحنی سرریز بدون شکاف نزدیک می‌شود، که نشان دهنده ی کاهش تأثیر شکاف در کاهش تراز سطح آب با افزایش دبی می‌باشد.



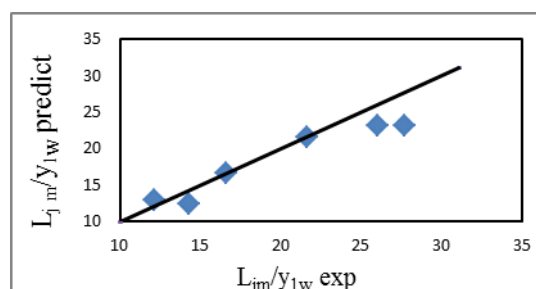
شکل(۲۴): ارزیابی رابطه برآورد طول پرش

مشاهده می‌شود که مطابقت بسیار خوبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد که نشان دهنده ی دقت بالای مدل می‌باشد. به طور کلی میانگین کاهش طول پرش هیدرولیکی در دبی‌های مختلف بر اساس میانگین دبی عبوری از شکاف در جدول زیر داده شده است. همچنین به منظور برآورد رابطه ی کلی که شامل زاویه در رابطه باشد با استفاده از نرم افزار spss با ۹۰ درصد داده‌ها معادله کلی به دست آمد اما با توجه به اینکه تنها ۳ زاویه ی برخورد در آزمایشات استفاده شد دقت آن نسبت به روابط فوق کمتر است.

$$\frac{L_{jm}}{y_{lw}} = 18.701(F\eta_W - 1)^{0.963} - 48.830\sqrt{Qr}(1 + \sin(\alpha))^{0.367} \quad (10)$$

$$R^2 = 0.804$$

به منظور ارزیابی آن نیز با استفاده از ده درصد باقی مانده ی داده‌ها نمودار داده‌های مدل در برابر داده‌های آزمایشگاهی رسم شد.



شکل(۲۵): ارزیابی رابطه کلی طول پرش

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت بسیار خوبی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد که نشان دهنده ی دقت بالای مدل می‌باشد.

## نتیجه گیری

به منظور کاهش ابعاد حوضچه آرامش و کاهش هزینه‌ها بایستی پارامترهای پرش هیدرولیکی را کاهش داد در مطالعه حاضر به منظور کاهش طول پرش هیدرولیکی و به تبع آن کاهش طول حوضچه آرامش و نیز عدم تجمع رسوبات در بالادست سد، جریان عبوری از روی سد را با جت آبی که از شکاف ایجاد شده در بدنه سد خارج می‌شد با سه زاویه‌ی مختلف و نیز دبی‌های متفاوت طلاقی داده شد و تأثیر آن روی کاهش طول پرش هیدرولیکی و عدد فرود بررسی و نتایج زیر حاصل شد.

مطالعه‌ی حاضر نشان داد جریان ترکیبی با جت ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش طول پرش و کاهش عدد فرود دارد و جریان ترکیبی با جت ۹۰ و ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق ثانویه‌ی پرش دارد. با افزایش مقدار دبی کل میزان کاهش طول پرش کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش عدد فرود نیز میزان کاهش طول پرش کمتر می‌شود. هر چه نسبت دبی عبوری از مجرای تحتانی بیشتر باشد میزان کاهش طول پرش افزایش می‌یابد، از طرفی با افزایش میزان دبی کل درصد دبی عبوری از شکاف کاهش می‌یابد.

## منابع

۱. ایلخانی پور، ر. ۱۳۸۷. بررسی عملکرد مدل ایلخانی پور برای سدهای انحرافی در حالت پنجه‌ی شیب‌دار. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. ایلخانی پور، ر. ۱۳۸۹. بررسی عملکرد مدل ایلخانی پور برای سدهای انحرافی بدون پایه و با تکیه‌گاه‌های عریض در بالای تاج. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
۳. حسینی، م. و ج. ابریشمی. ۱۳۸۴. هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ نهم، ۶۱۳ صفحه.
4. Azhdary moghaddam, M. 1997. The hydraulics of ogee-stepped spillway profile. P.H.D thesis, Ottawa, Canada.
5. Chanson, H. and J.S. Monthes. 1998. Over flow characteristics of circular weirs: Effects of inflow conditions. J. Irrig. and Drain. Eng, ASCE, 124(3): 152-161.
6. Chanson, H. 2004. The Hydraulics of Open Channel Flow. An Introduction Department of Civil Engineering The University of Queensland, Australi.
7. Chow, V.T. 1973. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill International, New York, USA.
8. Diksin, M.H. 1961. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Water Power, 13:167-172.
9. Hager, W.H. 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Pub, Netherlands.
10. Hughes, W.C. and J.E. Flack. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. J. of Hydraulic Engng, ASCE, 110(12): 1755-1771. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429(1984) 110:12 (1755).
11. Izadjoo, F. and M. Shafai-Bejostan. 2007. corrugated bed hydraulic jump stilling basin. J. of Applied Sciences, 7(8): 1164-1169.
12. Kouluseus, H.J. and D. Ahmad. 1961. Circular hydraulic jump. J. Hydraul. Div, ASCE, 105(9): 1065-1078.
13. Massey, B.S. 1966. Hydraulic jump in trapezoidal channel an improved method. Water Power, 13:232.
14. Omid, M.H., M. Esmaeeli Varaki and R. Narayaa. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. Journal of Hydraulic Research (IAHR), 45(4):512-518.
15. Posey, C.J. and P.S. Hsing. 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Eng, News – Record, p.797.
16. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. Trans. Eng. Inst, Canada, 11(A-2), 1-8.
17. Ranga Ranju, G.K. 2004. Flow Through open channels. Mc Graw Hill book Company, New Yourk.
18. Shafai- Bejostan, M. and K. Neisi. 2009. A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. Asian journal of Applied Sciences, 1: 436-445.
19. U.S. Bureau of Reclamation (USBR). 1987. Design of small dams. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

## Investigation of the head loss of ogee spillway and the length of hydraulic jump due to the confliction of the stream lines over the body of ogee spillway

M. Toozandehjani<sup>1</sup>, M. kashefipour<sup>2</sup>

### ABSTRACT

Constructing stilling basins usually are expensive, so reduction of stilling basins length is economically important. The dimensions of the stilling basin depend on the length and sequent depth of hydraulic jump. Therefore, increasing the energy loss in dam structure decreases the length and sequent depth of hydraulic jump and as a result reduces the stilling basin cost. Also in designing of diversion dam, in order to prevent the agricultural land flooding during the flood season, a smaller height of diversion dam is designed and this may produce many difficulties for upstream intake structures.

In this research study a combination of two jets in ogee dam was used, in order to increase the energy loss along the dam structure and to reduce the hydraulic jump length and sequent depth. The laboratory models of ogee dams were designed and built based on the USBR standards with a designed slot near to the toe of the dam. In these experiments the directions of the flow out of the slot were 0, 45 and 90 degrees in respect to the horizontal line. The effect of six discharge ratios (discharge from the slot to the total discharge) for each angle was investigated on the hydraulic jump length and sequent depth. The Froude Number was measured 1.5 to 4.5. The results showed that the angle 45 degrees has the maximum effect on reducing the hydraulic jump length and sequent depth, with an average discharge ratio of 26% the hydraulic jump length being reduced about 50% in comparison with the classic jump. This structure is also able to increase the total discharge coefficient.

**Key Words:** hydraulic jump length reduction, combination flow, ogee spillway, sediments evacuation, spillway discharge coefficient

---

<sup>1</sup> - Msc. Student, College of Water Science Engineering, Shahid chamran University, Ahwaz.  
Toozandeh.m.986@gmail.com

<sup>2</sup> - Professor, College of Water Science Engineering, Shahid chamran University, Ahwaz.  
kashefipour@excite.com