

# بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زبر و پله ناگهانی

محمد جواد نصر اصفهانی<sup>1\*</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>2</sup>

1- استادیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

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

\* اهواز، صندوق پستی 135

mo.isfahani@gmail.com

**چکیده** - بررسی و تحلیل فشارهای دینامیکی یکی از مباحث مهم در مطالعه مدل‌های هیدرولیکی است. از جمله مناطق مهمی که به دلیل آشفتگی بودن جریان و افزایش سرعت، مطالعه نوسانات دینامیکی در آنها توصیه می‌شود، حوضچه‌های آرامش هستند. در این تحقیق با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر پله معکوس با بستر زبر پرداخته شده است. این آزمایش‌ها در محدوده بده جریان 38 تا 230 لیتر بر ثانیه و عدد فرود 2/98 تا 11/81 انجام شدند 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 مبدل فشار برداشت شد. بررسی آماری فشارهای دینامیکی شامل محاسبه حداکثر، متوسط و حداقل فشار در یک پرود زمانی (90 ثانیه) شامل 3562 نمونه در هر پیرومتر بود. در مجموع 109 پیرومتر برای برداشت فشارهای دینامیکی استفاده شدند. نتایج نشان داد پیرومترهایی که در معرض برخورد مستقیم با جت آب قرار داشتند، دارای کمترین فشار و حتی فشارهای منفی بودند. از این رو اندیس کاویتاسیون به منظور بررسی وقوع کاویتاسیون برای بحرانی‌ترین پیرومترها محاسبه گردید که این اندیس همواره بیش از 2/78 می‌باشد. از این رو این سازه از نظر کاویتاسیون در معرض خطر قرار ندارد.

**کلیدواژگان:** پرش هیدرولیکی، بستر زبر، پله معکوس، نوسانات فشار، کاویتاسیون.

## 1- مقدمه

در پایین‌دست تنداب‌ها هستند که بسته به شرایط تنداب و جریان آب، از انواع مختلف استاندارد این سازه در پروژه‌ها استفاده می‌شود. در این سازه‌ها تشکیل پرش هیدرولیکی، موجب استهلاک انرژی می‌شود. ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی که در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک<sup>1</sup> می‌نامند که بطور وسیع توسط پترکا (1958)، راجاراتنام (1965b و 1967)، هگر و برمن (1989) مورد بررسی قرار

وقتی جریان عبوری از روی سرریز به انتهای تنداب می‌رسد، به دلیل سرعت زیاد دارای انرژی جنبشی فراوان و بسیار مخربی است. چنانچه این جریان به رودخانه وارد شود، بستر رودخانه را شسته و فرسایش شدید ایجاد می‌کند. به همین دلیل لازم است تا قبل از ورود جریان به رودخانه، توسط تأسیساتی خاص، انرژی جریان مستهلک شده و جریان آرام به پایین‌دست منتقل شود. حوضچه آرامش یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی

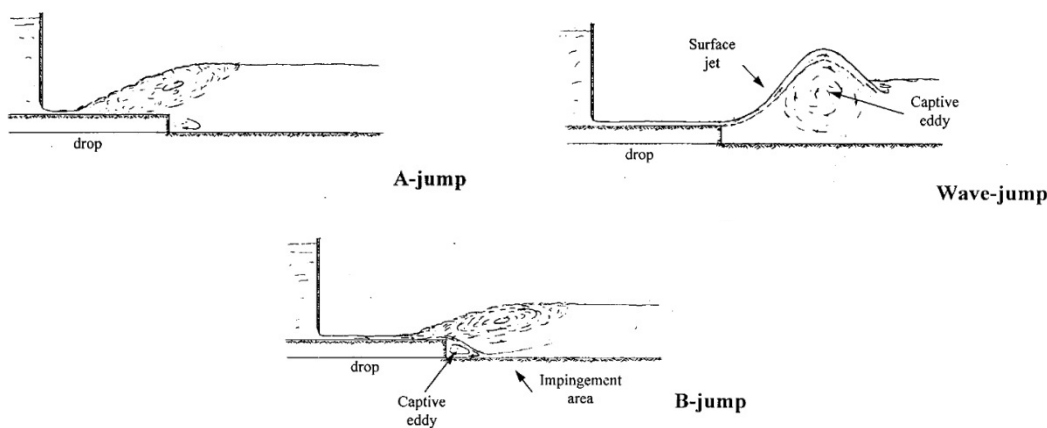
1. Classic Hydraulic Jump

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  $Wz$  نشان می‌دهند. با کاهش مجدد عمق پایاب انحناى 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 می‌شود. این پرش دقیقاً در محل پله تشکیل شده و با  $Bz$  نشان داده می‌شود. مور و مورگان (1959) در مطالعه خود نشان دادند که کارایی پرش نوع  $B$  از نظر استهلاک انرژی بیش از سایر پرش‌های تشکیل شده بر پله معکوس است. اسماعیلی و ابریشمی (1379) 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 تأثیرگذار 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 منقطع باشد، (اید و راجاراتنام (2002).

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 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 گزینه در انتخاب حوضچه آرامش در نظر گرفته شود. فورستر و اسکریندا (1950) اولین کسانی بودند که مطالعاتی را در خصوص پرش هیدرولیکی بر پله‌های معکوس انجام دادند. سپس مور و مورگان (1959) به بررسی این پدیده پرداختند. شکل 1 انواع مختلف پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر پله معکوس را نشان می‌دهد (هاگر و برتز، 1987).

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  $Az$  نشان داده می‌شود. با کاهش عمق پایاب پاشنه پرش به سمت لبه



شکل 1 انواع پرش هیدرولیکی روی پله معکوس (هاگر و برتز، 1987)

از مطالعات انجام شده در مورد پرش هیدرولیکی بر بستر زبر و یا بستر موج‌دار می‌توان به مطالعات راجاراتنام (1968)، گیل (1980)، هاگ‌هز و فلک (1984)، اید و راجاراتنام (2002)، کارولو و همکاران (2007)، ایزدجو و همکاران (1383)، توکیای (2005)، پاگلیارا و همکاران (2008)، گوهری و فرهودی (2009)، عباسپور و همکاران (2009)، بدیع زادگان و همکاران (1390) و نژندعلی و همکاران (1390) 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 نوسان‌های 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.

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 می‌شود که تاب مقاوت 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 متغیر است. از این رو 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 شود. نوسانات فشار ناشی از ایجاد انتشار و استهلاك گردابه‌ها در پرش هیدرولیکی در هر لحظه از زمان و هر نقطه از مکان با حالت نامشخص و تصادفی تغییر می‌کند. بیشتر 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 زبر و موج بجز مطالعه ایزدجو و شفاعی‌بجستان (1383) مطالعه‌ای یافت نشد. آنها در مطالعه خود از بستر موج در کف حوضچه استفاده کردند و نشان دادند مقادیر حداکثر نوسانات فشار در پرش بر روی بستر زبر 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 (1943)، هارلمن (1955)، باسکو و آدامز (1971)، نارایانان و شیزاس (1980)، فرهودی و نارایانان (1991)، فرهودی (1993)، آرمینو و همکاران (2000)، گوون و همکاران (2006)، فرهودی (2007 و 2009) و همکاران (2010) اشاره کرد. معمولاً در توصیف پدیده‌های تصادفی مانند نوسانات فشار از چند فاکتور مهم آماری استفاده می‌شود که مهم‌ترین آنها از نظر مهندسی عبارتند از: فشارهای حداکثر ( $P_{max}$ )، حداقل ( $P_{min}$ ) و متوسط ( $P_{avg}$ )، واریانس ( $\sigma^2$ )، انحراف معیار بدون بعد ( $C'_p$ ) و توزیع چگالی احتمال. مقدار میانگین مشخص‌کننده مبنائی است که نوسان‌ها حول آن انجام می‌شود. در صورتی که انحراف معیار ( $RMS$ ) بوسیله ارتفاع معادل سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی بدون بعد شود، پارامتر مهمی بنام  $C'_p$  (انحراف معیار بدون بعد) بدست می‌آید:

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

که در آن انحراف معیار ( $RMS$ ) از رابطه (2) بدست می‌آید:

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

$\alpha$  ضریب پروفیل سرعت است 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  $x/\gamma_1$  (فاصله محل اندازه‌گیری نوسانات فشار از ابتدای پرش هیدرولیکی نسبت به عمق

مدل به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش، از دریچه‌ای کشویی از جنس پلکسی‌گلاس 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 1 بود.

جدول 1 مشخصات کانال آزمایشگاهی (فلوم)

محدوده متغیرهای جریان			مشخصات کلی فلوم			
Re	عمق اولیه جریان $y_1$ (cm)	$Fr_1$	$Q$ (l/s)	طول (m)	ارتفاع (cm)	عرض (cm)
64713 تا 252747	4/5, 3/5, 2/5 و 5/5	2/78 تا 11/81	230 تا 38	15	70	80

در این تحقیق عمق پایاب همواره چنان تنظیم گردید که پرش نوع B در محل پله معکوس ایجاد شود. روند انجام آزمایش بدین صورت بود که پس از نصب زبری‌ها (شکل 3) (با سطح مقطع شش ضلعی و با آرایش زیگزاگ 7-6-7)، پمپ روشن شده و اجازه داده می‌شد تا جریان آب به آهستگی وارد فلوم شود. سپس به تدریج بده جریان ورودی اضافه شده تا به مقدار مورد نظر برسد. با تنظیم بده جریان، دریچه پایین‌دست نیز طوری تنظیم می‌شد تا عمق پایاب به عمق مورد نظر رسیده و پرش هیدرولیکی دقیقاً در محل پله معکوس تشکیل شود. این شرایط در مدت زمان برداشت داده‌ها ثابت نگه داشته می‌شد.

محدوده بده جریان در انجام آزمایش‌ها بین 38 تا 230 لیتر بر ثانیه و عدد فرود جریان ورودی در محدوده 2/98 تا 11/81 بود. برای اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی، یک شبکه پیزومتری در کف فلوم طراحی و نصب شد. در این تحقیق از تعداد 109 عدد پیزومتر برای اندازه‌گیری نوسانات فشار استفاده شد. این پیزومترها هم در کف فلوم و هم در روی زبری‌ها نصب گردیدند، (شکل 3). برای اندازه‌گیری نوسانات فشار در کف حوضچه و روی زبری‌ها، از مبدل‌های فشار شش کاناله، کالیبره شده در

اولیه) افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، 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 محققان 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 1988). 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 آزمایش‌های مختلف در مراجع حدوداً از نظر عددی 10 برابر مقدار  $C'_p$  (انحراف معیار بدون بعد) می‌باشد و از رابطه (3) 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 مؤثر است، ولی آیا تأثیر این دو پارامتر می‌تواند باعث ایجاد اثرات مخربی همچون کاویتاسیون شود؟ از این رو در این تحقیق به بررسی نوسانات فشار پرش نوع B بر پله معکوس با بستر زبر پرداخته شده است.

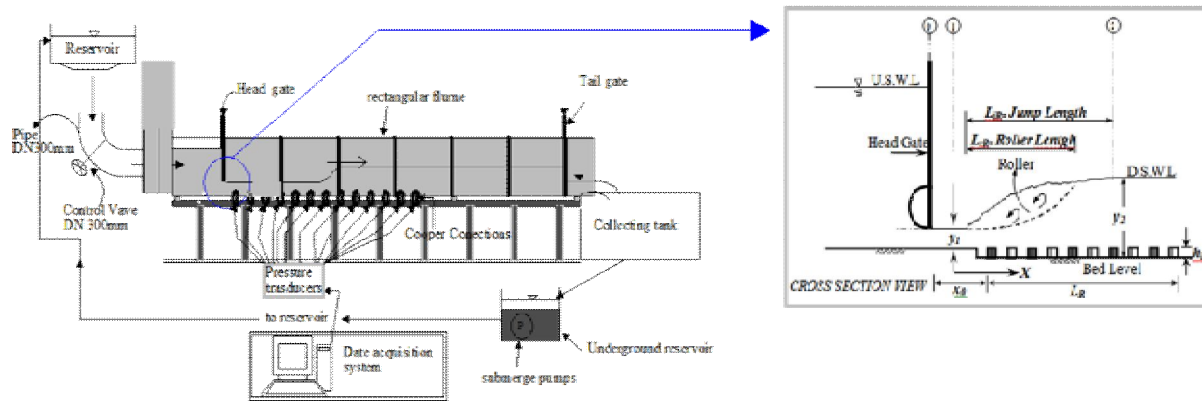
## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- انجام آزمایش‌ها و مدل فیزیکی

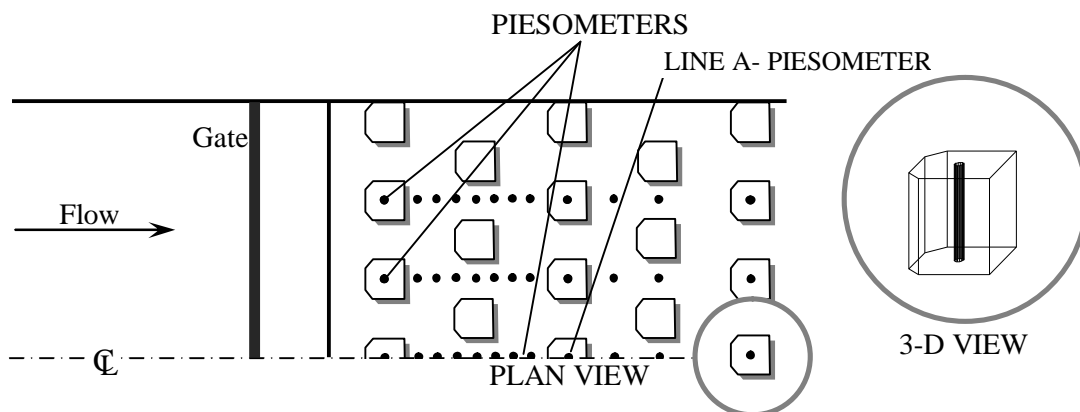
شکل 2 شماتیک مدل مورد نظر را نشان می‌دهد. این مدل دارای عرض 80 سانتی‌متر و طول 15 متر بود. در این

شود، درجه حرارت آب است که از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی سیال می‌باشد. تعدادی دیگر از خصوصیات سیال نیز بستگی به درجه حرارت آن دارد.

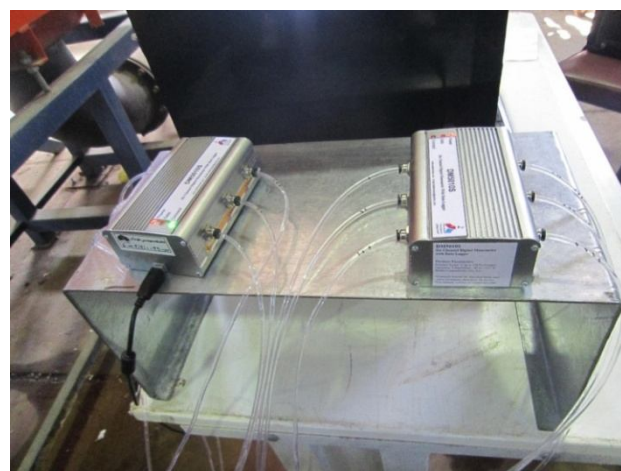
محدوده  $\pm 10$  کیلوپاسکال، مدل DM5010S، ساخت شرکت Motorola استفاده شد، (شکل 4). از جمله پارامترهایی که در آزمایشگاه باید اندازه‌گیری



شکل 2 شماتیک مدل آزمایشگاهی



شکل 3 نحوه آرایش پیزومترها و زبری‌ها در کف فلوم



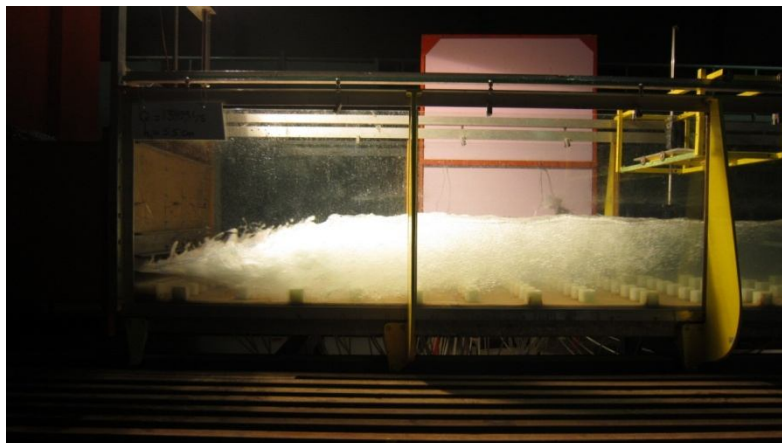
شکل 4 مبدل‌های فشار

در این تحقیق به منظور بررسی زمان دقیق برداشت برای آزمایش‌های مختلف، نسبت به برداشت فشار تا 400 ثانیه اقدام گردید و مشاهده شد پس از گذشت 50 ثانیه، برداشت داده‌ها تقریباً ثابت می‌شود. شکل 6 سری زمانی مربوط مقادیر اندازه‌گیری شده فشار در پیژومتر شماره 12 واقع بر محور مرکزی را برای دو آزمایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست، متوسط زمانی در هر آزمایش، پس از گذشت 50 ثانیه تقریباً عدد ثابتی را نشان می‌دهد که دال بر همسانی تغییرات در طول زمان است. 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  $FFT^1$  (سری فوریه) محاسبه می‌شود. شکل 7 توابع چگالی طیفی سری‌های زمانی مربوط به نوسانات فشار که با استفاده از روش FFT تهیه شده است، را برای پیژومترهای مختلف و برای اعداد فرود  $3/54$  و  $11/81$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است فرکانس مقادیر چگالی طیفی حداکثر حدود 3 می‌باشد.

نواک و همکاران (2010) دمای مناسب برای انجام کارهای آزمایشگاهی را 20 درجه سانتیگراد عنوان کردند. در انجام آزمایش‌ها سعی گردید که دمای آب این مقدار باشد. محققان مختلف فرکانس حداکثر نوسانات فشار را حدود 10 تا 20 هرتز گزارش نموده‌اند. لذا در این تحقیق فرکانس نمونه‌برداری معادل 40 هرتز (3560 نمونه در 90 ثانیه) انتخاب گردید که حدود 2 تا 4 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 124 آزمایش انجام شد. شکل 5 نمونه‌ای از پرش تشکیل شده بر بستر زبر را نشان می‌دهد.

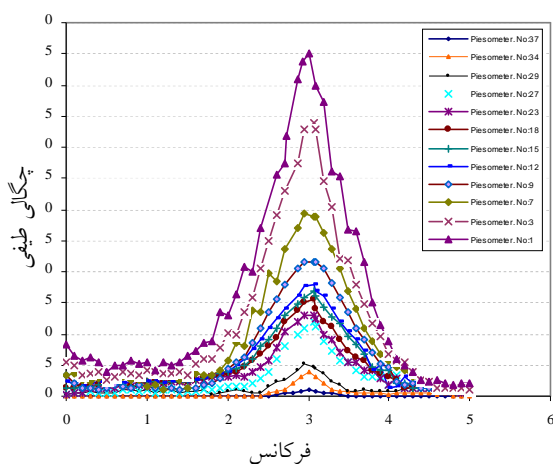
### 3- نتایج

عامل مهم در برداشت اطلاعات در مدل، مدت آزمایش برای هر نقطه است. محققان در انجام تحقیقات خود این زمان را از 30 ثانیه تا چندین ساعت (بسته به ابزار اندازه‌گیری) در نظر گرفته‌اند، اما مشاهده شده است که مقدار انحراف معیار بدست آمده برای زمان‌های بیش از 60 ثانیه مستقل از زمان است (نصرافهانی، 1391).



شکل 5 نمونه‌ای از پرش تشکیل شده بر بستر زبر

1. Fast Fourier Transform (FFT)

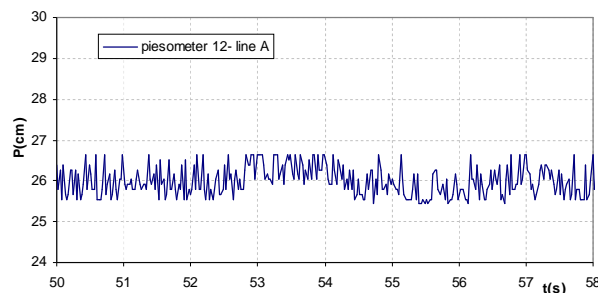
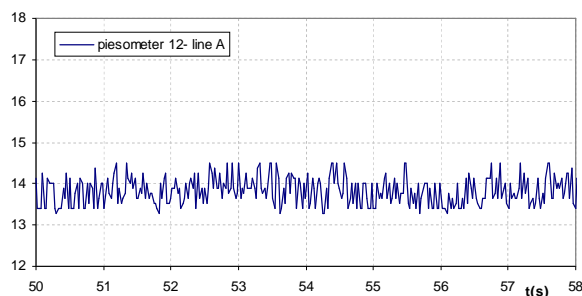


ب -  $Fr_1=11.81$

شکل 7 تابع چگالی طیفی پیزومترهای مختلف

لازم به ذکر است مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل فشار از بین 3560 داده مربوط به نوسانات فشار در هر پیزومتر تعیین شده است.

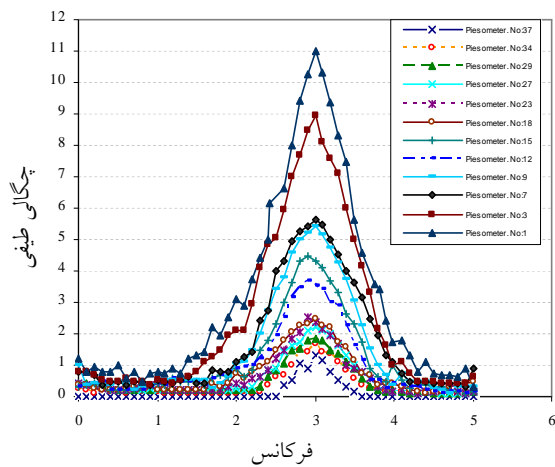
با توجه به شکل 8 می توان دریافت، به دلیل بالا بودن شاخص پراکندگی نوسانات فشارهای دینامیکی در ناحیه ابتدائی حوضچه، تشکیل پرش در این ناحیه تأیید می شود. به عبارت دیگر این پراکندگی و آشفتگی نتیجه تشکیل پرش هیدرولیکی در این منطقه است. مقادیر متوسط فشارهای دینامیکی در کلیه آزمایش ها از روند یکسانی تبعیت می کنند. مقادیر حداکثر فشار در ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر با یک تغییر ناگهانی کاهش می یافت و مجدداً سیر صعودی خود را طی کرده تا به حداکثر دیگری برسد. از این نقطه به بعد این مقادیر روند نزولی به خود می گیرد. این روند تا انتهای پرش ادامه داشته و در انتهای آن به کمترین اختلاف خود با فشارهای متوسط و حداقل می رسد. مقادیر فشار حداقل نیز با شروع پرش سیر نزولی به خود می گیرد 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 حداکثر می رسد. به طور کل می توان گفت با فاصله گرفتن از ابتدای پله و رسیدن به انتهای پرش، از



شکل 6 نمونه ای از سری زمانی فشار در پیزومتر 12 محور مرکزی در دو آزمایش مختلف

### 3-1- بررسی تغییرات نسبی فشارهای حداکثر و حداقل در طول پرش

شکل 8 نمودارهای مقادیر حداکثر، متوسط و حداقل فشارهای دینامیکی وارد بر محور مرکزی کف حوضچه آرامش را به صورت مقایسه ای، و برای تعدادی از آزمایش ها نشان می دهد.



الف -  $Fr_1=3.54$

در تمامی آزمایش‌ها در پیزومتر شماره هفت، حداکثر اختلاف بین فشارهای حداکثر و حداقل 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 می‌شود. پس از آن به دلیل 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 که فشارهای حداکثر بعد از رسیدن به حداکثر مقدار خود، دچار کاهش می‌شوند (یعنی پیزومتر شماره 9 محور مرکزی، که روی زبری واقع شده است). با افزایش بده جریان، میزان فشار دینامیکی نیز افزایش می‌یابد. یعنی بیشترین مقادیر متوسط و بیشترین مقادیر حداکثر فشارهای دینامیکی در بده جریان حداکثر اتفاق می‌افتد. در پیزومتر شماره 9 محور مرکزی (شکل 3) فشار حداقل 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 می‌شود.

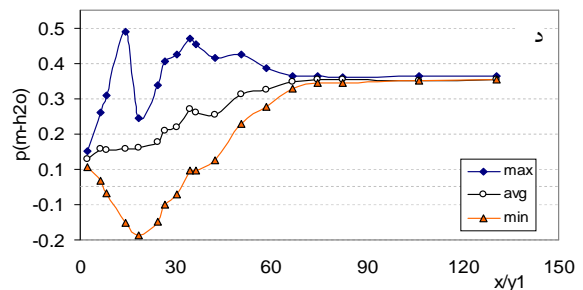
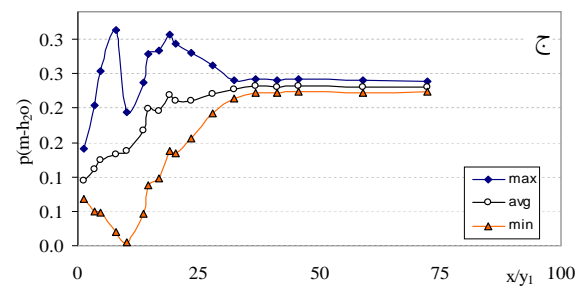
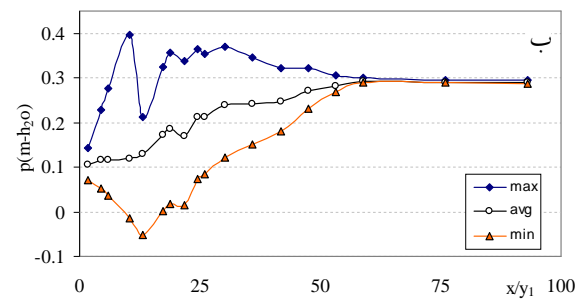
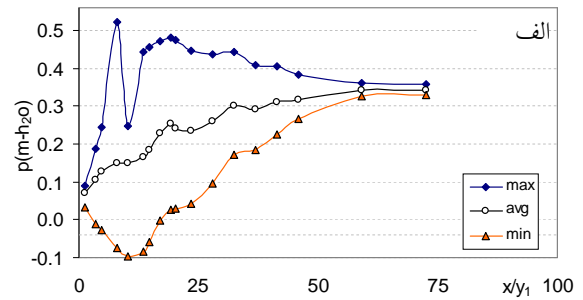
### 2-3- بررسی تغییرات $C_p^+$ و $C_p^-$ در طول حوضچه آرامش

شکل 9 تغییرات ضرایب  $C_p^+(max)$  و  $C_p^-(max)$  را در طول حوضچه برای اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل 9 می‌توان دریافت، با افزایش عدد فرود مقدار حداکثر ضرایب  $C_p^+$  و  $C_p^-$  سیر نزولی را طی می‌کند. دلیل این کاهش را می‌توان، افزایش سرعت اولیه، همچنین کاهش تفاوت حداکثر فشار از مقدار متوسط آن دانست.

### 3-3- بررسی پدیده کاویتاسیون

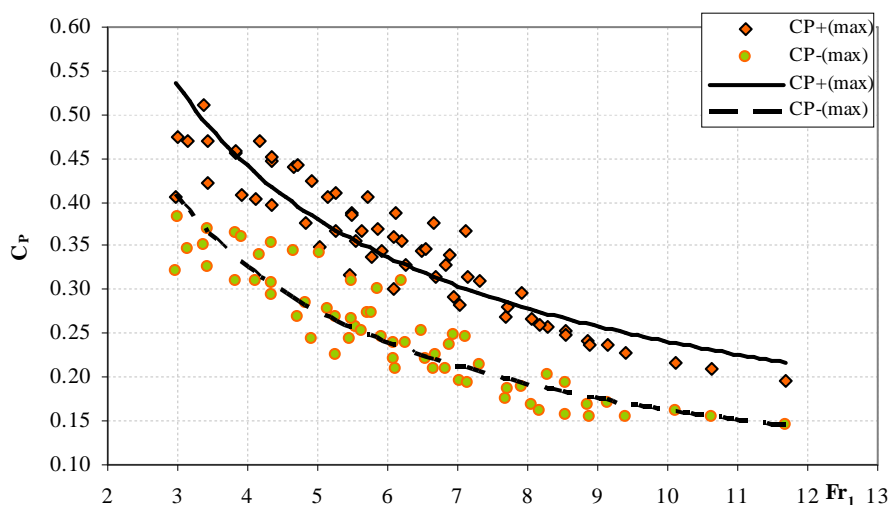
همان‌گونه که اشاره شد، در بعضی از اعداد فرود، فشار مقادیر منفی را نیز شامل می‌گردد.

نوسانات فشارهای دینامیکی کاسته می‌شود و مقادیر حداکثر و حداقل فشارهای دینامیکی به مقادیر فشار استاتیکی متناظر خود نزدیک‌تر می‌شوند.



شکل 8 تغییرات مقادیر  $P_{max}$ ,  $P_{avg}$  و  $P_{min}$  برای الف -  $Q=99.5L/S$  ج -  $Q=125.84L/S$  ب -  $Q=184.32L/S$  و د -  $Q=115.64L/S$





شکل 9 تغییرات حداکثر ضرایب فشار مثبت و منفی نسبت به عدد فرود

$$\frac{(P + \rho gZ) - (P_0 + \rho gZ_0)}{\frac{1}{2}\rho v_0^2} = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \quad (7)$$

غالباً به علت برابری ترازهای  $Z$  و  $Z_0$  از این مقادیر در جملات سمت چپ معادله (7) می‌توان صرف نظر کرد:

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

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، رابطه (9) بدست می‌آید:

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

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  $\sigma$  ضریب کاویتاسیون،  $P_{Atm}/\gamma$  فشار محیط اطراف می‌باشد که در شرایط آزمایشگاه معادل یک اتمسفر یا 10/33 متر ستون آب در نظر گرفته می‌شود،  $P_v/\gamma$  مقدار هد فشار بخار مایع است که در دمای حدود 25 درجه سانتیگراد معادل 0/33 متر ارتفاع آب می‌باشد. در محاسبات برای در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب،

این مقادیر بیانگر احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در این قسمت از حوضچه آرامش می‌باشد. از این رو لازم است تا وقوع پدیده کاویتاسیون در این منطقه بررسی شود. معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمتی از یک سازه هیدرولیکی از حد 20 متر در ثانیه تجاوز کند، سازه در معرض خسارت ناشی از کاویتاسیون قرار می‌گیرد، (خاتسوریا 2005).

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 کند، شناسایی کرد. 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:

$$\rho gZ_0 + P_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = \rho gZ + P + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (6)$$

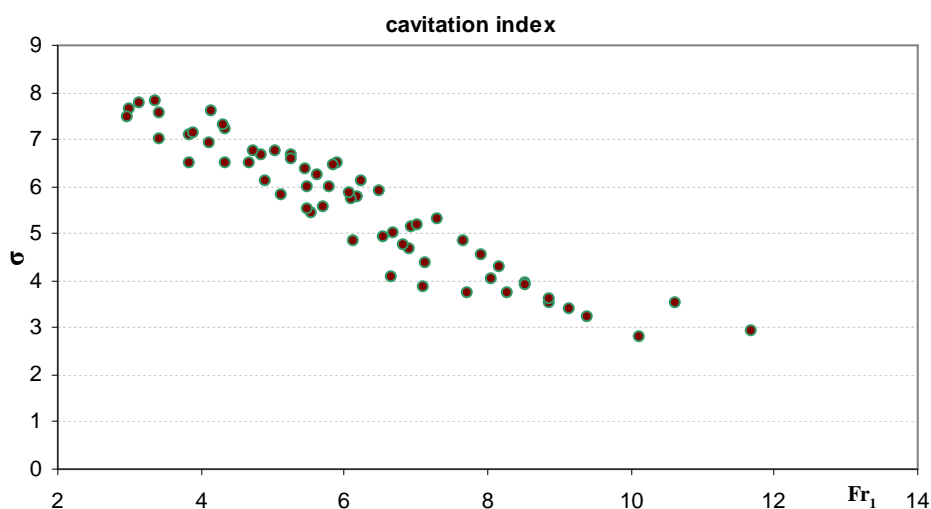
که در آن  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $g$  شتاب ثقل،  $v$ ،  $v_0$  سرعت در نقطه مبنا و نقطه مورد نظر و  $Z$ ،  $Z_0$  تراز در نقطه مبنا و نقطه مورد نظر می‌باشند. معادله (6) را می‌توان به صورت بدون بعد بصورت معادله (7) نوشت:

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌های متعددی برای بررسی جهش هیدرولیکی بر روی پله معکوس با بستر زبر 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  $11/81$ ، استفاده شد. در طول هر آزمایش نوسانات فشارهای دینامیکی و استاتیکی در موقعیت‌های مختلف زبری و برای شرایط هیدرولیکی متفاوت اندازه‌گیری شد. در مجموع تعداد 124 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  $10/44 < x/y_1 < 13/43$  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 آزمایش‌های 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.

این مقدار معادل یک متر ارتفاع آب در نظر گرفته شد،  $P_0/\gamma$  مقدار هد 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  $\sigma$  نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب است. خوردگی هنگامی آغاز می‌شود که  $\sigma$  برابر و یا کوچک‌تر از ضریب بحرانی کاویتاسیون  $\sigma_{cr}$  شود. برای پله معکوس، چنانچه این ضریب  $1 < \sigma$  باشد ( $\sigma_{cr} = 1$ )، بروز کاویتاسیون دور از انتظار نخواهد بود، (فالوی 1990). با استفاده از مقادیر فشار و سرعت مورد آزمایش بازا دبی‌های مختلف مقادیر ضریب کاویتاسیون با در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت (یعنی حداقل فشار و حداکثر سرعت) برای پیژومتر شماره 9 محور مرکزی محاسبه گردید. منحنی تغییرات ضریب کاویتاسیون در شکل 10 ارائه شده است.

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.



شکل 10 تغییرات ضریب کاویتاسیون در پیژومتر شماره 9

## 6- فهرست علائم

فروودی، ج (1386). فشار متوسط در اطراف بلوک های پای تنداب حوضچه آرامش ساف (SAF). فصلنامه دانش کشاورزی، شماره 68، ص. 17.

نژدعلی ع، اسماعیلی ک، فروودی ج. و راور ز. (1390). "تاثیر زبری های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی". نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد 5، ص.ص. 241-234.

نصراصفهانی م. (1391). "تاثیر زبری های مصنوعی غیر ممتد بر نیروهای هیدرودینامیکی و ضخامت دال بتنی کف حوضچه های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی". رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص. 293.

Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A. A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research* 3(2), pp. 109-117.

Armenio, V., Toscano, P. and Fioroto, V. (2000). On the effects of a negative step on pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 38(5), pp. 359-368.

Basco, D. R. and Adams, J. R. (1971). Drag force on baffle block in hydraulic jumps. *J. Hydraul. Div, ASCE*, 97, pp. 2023-2035.

Bellin, A. and Firoto, V. (1995). Direct dynamic force measurement on slabs in spillway stilling basins. *J. Hydraul. Div, ASCE*, 121, pp. 686-693.

Blaisdell, F.W. (1943). The SAF stilling basin. us dept. of agric. soil conservation service, st. Anthony Falls Hydraulic Lab., Minneapolis, USA.

Carolo, F.G., Ferro, V. and Pam Palone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE* 133(9), pp. 989-999.

Ead, S. A., and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 128(7), pp. 656-663.

Falvey, H. T. (1990). Cavitation in chutes and spillways. *Engineering Monograph, No. 42, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.*

Farhoudi, J. and Narayanan R., (1991). Force on slabs beneath hydraulic jump, *J. Hydraul. Div. ASCE*, 117, pp. 469-483..

Farhoudi, J., (1993). Cavitations inception possibilities around baffle blocks in stilling basins. *Scientific Journal, University of Science &*

$\alpha$	ضریب پروفیل سرعت
$C'_p$	انحراف معیار بدون بعد
$g$	شتاب ثقل
$P_{min}$	فشار حداقل
$P_{max}$	فشار حداکثر
$\bar{P}$	فشار متوسط
$P_V$	فشار بخار مایع در دمای محیط
$P_{Atm} / \gamma$	فشار محیط اطراف
$P_V / \gamma$	هد فشار بخار مایع
$\rho$	جرم مخصوص سیال
$RMS$	انحراف معیار
$v_0$	سرعت در نقطه مبنا
$v$	سرعت در نقطه مورد نظر
$v_l$	سرعت ورودی در پرش هیدرولیکی
$Z_0$	تراز در نقطه مبنا
$Z$	تراز در نقطه مورد نظر
$\sigma$	ضریب کاویتاسیون
$\sigma_{cr}$	ضریب بحرانی کاویتاسیون
$\Delta P^{\pm}$	تغییرات ارتفاع فشار حداکثر و حداقل نسبت به مقدار ارتفاع فشار متوسط

## 5- منابع

ایزدجو ف، شفاعی بجستان م. و بینا م. (1383). "مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجدار دوزنقه ای شکل". *مجله علمی کشاورزی* 27، ص.ص. 107-122.

اسماعیلی ک، و ابریشمی ج. (1379). "پرش هیدرولیکی روی کانال های با شیب معکوس و پله منفی". *نشریه استقلال* 2، ص.ص. 97-110.

بدیع زادگان ر، اسماعیلی ک، فغفور مغربی م. و صانعی م. (1390). "مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش کانال های آبیاری با بستر موج دار". *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)* 25، ص.ص. 676-687.

- Mohamed Ali, H. S. (1991). Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 117(1), pp. 83-93.
- Narayanan, R., and Schizas, L.S. (1980). Force on sill forced jump, *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 106, pp. 1159-1172.
- 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, No. 8, pp. 47-54.
- 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, No. 4, pp. 159-163.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey. A and Reve, D. E. (2010). *Hydraulic Modeling an Introduction*. Spon Press, New York, USA.
- Pagliara, S., Lotti, I., and Palermo, M. (2008). Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structure. *Journal of Hydro-Environment Research*: 29-38.
- Peterka, A. J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Engineering Monograph 25*. US Bureau of Reclamation: Denver, Col.
- Rajaratnam, N. (1965b). "The hydraulic jump as a wall jet". *J. Hydraul. Div., ASCE*. 91(5), pp. 107-132.
- Rajaratnam, N. (1967). "Hydraulic jumps." *Advances in Hydro science*, (4), pp. 197-280.
- Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jump on rough bed. *Transactions of the Engineering Institute of Canada*, 11(A-2), pp. 1-8.
- 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.
- Toso, J. W. and Bowers, C. E. (1988). "Extreme pressure in hydraulic jump stilling basin." *J. Hydraul. Eng., ASCE*. 114(8), pp. 829-843.
- Industry. Tehran, Iran
- Farhoudi, J. (2009). Total pressure around chute blocks of SAF stilling basins. *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 7, No. 4, pp. 271-279.
- Farhoudi1, J., Sadat-Helbar1, S. M. and Aziz, N. (2010). Pressure fluctuation around chute blocks of SAF stilling basins., *J. Agricultural Science Technology*, 12(2), pp. 203-212.
- Fiorotto, V. and Rinaldo, A. (1992a). Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jump. *J. Hydraul Res., IAHR*, 30(4), pp. 499-520.
- Forster J. W., and Skrinde, R. A. (1950). Control of the hydraulic jump by sills. *Transactions ASCE*, 115(2415), pp. 988-991.
- Gill, M. A. (1980). Effect of boundary roughness on hydraulic jump, *Water Power & Dam Construction*, 32, pp. 22-24.
- Gohari, A., and Farhoudi, J. (2009). The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. *33rd IAHR Congress. Vancouver, British Columbia*:1-9.
- 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, pp. 1379-1388.
- Hager, W. H., and Bremen, R. (1989). Classical hydraulic jump: sequent depths ratio. *Journal of Hydraulic Research IAHR*, 27(5), pp. 566-570.
- Hager, W. H., and Bretz, N. V. (1987). Hydraulic jumps at positive and negative steps. *Journal of Hydraulic Research*, 24(4), pp. 237-253.
- Harleman, D. R. F. (1955). Effect of baffle piers on stilling basin performance. *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 42, pp. 84-99.
- Hughes, W. C., and Flack, J. E. (1984). Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 110(12), pp. 1755-1771.
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulic of spillways and energy dissipaters*. Dekker, New York.
- Moore, W. L., and Morgan, C.W. (1959). Hydraulic jump at an abrupt drop. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Paper No: 2991, pp. 507-524