

بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بسترزبر و پله ناگهانی

محمد جواد نصرافهانی^{۱*}، محمود شفاعی بجزستان^۲

۱- دکتری سازه‌های آبی

۲- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

اهواز، صندوق پستی ۱۳۵

m.esfahani@scu.ac.ir

چکیده:

بررسی و تحلیل فشارهای دینامیکی یکی از مباحث مهم در مطالعه مدل‌های هیدرولیکی به شمار می‌رود. از جمله مناطق مهمی که به دلیل آشفته بودن جریان و افزایش سرعت، مطالعه نوسانات دینامیکی در آنها توصیه می‌شود حوضچه‌های آرامش می‌باشند. در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر پله معکوس با بستر زبر پرداخته شده است. این آزمایشات در محدوده بده جریان ۳۸ تا ۲۳۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۲/۹۸ تا ۱۱/۸۱ انجام گردید و تغییرات فشار دینامیکی در کف حوضچه و در محور مرکزی، و دو محور دیگر که در سمت چپ و راست محور مرکزی قرار داشتند، توسط ترانس‌دیوسر برداشت گردید. بررسی آماری فشارهای دینامیکی شامل محاسبه حداکثر، متوسط و حداقل فشار در یک پرود زمانی (۹۰ ثانیه) شامل ۳۵۶۲ نمونه در هر پیژومتر بود. در مجموع ۱۰۹ پیژومتر برای برداشت فشارهای دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد پیژومترهایی که در معرض برخورد مستقیم با جت آب قرار داشتند، دارای کمترین فشار و حتی فشارهای منفی بودند. از اینرو اندیس کاویتاسیون به منظور بررسی وقوع کاویتاسیون برای بحرانی‌ترین پیژومترها محاسبه گردید که این اندیس همواره بیش از ۲/۷۸ می‌باشد، از اینرو این سازه از نظر کاویتاسیون در معرض خطر قرار ندارد.

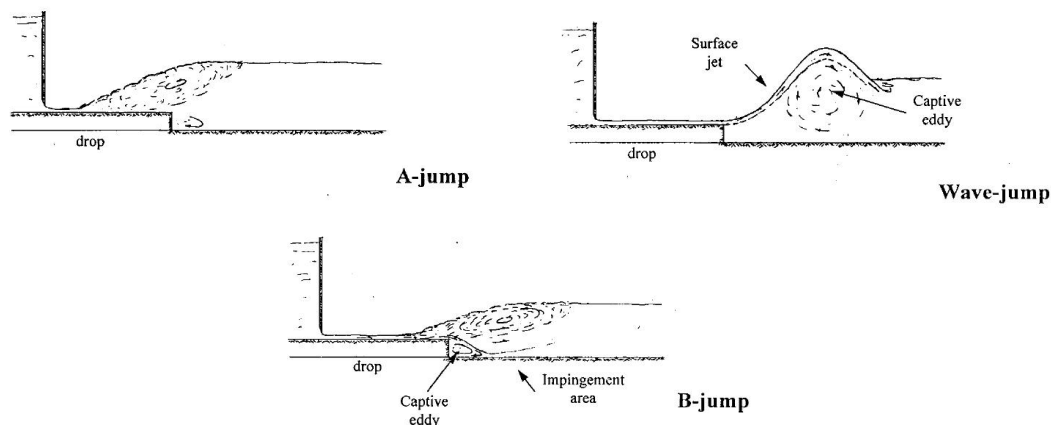
کلید واژگان: پرش هیدرولیکی، بستر زبر، پله معکوس، نوسانات فشار، کاویتاسیون

۱- مقدمه

وقتی جریان عبوری از روی سرریز به انتهای تنداب می‌رسد به دلیل سرعت زیاد در حدود ۲۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه دارای انرژی جنبشی فراوان و بسیار مخربی است، که چنانچه این جریان به رودخانه وارد شود، بستر رودخانه را کاملاً شسته و ایجاد فرسایش شدید می‌کند. به همین دلیل لازم است تا قبل از ورود جریان به رودخانه، توسط تاسیساتی خاص، انرژی جریان را مستهلک کرده و جریان آرام را به پایین دست منتقل کنیم. حوضچه آرامش یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی در پایین دست تندابها هستند که بسته به شرایط تنداب و جریان آب، از تیپ‌های مختلف و استاندارد این سازه در پروژه‌ها استفاده می‌شود. در این سازه‌ها تشکیل پرش هیدرولیکی، موجب استهلاک انرژی می‌گردد. ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی را که در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک^۱ می‌نامند که بطور وسیع توسط پترکا (۱۹۵۸)، راجاراتنام (۱۹۶۵b) و (۱۹۶۷)، هاگر و برمن (۱۹۸۹) و .. مورد بررسی قرار گرفته است. در ساختمان‌های مستهلک کننده انرژی آب یا همان حوضچه‌های آرامش، معمولاً از المان‌هایی برای کنترل پرش در حوضچه‌ها استفاده می‌شود که می‌توان به

¹ Classic Hydraulic Jump

کاربرد آنها در تثبیت، کنترل، کاهش طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی اشاره کرد. در یک حوضچه آرامش، المان‌های اصلی مختلف به صورت هندسه کف (شامل پله، آستانه و ...)، هندسه پلان (شامل انبساط تدریجی و یا ناگهانی)، ناهمواری‌های دیوار (برای افزایش نیروی برشی) و تغییر در بده جریان (به وسیله اضافه کردن موضعی آن و یا به صورت استخراج آب) می‌باشد. پله معکوس، یک تغییر در تراز کف حوضچه آرامش است که می‌تواند به عنوان یک گزینش نهایی در انتخاب حوضچه آرامش در نظر گرفته شود. در شرایطی که عمق آب در پائین دست کانال کمتر از عمق ثانویه پرش باشد، پرش به کانال وارد شده و باعث تخریب شدید در پائین دست حوضچه آرامش و نهایتاً موجب آسیب دیدگی حوضچه آرامش می‌گردد. شناخت نوع پرش هیدرولیکی تشکیل شده درون حوضچه‌های آرامش امکان طراحی مناسب حوضچه آرامش را فراهم می‌سازد. به عقیده برخی از محققین از ایجاد پرش با طول زیاد بدلیل ابعاد بزرگ مورد نیاز برای دیواره‌های حوضچه آرامش باید جلوگیری کرد. فورستر و اسکریندا (۱۹۵۰) اولین کسانی بودند که مطالعاتی را در خصوص پرش هیدرولیکی بر پله‌های معکوس انجام دادند. سپس مور و مورگان (۱۹۵۹) به بررسی این پدیده در پله‌های معکوس پرداختند. شکل (۱) انواع مختلف پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر پله معکوس را نشان می‌دهد.



شکل ۱ انواع پرش هیدرولیکی روی پله معکوس

همانگونه که در این شکل مشخص است، چنانچه عمق پایاب نسبتاً بزرگ باشد پرش در بالادست پله تشکیل خواهد شد که به پرش نوع A معروف است و با Aj نشان داده می‌شود. با کاهش عمق پایاب پاشنه پرش به سمت لبه پله حرکت می‌کند و یک موج در لبه پله مشاهده می‌شود که به پرش موجی معروف بوده و در آن ارتفاع موج نسبت به عمق پایاب بیشتر است. این پرش را با Wj نشان می‌دهند. با کاهش مجدد عمق پایاب انحنای جریان عبوری از لبه پله که در پرش موج به سمت سطح پایاب بوده عوض شده و به سمت کف کانال تغییر مسیر می‌دهد و پرش نوع B تشکیل می‌گردد. این پرش دقیقاً در محل پله تشکیل شده و با Bj نشان داده می‌شود. اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹) نیز به بررسی پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی پرداختند. هرگونه تغییر در ساختار حوضچه آرامش به طور مستقیم بر رفتار هیدرولیکی جریان تاثیر گذار است. از جمله این تغییرها می‌توان به استفاده از زبری بستر اشاره کرد که در سال‌های اخیر به منظور ارائه حوضچه‌ای اقتصادی، مورد مطالعه قرار گرفته است. زبری، مشابه بلوکهای حوضچه آرامش است با این تفاوت که بستر بالادست و پایین دست هم سطح تاج آنها می‌باشد، ضمن آنکه می‌تواند پیوسته و یا متقطع باشد، (اید و راجاراتنام ۲۰۰۲). از مطالعات انجام شده پرش هیدرولیکی بر بستر زبر و یا بستر موج دار می‌توان به مطالعات راجاراتنام (۱۹۶۸)، گیل (۱۹۸۰)، هاگنز

و فلک (۱۹۸۴)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، کارولو و همکاران (۲۰۰۷)، ایزدجو و همکاران (۱۳۸۳)، توکیای (۲۰۰۵)، پاگلیارا و همکاران (۲۰۰۸)، گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، بدیع زادگان و همکاران (۱۳۹۰) و نزندعلی و همکاران (۱۳۹۰) اشاره کرد. با توجه به گستردگی شرایط و پیچیدگی رفتار جریان در حالات مختلف و گستردگی استفاده از پله‌های معکوس، لزوم تحقیقات در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد، ضمن آنکه تغییر در بستر حوضچه باعث ایجاد تغییراتی در مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله تغییر در نوسانات فشار می‌شود که لازم است قبل از معرفی چنین حوضچه‌هایی، از نظر کاویتاسیون نیز مورد بررسی قرار گیرند، زیرا در صورت وقوع این پدیده نه تنها طرح اقتصادی نخواهد بود، بلکه موجب تحمیل هزینه‌های اضافی نیز خواهد شد. مور و مورگان (۱۹۵۹) در مطالعه خود نشان دادند که کارایی پرش نوع B از نظر استهلاک انرژی بیش از سایر پرش‌های تشکیل شده بر پله معکوس است.

۱-۱- نوسانات فشار:

یکی از مسائل مهم در علم هیدرولیک، مطالعه نوسانات فشار دینامیکی و نحوه رفتار لحظه‌ای جریان بر روی سازه می‌باشد. در مورد فشار ثابت، مشکل خاصی جهت طراحی وجود ندارد، زیرا سازه به نحوی طراحی می‌گردد که تاب مقاومت در برابر یک تنش ثابت را داشته باشد. اما در مورد فشارهای دینامیکی وارد بر قسمت‌های مختلف سازه، وضع به گونه‌ای دیگر است، زیرا در اینجا، نیرویی که بر سازه وارد می‌شود، یک نیروی ثابت نیست و متغیر است. از اینرو نیاز است در نقاطی از سازه که جریان با تلاطم و آشفتگی شدید همراه بوده و نوسانات فشار زیاد می‌باشد، فشار به صورت لحظه‌ای ثبت گردد. نوسانات فشار ناشی از ایجاد، انتشار و استهلاک گردابه‌ها در پرش هیدرولیکی در هر لحظه از زمان و هر نقطه از مکان با حالت نامشخص و تصادفی تغییر می‌نماید. اغلب مطالعات انجام شده در خصوص فشارهای دینامیکی بر روی پرش هیدرولیکی کلاسیک و حوضچه‌های آرامش استاندارد متمرکز بوده و در زمینه پرشهای هیدرولیکی بر روی بسترهای زیر و موج بجز مطالعه ایزدجو و شفافی‌بجستان (۱۳۸۳) مطالعه‌ای یافت نشد. آنها در مطالعه خود از بستر موج در بستر حوضچه استفاده کردند و نشان دادند، مقادیر ماکزیم نوسانات فشار در پرش بر روی بستر زیر نسبت به حالت کلاسیک تغییر چندانی نخواهد داشت. از مطالعات انجام شده بر نوسانات فشار در پرش هیدرولیکی یا حوضچه آرامش می‌توان به مطالعات بلایسدل (۱۹۴۳)، هارلمن (۱۹۵۵)، باسکو و آدامز (۱۹۷۱)، نارایانان و شیزاس (۱۹۸۰)، فرهودی و نارایانان (۱۹۹۱)، فرهودی (۱۹۹۳)، آرمینو و همکاران (۲۰۰۰)، گون و همکاران (۲۰۰۶)، فرهودی (۲۰۰۷ و ۲۰۰۹) و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. معمولاً در توصیف پدیده‌های تصادفی مانند نوسانات فشار از چند فاکتور مهم آماری استفاده می‌گردد که مهمترین آنها از نظر مهندسی عبارتند از: فشارهای حداکثر (P_{max})، حداقل (P_{min}) و متوسط (P_{avg})، واریانس (σ^2)، انحراف معیار بدون بعد (C'_p) و توزیع چگالی احتمال. مقدار میانگین مشخص‌کننده مبنائی است که نوسانات حول آن انجام می‌شود. در پرش هیدرولیکی مقدار متوسط نوسانات فشار تقریباً با فشار پیرومتریک و یا به عبارتی با پروفیل سطح آب در هر نقطه برابر می‌باشد، (فیورتو و رینالدو ۱۹۹۲a). در صورتیکه انحراف معیار (RMS) بوسیله ارتفاع معادل سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی بدون بعد گردد، پارامتر مهمی بنام C'_p (انحراف معیار بدون بعد) بدست می‌آید:

$$C'_p = RMS / \left[\alpha \cdot \frac{v_1^2}{2g} \right] \quad (1)$$

که در آن انحراف معیار (RMS) بر حسب متر می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$RMS = \frac{P - \bar{P}}{0.5\rho v^2} \quad (2)$$

α ضریب پروفیل سرعت که معمولاً معادل با یک فرض می‌شود، v_1 سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی و g شتاب ثقل است. معمولاً در پرش هیدرولیکی کلاسیک مقدار C'_p با افزایش x/y_1 (فاصله محل اندازه‌گیری نوسانات فشار از ابتدای پرش هیدرولیکی نسبت به عمق اولیه) افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم آن سیر نزولی پیدا می‌کند. میزان C'_p به میزان توسعه‌یافتگی جریان نیز ارتباط دارد و مقدار آن در جریان توسعه یافته کمتر می‌باشد. به عقیده بعضی محققین این کاهش ممکن است ناشی از آن باشد که اغتشاشات ناشی از تلاطم در جریانی که لایه مرزی در آن توسعه یافته باشد زودتر پراکنده می‌شود، (توسو و باورس ۱۹۸۸). پارامتر بسیار مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش اندازه حد نهایی نوسانات فشار می‌باشد. حد نهایی نوسانات فشار که مشخص کننده انحراف ماکزیمم از میانگین می‌باشد در آزمایشات مختلف در مراجع حدوداً از نظر عددی ۱۰ برابر مقدار C'_p (انحراف معیار بدون بعد) می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$C_p^\pm = \Delta P^\pm / (\alpha v_1^2 / 2g) \quad (3)$$

که در آن:

$\Delta P^\pm =$ تغییرات ارتفاع فشار ماکزیمم و مینیمم نسبت به مقدار ارتفاع فشار متوسط:

$$\Delta P^+ = P_{\max} - \bar{P} \quad (4)$$

$$\Delta P^- = \bar{P} - P_{\min} \quad (5)$$

از رابطه حد نهایی فشار مشخص است که این پارامتر به فاصله نقطه از ابتدای جهش هیدرولیکی و عدد فرود جریان بستگی دارد. با توجه به مطالب فوق مشخص است، هم افتادگی ناگهانی بستر و هم زبری بستر بر مشخصات پرش موثر است، ولی آیا تاثیر این دو پارامتر می‌تواند باعث ایجاد اثرات مخربی همچون کاویتاسیون گردد. از اینرو در این تحقیق به بررسی نوسانات فشار پرش نوع B بر پله معکوس با بستر زبر پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

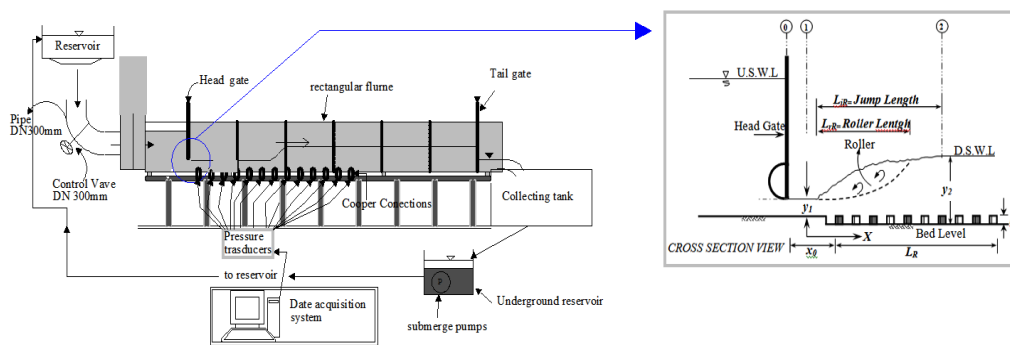
۲-۱- انجام آزمایشات و مدل فیزیکی

شکل (۲) شماتیک مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. این مدل دارای عرض ۸۰ سانتی‌متر و طول ۱۵ متر بود. در این مدل به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش، از دریچه‌ای کشویی از جنس پلکسی گلاس استفاده شد. همچنین به منظور تثبیت موقعیت پرش و ایجاد پرش آزاد دریچه‌ای کشویی در فاصله نیم‌متری از انتهای فلوم استفاده گردید. محدوده متغیرهای آزمایشگاهی بصورت جدول (۱) بود.

جدول ۱- مشخصات کانال آزمایشگاهی (فلوم)

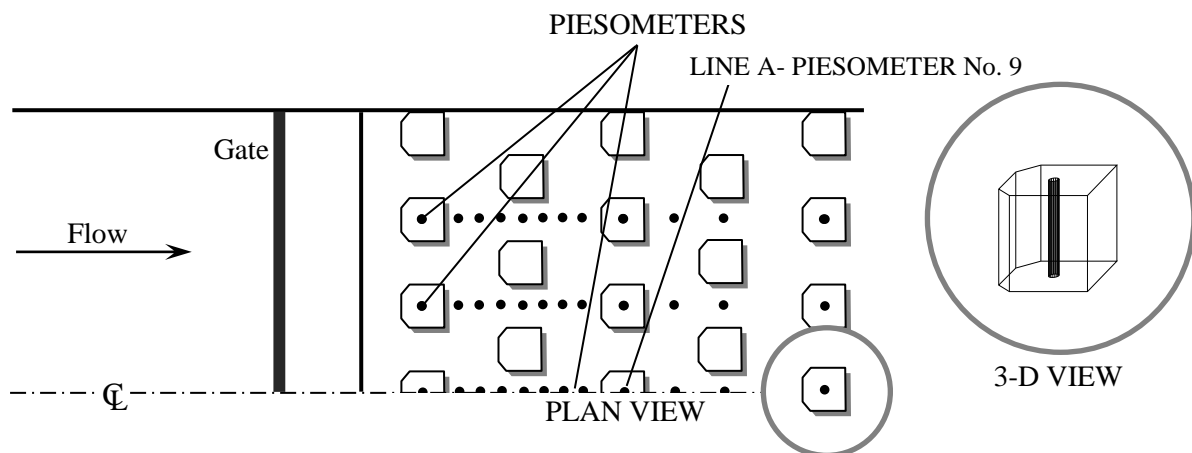
Re	محدوده متغیرهای جریان			مشخصات کلی فلوم		
	عمق اولیه جریان y_1 (cm)	Fr_1	Q(l/s)	طول (m)	ارتفاع (cm)	عرض (cm)
۶۴۷۱۳	۲/۵، ۳/۵، ۴/۵ و	تا ۲/۷۸	تا ۳۸	۱۵	۷۰	۸۰
تا ۲۵۲۷۴۷	۵/۵	۱۱/۸۱	۲۳۰			

در این تحقیق عمق پایاب همواره چنان تنظیم گردید که پرش نوع B در محل پله معکوس ایجاد گردد. روند انجام آزمایش بدین صورت بود که پس از نصب زبری‌ها (با آرایش زیگزاگ ۷-۶-۷)، پمپ روشن شده و اجازه داده می‌شد تا جریان آب به آهستگی وارد فلوم گردد. سپس به تدریج بده جریان ورودی را اضافه کرده تا به مقدار مورد نظر برسد. با تنظیم بده جریان، دریچه پایین دست نیز طوری تنظیم می‌گردید تا عمق پایاب به عمق مورد نظر رسیده و پرش هیدرولیکی دقیقاً در محل پله معکوس تشکیل گردد. این شرایط در مدت زمان کافی برای برداشت داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شد.



شکل ۲ شماتیک مقطع مدل

محدوده بده جریان در انجام آزمایشات بین ۳۸ تا ۲۳۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود جریان ورودی در محدوده ۲/۹۸ تا ۱۱/۸۱ بود. جهت اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی، یک شبکه پیزومتری در کف فلوم طراحی و نصب گردید. در این تحقیق از تعداد ۱۰۹ عدد پیزومتر جهت اندازه‌گیری نوسانات فشار استفاده شد. این پیزومترها هم در کف فلوم و هم در روی زبری‌ها نصب گردیدند، شکل (۳). برای اندازه‌گیری نوسانات فشار در کف حوضچه و روی زبری‌ها، از مبدل‌های فشار شش کاناله، کالیبره شده در محدوده ± 10 کیلوپاسکال، مدل DM5010S، ساخت شرکت Motorola استفاده گردید، شکل (۴). از جمله پارامترهایی که در آزمایشگاه باید اندازه‌گیری شود، درجه حرارت آب می‌باشد. درجه حرارت از مهمترین خصوصیات فیزیکی سیال می‌باشد. تعدادی دیگر از خصوصیات سیال نیز بستگی به درجه حرارت مایع دارد. نوک و همکاران (۲۰۱۰) دمای مناسب برای انجام کارهای آزمایشگاهی را ۲۰ درجه سانتیگراد عنوان کردند. در انجام آزمایشات سعی گردید زمانی انتخاب گردد که دمای آب این مقدار باشد.



شکل ۳ نحوه آرایش پیزومتر و زبری‌ها در کف فلوم



شکل ۴ مبدل‌های فشار

محققین مختلف فرکانس ماکزیمم نوسانات فشار را حدود ۱۰ تا ۲۰ هرتز گزارش نموده‌اند. لذا در این تحقیق فرکانس نمونه‌برداری معادل ۴۰ هرتز (۳۵۶۰ نمونه در ۹۰ ثانیه) انتخاب گردید که حدود ۲ تا ۴ برابر فرکانس غالب نوسانات فشار بوده و به این ترتیب می‌توان اطمینان داشت که سیگنال برداشت شده منطبق بر سیگنال واقعی می‌باشد. بطور کلی در انجام این تحقیق ۱۲۴ آزمایش انجام شد. شکل (۵) نیز نمونه‌ای از پرش تشکیل شده بر بستر زبر را نشان می‌دهد.

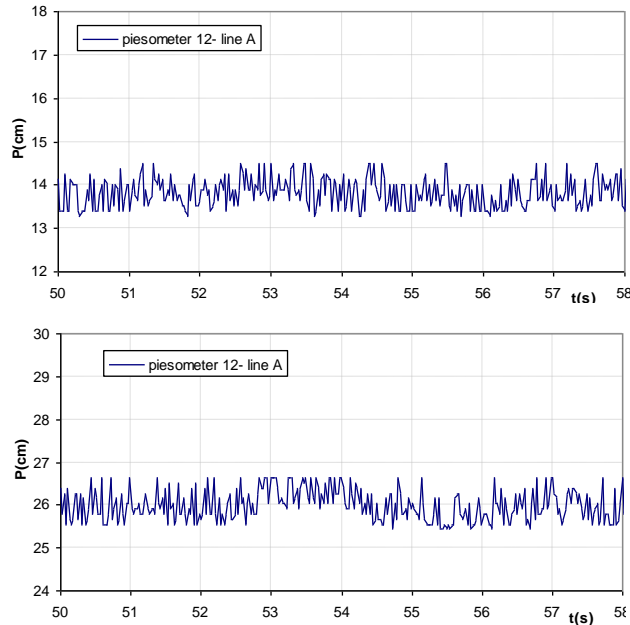


شکل ۵ نمونه‌ای از پرش تشکیل شده بر بستر زبر

۳- نتایج

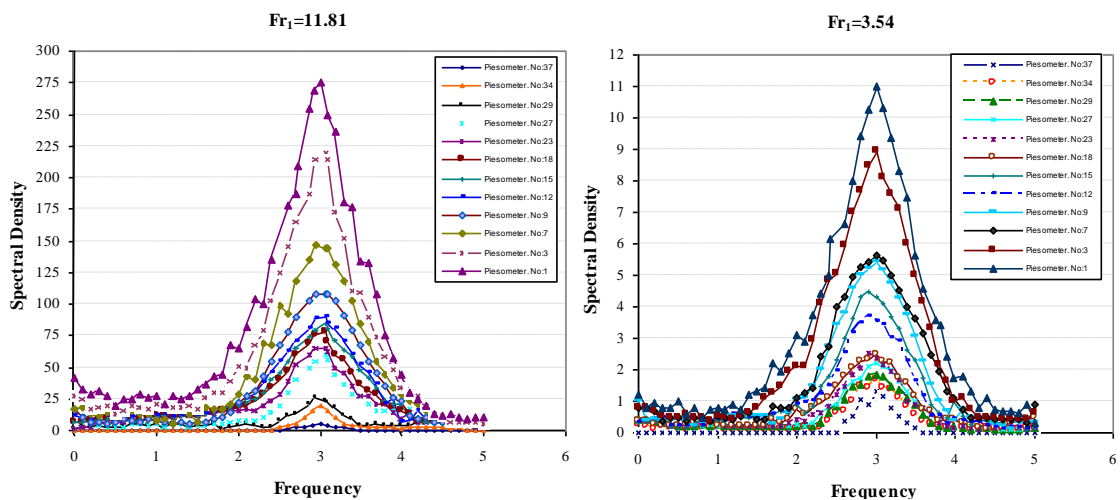
عامل مهم در برداشت اطلاعات در مدل، زمان تجمع یا مدت آزمایش برای هر نقطه است. محققین در انجام تحقیقات خود این زمان را از ۳۰ ثانیه تا چندین ساعت (بسته به ابزار اندازه‌گیری) در نظر گرفته‌اند. اما مشاهده گردیده است که مقدار انحراف معیار بدست آمده برای زمانهای بیش از ۶۰ ثانیه مستقل از زمان می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی زمان دقیق برداشت برای آزمایش‌های مختلف، نسبت به برداشت فشار تا ۴۰۰ ثانیه اقدام گردید و مشاهده شد پس از گذشت ۵۰ ثانیه، برداشت داده‌ها تقریباً ثابت می‌گردد. شکل (۶) سری زمانی مربوط مقادیر اندازه‌گیری شده فشار در پیژومتر شماره ۱۲ محور مرکزی را برای دو آزمایش نشان می‌دهد. همانگونه که از

این شکل پیداست، متوسط زمانی در هر آزمایش، پس از گذشت ۵۰ ثانیه تقریباً عدد ثابتی را نشان می‌دهد که دال بر همسانی تغییرات در طول زمان می‌باشد.



شکل ۶ نمونه‌ای از سری زمانی فشار در پیزومتر ۱۲ محور مرکزی در دو آزمایش مختلف

تابع چگالی طیفی داده‌های تصادفی، توزیع سیگنال را در ارتباط با فرکانس تعیین می‌کند و یا به عبارت دیگر تابع چگالی طیفی داده‌های تصادفی، بیانگر فرکانس تکرار داده‌ها بر حسب چگالی طیفی متوسط آنهاست. مقادیر تابع چگالی طیفی بر اساس روش FFT^2 (سری فوریه) محاسبه می‌گردد. شکل (۷) توابع چگالی طیفی سری‌های زمانی مربوط به نوسانات فشار را که با استفاده از روش FFT تهیه شده است را برای پیزومترهای مختلف و برای عدد فرود $3/54$ و $11/81$ و نشان می‌دهد. همانگونه که از این شکل مشخص می‌باشد فرکانس مقادیر چگالی طیفی ماکزیمم حدود ۳ می‌باشد.

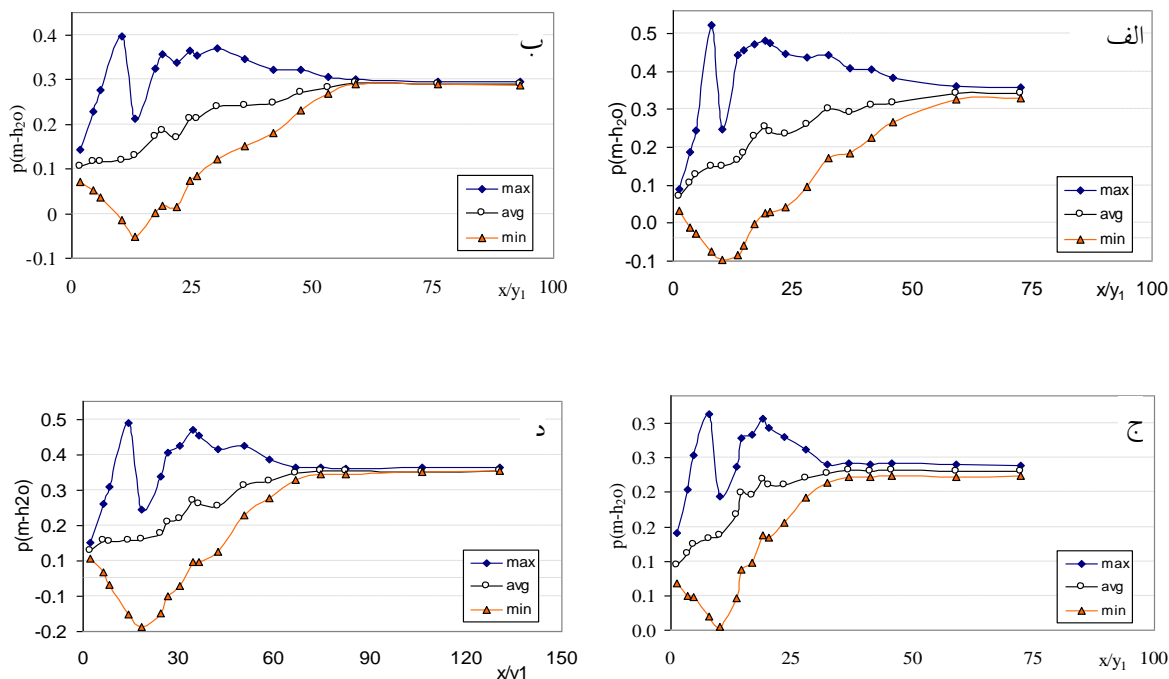


شکل ۷ تابع چگالی طیفی پیزومترهای مختلف در اعداد فرود $3/54$ و $11/81$

² Fast Fourier Transform (FFT)

۳-۱- بررسی تغییرات نسبی فشارهای ماکزیمم و مینیمم در طول پرش

شکل (۸) نمودارهای مقادیر ماکزیمم، متوسط و مینیمم فشارهای دینامیکی وارد بر محور مرکزی کف حوضچه آرامش را به صورت مقایسه‌ای، و برای تعدادی از آزمایش‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است مقادیر ماکزیمم و مینیمم از مقدار ۳۵۶۰ داده مربوط به نوسانات فشار در هر پیزومتر تعیین شده است، لذا مقدار متوسط نیز، میانگین عددی بین دو عدد ماکزیمم و مینیمم نمی‌باشد، و از بین این مقدار داده بدست آمده است.



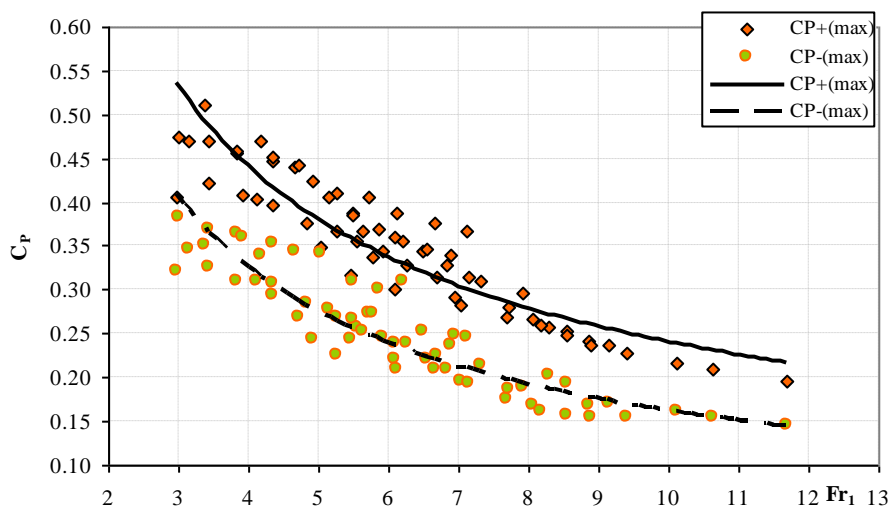
شکل ۸ تغییرات مقادیر P_{max} ، P_{avg} و P_{min} برای الف) $Q=184.32 L/S$ ، ب) $Q=125.84 L/S$ ، ج) $Q=99.5 L/S$ ، د) $Q=115.64 L/S$ ،

با توجه به شکل فوق می‌توان دریافت بدلیل بالا بودن شاخص پراکندگی نوسانات فشارهای دینامیکی در ناحیه ابتدائی حوضچه، تشکیل پرش در این ناحیه تائید می‌شود. به عبارت دیگر این پراکندگی و آشفتگی نتیجه تشکیل پرش هیدرولیکی در این منطقه می‌باشد. مقادیر متوسط فشارهای دینامیکی در کلیه آزمایش‌ها از روند یکسانی تبعیت کرده و با فشارهای استاتیکی متناظر تناسب منطقی داشتند. مقادیر ماکزیمم فشار در ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم با یک تغییر ناگهانی کاهش می‌یافت و مجدداً سیر صعودی خود را طی کرده، تا به ماکزیمم دیگری برسد. از این نقطه به بعد این مقادیر روند نزولی به خود می‌گیرد. این روند تا انتهای پرش ادامه داشته و در انتهای آن به کمترین اختلاف خود با فشارهای متوسط و مینیمم می‌رسد. مقادیر فشار مینیمم نیز با شروع پرش سیر نزولی به خود می‌گیرد تا جایی که به کمترین مقدار خود برسد. سپس روند صعودی گرفته و در انتهای پرش به کمترین اختلاف خود با مقادیر فشار متوسط و ماکزیمم می‌رسد. به طور کل می‌توان گفت با فاصله گرفتن از ابتدای پله و رسیدن به انتهای پرش، از نوسانات فشارهای دینامیکی کاسته می‌شود و مقادیر ماکزیمم و مینیمم فشارهای دینامیکی به مقادیر فشار استاتیکی متناظر خود نزدیکتر می‌شوند. همانطور که در شکل فوق مشخص است، در تمامی آزمایش‌ها در پیزومتر شماره هفت، حداکثر اختلاف بین فشارهای ماکزیمم و مینیمم اتفاق

می‌افتد. علت این امر، برخورد مستقیم جت (مستغرق) به کف حوضچه در این نقطه است که باعث افزایش شدید و ناگهانی فشار وارد بر کف در این نقطه می‌گردد. پس از آن بدلیل برخورد با زبری و تشکیل پرش، جت از کف حوضچه به سمت بالا منحرف شده و فشار وارد بر کف کاهش می‌یابد. این همان نقطه‌ای است (یعنی پیزومتر شماره ۹ محور مرکزی، که روی زبری واقع شده است) که فشارهای ماکزیمم بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود، دچار کاهش می‌گردند. با افزایش بده جریان، میزان فشار دینامیکی (نوسانات لحظه‌ای فشار) نیز افزایش می‌یابد. یعنی بیشترین مقادیر متوسط و بیشترین مقادیر ماکزیمم فشارهای دینامیکی در بده جریان حداکثر اتفاق می‌افتد. در پیزومتر شماره ۹ محور مرکزی (شکل ۳) فشار مینیمم در فاصله قابل توجهی پایین‌تر از دیگر پیزومترها در تمامی اعداد فرود قرار دارد. این فاصله با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد، به طوری که در بعضی از اعداد فرود، مقادیر منفی را نیز شامل می‌گردد.

۳-۲- بررسی تغییرات C_p^+ و C_p^- در طول حوضچه آرامش

شکل (۹) تغییرات ضرایب $C_p^+(max)$ و $C_p^-(max)$ را در طول حوضچه برای اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت مقادیر حداکثر در پرش با عدد فرود اولیه بین ۳ تا ۴/۵ که در منطقه پرش ناپایدار قرار دارند، حداکثر نوساناتشان رو به افزایش و پس از آن کاهشی می‌باشد.



شکل ۹ مقادیر حداکثر ضرایب فشار مثبت و منفی نسبت به عدد فرود

با توجه به شکل (۹) می‌توان دریافت، با افزایش عدد فرود مقدار حداکثر ضرایب C_p^+ و C_p^- سیر نزولی را طی می‌کند. دلیل این افزایش را می‌توان، افزایش سرعت اولیه، همچنین کاهش تفاوت حداکثر فشار از مقدار متوسط آن دانست.

۳-۳- بررسی پدیده کاویتاسیون

همانگونه که اشاره شد، در بعضی از اعداد فرود، فشار مقادیر منفی را نیز شامل می‌گردد. این مقادیر بیانگر احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در این قسمت از حوضچه آرامش می‌باشد. از اینرو لازم است تا وقوع پدیده کاویتاسیون در این منطقه بررسی گردد. معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمتی از یک سازه هیدرولیکی از حد ۲۰ متر در

ثانیه تجاوز کند، سازه در معرض خسارت ناشی از کاویتاسیون قرار می‌گیرد، (خاتسوریا ۲۰۰۵). اصولاً فرآیند تبخیر در اثر کاهش فشار موضعی در دمای ثابت، کاویتاسیون نامیده می‌شود. بعنوان نمونه هنگامی که به ازای افزایش سرعت جریان، فشار جریان آب تا حدود فشار بخار آب کاهش یابد شرایط آستانه یا آغاز کاویتاسیون پیش خواهد آمد. در قسمت‌های مختلف سازه، معمولاً ناهمواری‌هایی وجود دارد که ممکن است ناشی از هندسه سازه، پله‌های تیز، درزهای اجرایی، نشست‌های موضعی و یا ضعف اجرای بتن باشد. به منظور پیش‌بینی کاویتاسیون، باید موقعیت نقاطی را که در آنها ممکن است فشار تا حد فشار بخار آب نزول کنند، شناسایی نمود. در این راستا، برای دستیابی به یک معیار کمی، می‌توان معادله انرژی (معادله برنولی) را بین دو نقطه در یک جریان دائمی به صورت زیر نوشت:

$$\rho g Z_0 + P_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 = \rho g Z + P + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (6)$$

که در آن علائم بکار رفته عبارتند از: ρ = جرم مخصوص سیال، g = شتاب ثقل، v_0 ، v = سرعت در نقطه مبنا و نقطه مورد نظر و Z_0 ، Z = تراز در نقطه مبنا و نقطه مورد نظر. معادله (۵) را می‌توان به صورت بدون بعد بصورت معادله (۶) نوشت:

$$\frac{(P + \rho g Z) - (P_0 + \rho g Z_0)}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \quad (7)$$

غالباً بعلت برابری ترازهای Z و Z_0 ، از این مقادیر در جملات سمت چپ معادله (۷) صرف‌نظر نموده، خواهیم داشت:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (8)$$

که به آن پارامتر فشار و یا عدد اولر گویند. اگر ضمن تعویض علامت C_p ، به جای P ، فشار بخار مایع در دمای محیط (P_v) قرار داده شود، خواهیم داشت:

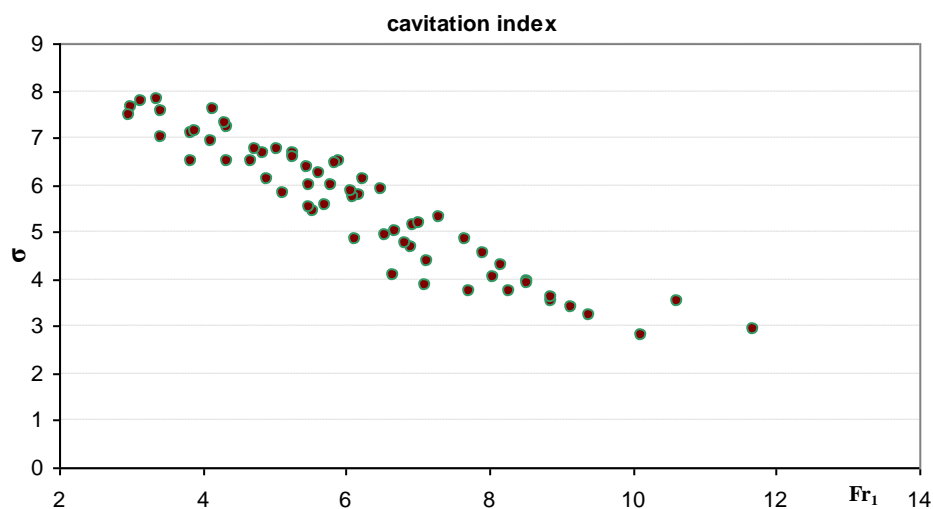
$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (9)$$

و یا:

$$\sigma = \frac{\frac{P_{Atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + \frac{P_0}{\gamma}}{\frac{v_0^2}{2g}} \quad (10)$$

در این رابطه: σ = ضریب کاویتاسیون، P_{Atm} / γ = فشار محیط اطراف می‌باشد که در شرایط آزمایشگاه معادل یک اتمسفر یا ۱۰/۳۳ متر ستون آب در نظر گرفته می‌شود، P_v / γ = مقدار فشار بخار مایع می‌باشد که در دمای حدود ۲۵ درجه سانتیگراد معادل ۰/۳۳ متر ارتفاع آب می‌باشد. در محاسبات جهت در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب، این مقدار معادل یک متر ارتفاع آب در نظر گرفته شد، P_0 / γ = مقدار فشار (فشار نظیر ارتفاع آب) که بر روی سازه در قسمت‌های مختلف اندازه‌گیری شده است و $v_0^2 / 2g$ = ارتفاع نظیر سرعت (برحسب متر) در مقطع مورد نظر می‌باشد. بنابراین σ نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب به پتانسیل کاهش فشار جریان از طریق انرژی جنبشی می‌باشد. خوردگی هنگامی آغاز می‌گردد که σ برابر و یا کوچکتر از ضریب بحرانی کاویتاسیون σ_{cr} شود. برای پله معکوس، چنانچه این ضریب $\sigma < 1$ باشد ($\sigma_{cr} = 1$)، بروز کاویتاسیون دور از انتظار نخواهد بود،

(فالوی ۱۹۹۰). با استفاده از مقادیر فشار و سرعت مورد آزمایش بازا دبی‌های مختلف مقادیر ضریب کاویتاسیون با در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت (یعنی مینیمم فشار و ماکزیمم سرعت) برای پیژومتر شماره ۹ محور مرکزی محاسبه گردید. منحنی تغییرات ضریب کاویتاسیون در شکل (۱۰) ارائه شده است.



شکل ۱۰ تغییرات ضریب کاویتاسیون در پیژومتر شماره ۹

همانگونه که ملاحظه می‌شود در بحرانی‌ترین نقطه ضریب کاویتاسیون در سازه از $2/78$ پایین‌تر نیامده است. لذا می‌توان گفت از نظر هیدرولیکی سازه با مشکل کاویتاسیون مواجه نیست.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌های متعددی در فلوم با عرض ۸۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران انجام شد. در این آزمایش‌ها از زبری با سطح مقطع شش ضلعی برای شرایط جریان متفاوت و عدد فرود جریان ورودی در محدوده $2/98$ تا $11/81$ ، مورد استفاده قرار گرفت. در طول هر آزمایش نوسانات فشارهای دینامیکی و استاتیکی در موقعیتهای مختلف زبری و برای شرایط هیدرولیکی متفاوت اندازه‌گیری شد. در مجموع تعداد ۱۲۴ آزمایش انجام گرفت. نتایج نشان داد بحرانی‌ترین منطقه پرش از لحاظ بوجود آمدن حداکثر نیروهای دینامیکی در پرش پله معکوس با بستر زبر، در منطقه با طول بی بعد $13/43 < x/y_1 < 10/44$ می‌باشد. حداکثر C_p^+ و C_p^- نیز در یک سوم ابتدایی حوضچه اتفاق افتاد. مقدار $C_p^+(max)$ و $C_p^-(max)$ نیز در آزمایشات انجام شده در محدوده $0/146$ تا $0/511$ بود. همچنین در بحرانی‌ترین نقطه، ضریب کاویتاسیون در سازه از مقدار $2/78$ کمتر نگردید، از اینرو می‌توان گفت از نظر هیدرولیکی سازه با مشکل کاویتاسیون مواجه نیست.

۵- منابع

- ۱- ایزدجو ف.، شفاعی بجستان م. و بینا م. (۱۳۸۳). "مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجدار دوزنقه‌ای شکل". مجله علمی کشاورزی ۲۷: ۱۲۲-۱۰۷.
- ۲- اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. (۱۳۷۹). "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی". نشریه استقلال ۲: ۹۷-۱۱۰.

- ۳- بدیع زادگان ر. ، اسماعیلی ک. ، فغفور مغربی م. و صانعی م. (۱۳۹۰). "مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال های آبیاری با بستر موج دار." نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۵: ۶۷۶-۶۸۷.
- ۴- نژندعلی ع. ، اسماعیلی ک. ، فرهودی ج. و راور ز. (۱۳۹۰). "تاثیر زبری های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی." نشریه آبیاری و زهکشی ایران ، جلد ۵: ۲۳۴-۲۴۱.
- ۵- نصرافهانی م. (۱۳۹۱). " تاثیر زبری‌های مصنوعی غیر ممتد بر نیروهای هیدرودینامیکی و ضخامت دال بتنی کف حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی ". رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۹۳ ص.
6. Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D. & Sadraddini, A. A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research* 3(2):109-117.
 7. Armenio, V., Toscano, P. and Fioroto, V. (2000). On the effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 38(5): 359-368.
 8. Basco, D. R. and Adams, J. R. (1971). "Drag Force on Baffle Block in Hydraulic Jumps. *J. Hydraul. Div, ASCE*, 97: 2023-2035.
 9. Bellin, A. And Fiorotto, V. (1995), Direct Dynamic Force Measurement on Slabs in Spillway Stilling Basins. *J. Hydraul. Div, ASCE*, 121: 686-693.
 10. Blaisdell, F.W. (1943). The SAF Stilling Basin. US Dept. Of Agric. Soil Conservation Service, St. Anthony Falls Hydraulic Lab., Minneapolis, USA.
 11. Carolo, F.G., Ferro, V. & Pam Palone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *J. of Hydraulic Engineering ASCE* 133(9): 989-999. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429 (2007) 133: 9(989).
 12. Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of hydraulic Engineering ASCE* 128(7): 656-663. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9429 (2002) 128:7 (656).
 13. Falvey, H. T. (1990). Cavitation in Chutes and Spillways. Engineering Monograph, No. 42, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
 14. Farhoudi, J. R. Narayanan, (1991). Force on slabs beneath hydraulic jump, ASCE, Hy.1, Jan.
 15. Farhoudi, J. (1993). Cavitations inception possibilities around baffle blocks in stilling basins. *Scientific Journal, University of Science & Industry. Tehran, Iran*
 16. Farhoudi, J. (2007). Variation of Mean Pressure around Chute Blocks of SAF Stilling Basins *Journal of Agr. Science, Tabriz University, No.4 Vol.17. (Farsi)*
 17. Farhoudi, J. (2009). Total Pressure around Chute Blocks of SAF Stilling Basins. *International Journal of Civil Engineering. Vol. 7, No. 4.*
 18. Farhoudi, J., Sadat-Helbar, S. M. & Aziz, N. (2010). Pressure Fluctuation around Chute Blocks of SAF Stilling Basins., *J. Agr. Sci. Tech. Vol. 12*
 19. Fiorotto, V. and Rinaldo, A. (1992a). Turbulent Pressure fluctuations under hydraulic jump. *J. hydraul Res., IAHR*, 30(4): 499-520.
 20. Forster J. W., & Skrinde, R. A. (1950). Control of the Hydraulic Jump by Sills. *Transactions ASCE*, 115(2415):988-991.
 21. Gill, M. A. (1980). Effect of boundary roughness on hydraulic jump. *Water Power & Dam construction*: 22-24.
 22. Gohari, A., & Farhoudi, J. (2009). The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress. *Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia*:1-9.
 23. Guven, A., Gunal, M and Abdulkadir. C. (2006), Prediction of Pressure Fluctuation on Sloping Stilling Basins Using Neural Networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 33:1379-1388.
 24. Hager, W. H., & Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: sequent depths ratio. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 27(5): 566-570.
 25. Hager, W. H., & Bretz, N. V. (1987). Hydraulic jumps at positive and negative steps. *Journal of Hydraulic Research* 24(4).
 26. Harleman, D. R. F. (1955). Effect of Baffle Piers on Stilling Basin Performance. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 42: 84-99.
 27. Hughes, W. C., & Flack, J. E. (1984). Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 110(12): 1755-1771.
 28. Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulic of spillways and energy dissipaters*. Dekker, New York.
 29. Moore, W. L., and Morgan, C.W. (1959). Hydraulic jump at an abrupt drop. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*.
 30. Mohamed Ali, H. S. (1991). Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 117(1): 83-93.

31. Narayanan, R., and Schizas, L.S. (1980). Force on Sill Forced Jump. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 106: 1159-1172.
32. Nasr Esfahani M.J and Shafai Bajestan M.(2012). "Dynamic force measurement of roughened bed B-jump at an abrupt drop". Archives Des Science Journal, Vol. 65, n. 8.
33. Nasr Esfahani M.J and Shafai Bajestan M. (2012). "Design of Stilling Basins using Artificial Roughness". Journal of Civil Engineering and Urbanism (JCEU), Vol. 2, n. 4.
34. Novak, P., Guinot, V., Jeffrey. A & Reve, D. E. (2010). *Hydraulic Modeling an Introduction*. Spon Press 270 Madison Avenue , New York, NY 10016, USA
35. Pagliara, S., Lotti, I., & Palermo, M. (2008). Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structure. Journal of Hydro-Environment Research: 29-38.
36. Peterka, A. J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering Monograph 25. US Bureau of Reclamation: Denver, Col.
37. Rajaratnam, N. (1965b). "The hydraulic jump as a wall jet." J. Hydraul. Div., ASCE. 91(5): 107-132.
38. Rajaratnam, N. (1967). "Hydraulic jumps." Advances in Hydro science, (4): 197-280.
39. Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jump on rough bed. Transactions of the Engineering Institute of Canada, 11(A-2): 1-8.
40. Tokyay, N. D. (2005). Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps. Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI, 15-19 May, Anchorage, Alaska, USA.
41. Toso, J. W. and Bowers, C. E. (1988). "Extreme Pressure in Hydraulic Jump Stilling Basin." J. Hydraul. Eng., ASCE. 114(8).

Investigation of cavitations at the roughened bed of abrupt drop stilling basin

Mohammad Javad Nasr Esfahani*

Assistant Professor Dept. of Hydraulic Structure College of Water Science Engineering Shahid Chamran University(m.esfahani@scu.ac.ir)

Mahmood Shafai-Bajestan

Professor Dept. of Hydraulic Structure College of Water Science Engineering Shahid Chamran University

Investigation of the possibility of cavitations at the bed of an abrupt drop roughened bed stilling basin was conducted by conducting a physical model and measuring the instantaneous pressure fluctuations. The tests are conducted under different Froude number ranged between 2.98 to 11.81 and discharge between 38 to 230 l/s. The pressure fluctuations were measured at basin centerline and two other lines on both left and right of centerline. The statistical analysis of pressure fluctuations including calculation of maximum, average and minimum values at any period of time (90 seconds) was done. The total numbers of peisometer were 109 and for each peisometer a total of 3562 data were available for the above mentioned time period. The analysis of results shows that the least amount of pressure or even negative pressure has been recorded on those peisometer which are located at the direct impact of the incoming jet. Therefore at these piesometers, the possibility of occurrence of cavitations was investigated by calculation of cavitations index. The computed values of cavitations indices show that all these values are greater than 2.78 and therefore there is no threat for cavitations occurrence.

Key words: Hydraulic Jump, Roughened Bed, Abrupt Drop, Pressure Fluctuations, Cavitations