

Research Paper

Hydrodynamic Forces Analysis on Stilling Basin's Bed with Negative Step and Roughened Bed

Roozbeh Riazi*, Mahmood Shafaei-Bajestan², Heydar-Ali Kashkuli³

1. Assistant Prof. of Department of Civil Engineering, Dehdasht Branch, Islamic Azad University, Dehdasht, Iran.

2. Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3. Former Professor of Hydraulic Faculty, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.

Received: 2018/06/30

Revised: 2020/04/09

Accepted: 2020/11/14

Use your device to scan and
read the article online



DOI:

10.30495/wej.2022.3239.1166

Keywords:

Stilling Basin, negative step,
Roughened Bed.

Abstract

Introduction: In many types of hydraulic structures, a considerable portion of the kinetic energy of the flowing water must be dissipated to prevent erosion of the channel downstream from structure. Various methods of energy dissipation have been used to achieve tranquil flow conditions. One of the most effective means of accomplishing the required energy dissipation is a hydraulic jump. The hydraulic jump can assume several different forms depending on the geometry of the channel boundaries.

Methods: A negative step with abrupt drop can change length of jump, sequent depths, hydrodynamic forces and other characteristics of the hydraulic jump. Also using Bed Roughness in stilling Basins is an effective method to increase jump efficiency and decrease jump length. In the present study, combination of rough bed and negative step is used to check the effect of this combination on hydrodynamic forces in stilling basins.

Findings: The results showed that the most critical area in terms of maximum hydrodynamic forces and cavitation in this type of stilling basins can be found in $10.44 < x / y_1 < 13.43$. Where x is the distance from the beginning of the jump and y_1 is the initial depth of the jump. It is also found that Pressure fluctuations increase at a certain distance from the edge of the jump and then it will decrease to lowest level.

The experimental results here is reported, may be helpful in designing of stilling basins with negative step and roughed bed. Also, can be used for particular reference to the thickness of the concrete slabs required to ensure the stability of the linings.

Citation: Riazi R, Shafaei-Bajestan M, Kashkuli HA. Hydrodynamic Forces Analysis on Stilling Basin's Bed with Negative Step and Roughened Bed. Water Resources Engineering Journal. 2022;14 (51):99-110

***Corresponding author:** Roozbeh Riazi

Address: Department of Civil Engineering, Dehdasht Branch, Islamic Azad University, Dehdasht, Iran

Tell: +989166123911

Email: roozbehriazi@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Hydraulic-jump stilling basins are used to dissipate the high energy contained in water passing down the spillway. The energy is removed in part by the generation of large-scale turbulence and the resultant conversion of turbulence to heat. Associated with this process is the generation of large, low-frequency pressure fluctuations. The use of a vertical downwards step to control and stabilize the position of hydraulic jump is well known now. The presence of roughness in stilling basins and its effect is also well known. But the combination of both has not been in the focus.

In the present study, combination of rough bed and negative step is used to check the effect of this combination on hydrodynamic forces in stilling basins.

Materials and Methods

In present study, the experimental tests were performed in a rectangular open channel about 80 cm wide, 70 cm deep and 15 m long. The side walls of the flume were made of glass. Water was pumped from a storage tank to a head tank by two submerged pumps. Cubed elements made of hard plastic was installed on the flume's bed in such a way that the crests of the cubes were at the same level as the upstream bed. This roughness was installed in 17 rows. The supercritical flow was produced by a sluice gate. The height of step was 4.5 cm and a tailgate was used to control the tail water depth in the flume. The discharges were measured by an ultra sound flow meter which installed in inlet pipe. There were 37 copper connections with 0.006 m diameter for measuring pressure on the bed. The roughness arrayed 7-6-7 throughout bed and piezometers were installed in center of flume.

When the data collection was completed, the data sets were analyzed.

Findings

For investigating the hydrodynamic forces, the negative and positive fluctuations (C_p^+ and C_p^-) were surveyed. It is observed that variance of negative and positive

fluctuations at the beginning of the jump is sever, but as it goes further from the gate, the intensity will be decreased. The places of C_p^- max, C_p^+ max, C_p^- min and C_p^+ min drew in versus Froude number.

The result showed that C_p^- max and C_p^+ max in $Fr \leq 4$ are at the same locations. Then, these locations are parted. C_p^+ max happened in $X/Y_1=10.44$ and C_p^- max placed in $X/Y_1=3.78$. It is also observed that C_p^- min and C_p^+ min were the same locations and both of these location for $Fr > 4$ is equal $X/Y_1=59.33$.

Discussion

According to findings, the main effect of abrupt drop with rough bed is increasing of energy dissipations. One explanation for this occurrence is the development of vertical vortexes between the roughness rows which is form similar to tornado. These vortexes can reduce the kinetic energy of flow and reduce the pressure fluctuation or the C_p value.

Conclusion

In the present study, the pressure fluctuations beneath a hydraulic jump that develops over a negative step with rough bed have been investigated. The effect of roughness on hydraulic jump with negative step is obvious and these influences are decreasing energy in hydraulic jump and hydrodynamic forces on bed. The conclusion can be presented as below:

- 1-The most critical region of jump in case of cavitation for negative step with rough bed is in $X/Y_1 \approx 10.44$.
- 2-Increasing of Froude number makes amount of pressure coefficients (C_p^- , C_p^+ and C_p) greater.
- 3- C_p^- in negative step with rough bed is less than smooth bed. This phenomenon is because of vertical vortexes behind of roughness.
- 4-Maximum C_p value in negative step with rough bed and classic jump is almost equal ($C_p^- \approx 0.06$), but in negative step with rough bed is smaller and more near to the jump toe.
- 5-The pressure fluctuations in rough bed increase with increasing X from step at first, but when it reaches the highest point,

comes down. These changes happen because of increasing depth of water and therefore decreasing effect of secondary flow.

6-Maximum C_p^- and C_p^+ in abrupt drop with rough bed is closer than classic jump to the jump toe and both happened in $X/Y_1=3.78$.

7-The location of C_p^- max and C_p^+ max in negative step with rough bed, for $Fr \leq 4$ are in the same location. For $Fr > 4$ these locations will be apart. C_p^+ max in $X/Y_1=10.44$ and C_p^- max in $X/Y_1=3.78$ will be stabled.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Roozbeh Riazi, Mahmood Shafaei-Bajestan.

Methodology and data analysis: Roozbeh Riazi, Mahmood Shafaei-Bajestan, Heydar-Ali Kashkuli.

Supervision and final writing: Roozbeh Riazi.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

بررسی نیروهای هیدرودینامیکی کف حوضچه‌های آرامش با پله معکوس و بستر زبر

روزبه ریاضی^{۱*}، محمود شفاعی بجستان^۲، حیدرعلی کشکولی^۳
 ۱. استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهدشت
 ۲. استاد دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۳. استاد بازنشسته دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

مقدمه: در بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی نیاز است تا انرژی جریان مستهلک گردد تا باعث فرسایش و یا تخریب سازه نگردد. در عمل روش‌های مختلفی جهت این امر وجود دارد که از جمله آنها پرش هیدرولیکی است. پرش هیدرولیکی در حالت‌های مختلفی از هندسه کانال و شرایط آن قابل وقوع است. در اثر پایین افتادن ناگهانی کف کانال که از آن به عنوان پله معکوس نیز نام برده می‌شود، طول پرش هیدرولیکی، اعماق مزدوج پرش، فشارهای هیدرودینامیکی در کف و دیگر مشخصات آن تغییر می‌کند. همچنین با استفاده از زبری در بستر حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی می‌توان طول پرش را کاهش داد.
روش: این تحقیق با روش آزمایشگاهی انجام شد در این تحقیق شرایط پله معکوس و بستر زبر به صورت توام در پرش هیدرولیکی اعمال شده و تغییرات فشارهای هیدرودینامیکی در کف حوضچه آرامش مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بحرانی‌ترین منطقه پرش از لحاظ بوجود آمدن حداکثر نیروهای هیدرودینامیکی و کاویتاسیون در این نوع حوضچه‌های آرامش در محدوده‌ی $10.44 < x/y_1 < 13.43$ می‌باشد. که x فاصله از ابتدای پرش و y_1 عمق اولیه پرش می‌باشد. همچنین نوسانات فشار با فاصله گرفتن از لبه پرش در پرش پله معکوس با بستر زبر، ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر سیر نزولی خود را طی می‌کند.

نتیجه‌گیری: در حالت کلی بهبود نوسانات در غالب بخش‌های حوضچه آرامش از نوع پله معکوس و بستر زبر مشاهده گردید. نتایج تجربی ارائه شده می‌تواند در طراحی حوضچه آرامش با پله معکوس و بستر زبر، بر اساس ضخامت دالهای بتنی مورد نیاز برای اطمینان از پایداری پوشش‌های کف، مفید واقع شوند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۹

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2022.3239.1166

واژه‌های کلیدی:

حوضچه آرامش، پله معکوس، بستر زبر.

* نویسنده مسئول: روزبه ریاضی

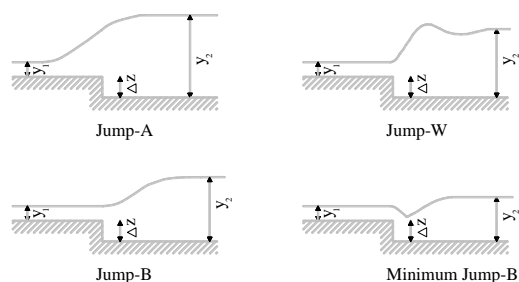
نشانی: گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دهدشت، دهدشت، ایران.

تلفن: ۰۹۱۶۶۱۲۳۹۱۱

پست الکترونیکی: roozbehriazi@yahoo.com

مقدمه

حوضچه آرامش با پله معکوس یکی از سازه های مستهلک کننده انرژی است. هدف از پایین افتادگی کف درپرش هیدرولیکی بهبود شرایط پرش و اطمینان از این امر است که پرش هیدرولیکی در محل در نظر گرفته شده و تحت کنترل اتفاق خواهد افتاد. اولین تحقیقات در رابطه با این نوع حوضچه ها توسط مور و مورگان انجام شده است. (۱۵) آنها در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که چهار حالت مختلف از پرش قابل وقوع است که در شکل ۱ مشاهده می گردد.



شکل ۱- چهار نوع پرش در حالت حوضچه آرامش با پله معکوس.

مور و مورگان در تحقیقات خود به بررسی اعماق مزدوج و سرعت در نزدیکی بستر در طول پرش در پله معکوس پرداختند و نشان دادند که برای حالات مختلف پرش نسبت سرعت بستر به سرعت پایین دست (v_b/v_2) در طول پرش، تغییرات مختلفی را با توجه به اعداد فرود و نوع پرش نشان خواهد داد (۱۵). این امر در واقع نشانگر این بود که فشارهای هیدرونیامیکی در کف فلووم و در طول آن رفتار متفاوتی از فشارهای هیدرواستاتیکی (پروفیل سطح آب) خواهند داشت. جی جی شارپ به بررسی شرایط هیدرولیکی بر پله معکوس با حالت لبه گرد و مقایسه آن با پله معکوس با لبه تیز پرداخت (۱۸). او نشان داد مقدار عمق پایاب با میزان گردشگری لبه پله ارتباط دارد و این گردشگری باعث کاهش مقدار Y_2 می گردد، ولی در مقادیر بالای عدد فرود همین گردشگری باعث افزایش عمق آب در پایین دست و به تبع آن کاهش کنترل پرش می گردد. هگرو کاواگوشی تحقیقات بر روی پرش هیدرولیکی در پله معکوس را ادامه دادند (۱۱). ایشان پارامتر ΔY (اختلاف عمق در پرش در پله معکوس با پرش کلاسیک) را به صورت $Y = Y^* + \Delta Y$ تعریف نمودند. در این رابطه Y و Y^* به ترتیب عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در حالت های پله معکوس و کلاسیک می باشند. همچنین ایشان روابطی نیز جهت آن را ارائه نمودند. در رابطه با تاثیر زبری بر مشخصات پرش، راجاراتنام از اولین کسانی بود که مطالعات گسترده ای را انجام داد (۱۷). او پارامتر $k = k_e/\gamma_1$ را به عنوان پارامتر زبری معرفی کرد که در آن k_e ارتفاع معادل زبری و γ_1 عمق جریان ورودی در بالای زبریها است و نشان داد که طول غلطابی (L_r) و طول پرش (L_p) بر روی بسترهای زبر نسبت به پرش کلاسیک به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. او

در تحقیقات خود نشان داد که برای پارامتر زبری حدود 0.4 مقدار Y_2 می تواند تا $0.8Y_2$ کمتر گردد. مطالعات بعدی در این خصوص نظیر گیل، هاگهز و فلک، اید و راجاراتنام، کارولو و فرو، ایزدجو و شفافی بجزستان، کارولو و فرو، پاگلیارا و همکاران و نیسی و شفافی بجزستان نشان دادند که زبریها تاثیر قابل ملاحظه ای در کاهش طول پرش دارند (۱۰، ۱۲، ۸، ۶، ۱۳، ۷، ۱۶، ۲). تحقیقات در خصوص فشارهای هیدرونیامیکی در پرش هیدرولیکی نیز با مطالعات راجاراتنام گسترش یافت (۱۷). او در تحقیقات خود در خصوص نیروهای هیدرونیامیکی در پرش کلاسیک نشان داد که محدوده 30% درصد طول غلطابی، ناحیه ای است که در آن حداکثر توربولنت جریان و حداکثر دخول هوا اتفاق می افتد. لذا در

همین محدوده نیز حداکثر فشارهای هیدرونیامیکی کف بوجود می آید. مولفین متعددی خصوصیات آماری فشارهای نوسانی در زیر یک جهش هیدرولیک کلاسیک را به طریق تجربی تحلیل کرده اند که در میان آنها می توان از عبدقادر و الانگو، لئوپارد و هنینگ، توسو و باورز، فیوروتو و رینالدو نام برد (۳، ۱۴، ۱۹، ۹). توسو و باورز در تحقیقات خود پرش هیدرولیکی را در بستر صاف تشکیل دادند و نشان دادند که مقادیر ضرایب مثبت و منفی فشار (C_p^+ و C_p^-) در امتداد طول پرش و برای یک عدد فرود معین در بالادست پرش، ابتدا افزایش و سپس کاهش نشان میدهد (۱۹). همچنین شرایط را در حوضچه آرامش تیپ ۲ و ۳ USBR بررسی و مقادیر C_p^+ و C_p^- را برای آنها رسم نمودند. ایشان نشان دادند که این ضرایب از حضور بلوکها تاثیر می پذیرند. فیوروتو و رینالدو در تحقیقات خود جهت تعیین حداکثر ضخامت کف حوضچه های آرامش پرش هیدرولیکی کلاسیک رابطه زیر را ارائه نمودند (۹).

$$\Omega = s \left(\frac{L_x}{y_1}, \frac{L_x}{I_x}, \frac{L_y}{I_y} \right) (C_p^+ + C_p^-) \frac{v_1^2 \gamma}{g 2 \gamma_c - \gamma} \quad (1)$$

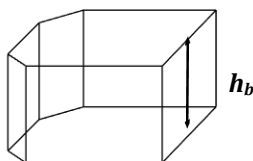
در این رابطه s ضخامت دال کف، Ω برابر است با ضریب بدون بعد نیرو، C_p^+ و C_p^- ضرایب مثبت و منفی فشار، $v_1^2/2g$ هد انرژی سرعتی، γ و γ_c به ترتیب وزن مخصوص آب و بتن می باشند. همچنین L_x و L_y طولهای در جهت افقی و عمودی ورقه کف و I_x و I_y نوسانات فشار در جهت های افقی و عمودی می باشند. مقادیر C_p از روابط زیر محاسبه میگردد:

$$\frac{\Delta p_{max}^-}{\gamma_p^- \frac{v_1^2}{2g}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta p_{max}^+}{\gamma_p^+ \frac{v_1^2}{2g}} \quad (3)$$

که در آن Δp_{max}^+ و Δp_{max}^- مقادیر حداکثری فشارهای مثبت و منفی نسبت به فشار متوسط می باشند.

اندازه‌گیری DM5010S شرکت Motorola اندازه‌گیری شد. نظر باینکه تحلیل های طیف سنجی قبلی با سیگنالهای مشابه توسط بندت و پیرسول بیانگر فرکانسهای غالب نوسانات فشار در حدود ۳۰ هرتز بوده‌اند، لذا شدت نمونه برداری ۴۰ هرتز انتخاب گردید (۵). مبدلهای فشار با لوله های نه سخت نه نرم، با طول حداکثر ۲ متری و قطر داخلی ۰/۰۴ متری به رابطهای مسی وصل شد. یک کامپیوتر بوسیله مبدل داده هاشامل ۱۲ کانال به مبدل فشار متصل گردید. نمونه برداری با نرم افزار DM5010S Data Loger دارای امکان تبدیل داده ها انجام گرفت. متعاقباً داده ها روی دیسک سخت ذخیره شده و پردازش محاسبات آماری آغاز گردید. دبی در لوله جریان ورودی با جریان سنج مغناطیسی مدل Easy Flow مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین جهت اطمینان از صحت دبی قرائت شده، دبی سنج مذکور با سرریز مستطیلی کالیبره گردید. آزمایشات با استفاده از زبری‌های با شکل مکعبی و گوشه های پخ شده (شکل ۲) انجام گرفت. ارتفاع زبری‌ها به اندازه ارتفاع پله و برابر ۵،۴ سانتیمتر در نظر گرفته شد. زبری‌ها با آرایش زیگزگاک ۷-۶-۷ در طول فلوم به تعداد ۱۷ ردیف چیده شد. برای حذف منابع احتمالی تحریف و اختلال در خروجی مبدل و بخصوص تاثیر هوای محبوس در میان لوله ها، همچنین توزیع غیر یکنواخت جریان در عرض فلوم مراقبتهای لازم بعمل آمد. لازم به ذکر است که کلیه پرش ها از نوع Jump-B تشکیل و فشارهای هیدرودینامیکی کف در آنها اندازه‌گیری گردید.



شکل ۲- نمای سه بعدی زبری‌های استفاده شده در آزمایشات.

نتایج و بحث

در آزمایشات انجام گرفته برای هرکدام از پیژومترهای موجود در کف فلوم توسط فشارسنج ذکر شده داده‌ها برداشت گردید. سپس داده‌ها مورد تحلیل آماری قرار گرفت و مقادیر میانگین، حداکثر، حداقل و انحراف معیار استاندارد جهت هرکدام از پیژومترها بدست آمد. در شکل ۳ تغییرات فشار نسبت به زمان در اعداد فرود ۵،۸۵-۳،۴۳ برای تعدادی از پیژومترها در طول پرش آمده است. همانگونه که در آنها مشاهده میگردد، پیژومتر شماره ۹ در فاصله قابل توجهی پایین تر از دیگر پیژومترها در تمامی اعداد فرود قرار دارد. این فاصله با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد به طوری که در عددهای فرود ۵،۰۴ و ۵،۸۵ مقادیر منفی را نیز شامل میگردد. این مقادیر منفی بیانگر احتمال وجود پدیده کاویتاسیون در این قسمت از حوضچه آرامش می‌باشد. محل قرارگیری پیژومتر ۹ در $x/y_1=10.44$ است (x فاصله از ابتدای پله و y_1 ارتفاع آب قبل از پرش).

آرمنیو و همکاران نیز تحقیقاتی در خصوص نوسانات فشار در پله معکوس با بستر صاف ارائه نمودند (۴). ایشان تحقیقات خود را بر دو نوع پله با گردشگی و بدون آن (افتادگی ناگهانی) برای دو نوع پرش بر پله معکوس به صورت Jump-B و Jump-W انجام دادند و آن را با پرش کلاسیک مقایسه نمودند. جهت ترسیم تغییرات فشار از ضریب بی‌بعد فشار (C_p') استفاده نمودند که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$C_p' = \frac{\sigma p / \gamma}{v_1^2 / g2} \quad (4)$$

در این رابطه $v_1^2/2g$ ارتفاع معادل سرعت قبل از پرش σp و انحراف معیار استاندارد فشارهای اندازه‌گیری شده میباشد که خود از رابطه ۵ محاسبه میگردد.

$$\sigma_p = \frac{1}{N^{0.5}} \left[\sum_{n=1}^N [p(x, y, n\Delta t) - \bar{P}(x, y)]^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

در رابطه ۵، متوسط زمانی تغییرات $\bar{P}(x, y)$ ، مقدار فشار در هر لحظه $p(x, y, n\Delta t)$ ، تعداد اطلاعات برداشت شده در سری زمانی گسسته N و فاصله زمانی بین اطلاعات ضبط شد Δt میباشد. ایشان نشان دادند که در پله معکوس ناگهانی مقادیر ضریب بی‌بعد فشار (C_p')، ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر کاهش می‌یابد. همچنین با اندازه‌گیری مقادیر فشار بی‌بعد شده مثبت و منفی (C_p^+ و C_p^-) نشان دادند که مقادیر آنها در حالت Jump-B مشخصاً از پرش کلاسیک بیشتر میباشد و لذا نتیجه‌گیری نمودند که در صورت احداث حوضچه آرامشی که در آن پرش با پله معکوس تشکیل گردد، نیاز است تا ضخامت صفحه کف نسبت به حالت پرش کلاسیک بیشتر باشد. حسونی زاده و شفاهی در خصوص فشارهای هیدرودینامیکی پرش کلاسیک دریافتند که ضرایب بی‌بعد فشار مثبت و منفی (C_p^+ و C_p^-) برای دبی‌های مشخص و در طول پرش، ابتدا افزایش نشان داده و پس از رسیدن به مقدار حداکثر سیر نزولی طی می‌نماید (۱). همچنین آنها نشان دادند که این مقدار حداکثری همواره در $x/y_1 < 15$ اتفاق می‌افتد. با در نظر گرفتن اینکه تا کنون در پرش با پله معکوس و بستر زبر پارامترهای نوسانات فشار مطالعه نشده‌اند، این مطالعه صورت گرفت.

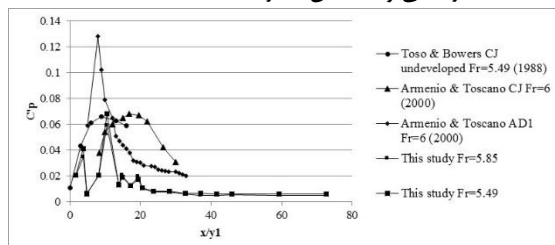
مواد و روش ها

جهت انجام این تحقیق، فلومی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران ساخته شد که فلوم مذکور دارای طول ۱۵ متر، عرض ۰/۸ متر و عمق ۰/۷ متر می‌باشد (شکل ۲). در قسمت بالادست فلوم برای کنترل جریان ورودی از یک دریچه کشویی استفاده گردید. موقعیت پرش در امتداد ناحیه آزمایش بوسیله دریچه‌ای که در انتهای پایین دست فلوم قرار داشت، کنترل شد. تعدادی رابط مسی برای قرائت فشارهای کف با قطر ۰/۰۶ متر در کف و در امتداد مرکز فلوم در مسیر جریان نصب گردید. فشار نوسانی در کف بوسیله مبدل های فشار کالیبره شده در محدوده بین ۱۰+ تا ۱۰- کیلوپاسکال با دستگاه

اعداد نشان داده شده در شکل ۴ از تحقیقات توسو و باورز برای پرش کلاسیک توسعه نیافته است (۱۹).

در شکل ۴ داده‌های تحقیق برای نسبت افتادگی ۱ آمده است. با دقت در این نمودار نتایج زیر حاصل میگردد:

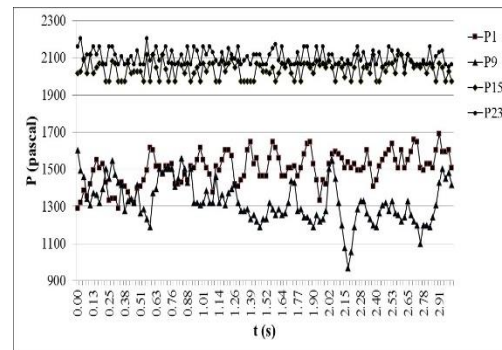
- (۱) مقادیر حداکثر $C'p$ در پرش پله معکوس با بستر صاف از پرش کلاسیک در همان عدد فرود، بیشتر است.
- (۲) مقادیر حداکثر $C'p$ در پرش کلاسیک با پله معکوس با بستر زبر در همان عدد فرود تقریباً برابر است.
- (۳) محل ایجاد مقدار حداکثر $C'p$ در پرش پله معکوس با بستر زبر از پله معکوس با بستر صاف جلوتر میباشد. این مقدار در پله معکوس با بستر صاف در $x/y_1=8$ و در پله معکوس با بستر زبر در $x/y_1=10.44$ میباشد.
- (۴) نوسانات ایجاد شده در پله معکوس با بستر زبر در حضور زبری‌ها ایجاد میگردد. این بدین معنی است که زبری‌ها هم در کاهش مقادیر $C'p$ نقش دارند و هم باعث ایجاد مقادیر نوسانی در آن می‌گردند. این نوسانات با دور شدن از ابتدای پرش (افزایش عمق آب) کاهش می‌یابند.
- (۵) حداکثر مقدار $C'p$ در پله معکوس با بستر زبر در $x/y_1=10.44$ اتفاق می‌افتد که همان محل پیژومتر شماره ۹ می‌باشد.
- (۶) تغییرات $C'p$ در دو عدد فرود ۵٫۴۹ و ۵٫۸۵ در مقادیر و محل‌های مشابهی رخ میدهد که نشانگر صحت داده‌های برداشتی و تایید این تغییرات است.



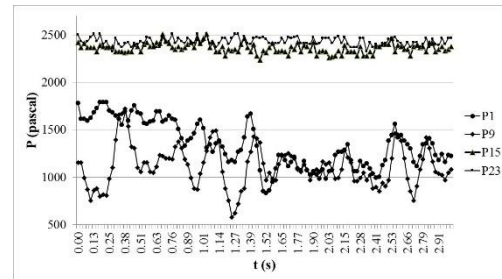
شکل ۴- مقایسه ضریب بی‌بعد فشار در این تحقیق با کارهای انجام شده مشابه

در توضیح مورد ۴ باید گفت که علت این امر به دلیل حضور جریانهای ثانویه می باشد که در آزمایشگاه مشاهده شده است. عملکرد آنها به این صورت است که این جریانها در ردیف اول قبل از زبری به صورت گردابی افقی از عرض فلوم عبور می‌کند. بعد از آن در ردیف اول به صورت عمودی و بعد از هر زبری تشکیل می‌گردد. شدت این گردابها با پیشروی در طول فلوم و فاصله گرفتن از ابتدای پرش (افزایش عمق آب) ضعیفتر میشود. این مفهوم در شکل ۴ نمایش داده شده است.

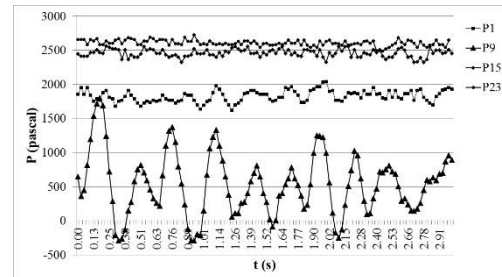
میتوان گفت که حضور گردابه‌های عمودی بعد از زبری‌ها در حقیقت باعث کاهش $C'p$ بعد از زبری‌ها می‌گردد که در شکل ۴ به صورت نوسانات کاهشی پس از افزایش $C'p$ ظاهر شده‌اند. شرایط مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است.



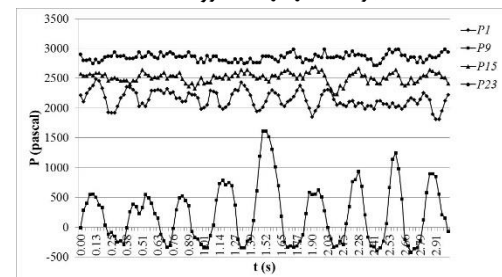
3a. تغییرات فشار در عدد فرود $Fr_1=3.43$



3b. تغییرات فشار در عدد فرود $Fr_1=4.33$



3c. تغییرات فشار در عدد فرود $Fr_1=5.04$



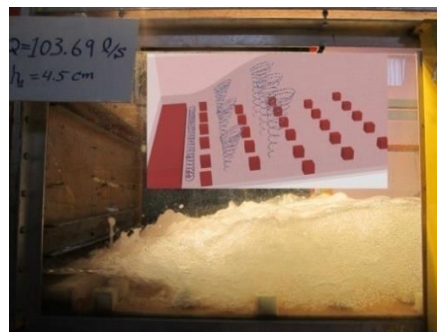
3d. تغییرات فشار در عدد فرود $Fr_1=5.85$

شکل ۳- تغییرات فشار نسبت به زمان جهت پیژومتر های مختلف در اعداد فرود ۵٫۴۳، ۴٫۳۳، ۵٫۰۴ و ۵٫۸۵

جهت بررسی شرایط هیدرودینامیکی به تعیین ضریب بی‌بعد فشار ($C'p$) پرداخته و با داده‌های توسو و باورز و آرمینو و همکاران مقایسه گردید (۱۹، ۴). داده‌های آرمینو و توسکانو مشتمل بر پرش هیدرولیکی کلاسیک بر بستر صاف و پرش هیدرولیکی پله معکوس با بستر صاف بانسبت افتادگی ۱ ($\Delta z/y_1=1$) میباشد (رجوع به شکل ۱).

در شکل ۴ تغییرات $C'p$ نسبت به x/y_1 برای تحقیقات ذکر شده در مقایسه با این مطالعه آمده است. آرمینو و همکاران در مطالعات خود بیان داشتند که؛ پرش در پله معکوس همخوانی مناسبی را از نظر تغییرات با پرش کلاسیک توسعه نیافته نشان میدهد (۴). لذا

شکل ۵- شرایط گردابه‌های افقی و عمودی در فلوم آزمایشات.



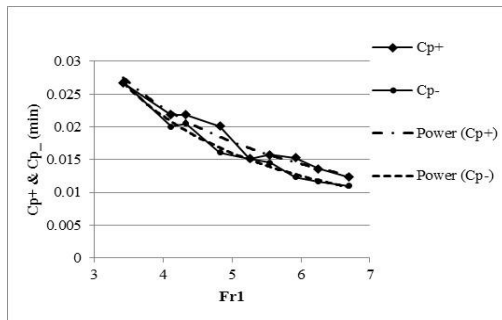
از آنجا که نیروهای هیدرودینامیکی را بدون بررسی ضرایب مثبت و منفی (C_p و C_p^+) فشار نمی‌توان مورد بررسی کامل قرار داد، در ادامه تحقیق به بررسی این ضرایب در پله معکوس با بستر زبر پرداخته و سپس نتایج با پله معکوس با بستر صاف مورد مقایسه قرار گرفته است. در اشکال ۶ و ۷ تغییرات ضرایب مثبت و منفی فشار در طول حوضچه برای نسبت افتادگی برابر ۱،۲۹ ($\Delta z/y_1=1.29$) آمده است. بنابراین، این تغییرات در ابتدای پرش شدید می‌باشند، ولی با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و افزایش عمق آب از شدت آنها کاسته می‌شود.

در ادامه در جدول ۱ مقادیر مربوط به C_p برای حالات مختلف پرش آمده است. با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که مقادیر C_p در پرش پله معکوس با بستر زبر همواره نسبت به پله معکوس با بستر صاف دارای کاهشی بین ۳۵ تا ۸۰ درصد می‌باشد. همچنین مقادیر C_p در پله معکوس با بستر صاف نسبت به پرش کلاسیک ابتدا افزایشی (علامت منفی) و سپس کاهشی می‌باشد. در ابتدای پرش پله معکوس با بستر صاف، ضریب بی‌بعد فشار بیشتر از پرش کلاسیک است که با دور شدن از ابتدای پرش در x/y_1 حدود ۱۳ با پرش کلاسیک برابر و سپس از آن کمتر می‌شود.

جدول ۱- مقایسه ضرایب بی‌بعد فشار (C_p)

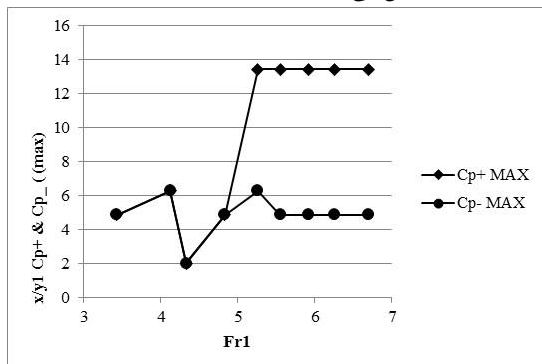
نوع پرش	محققین	Fr_1	x/y_1	C_p	درصد کاهش C_p	نسبت به
پرش کلاسیک	توسو و باورز	۵/۴۹	۸	۰/۰۶۴	-	-
	توسو و باورز	۵/۴۹	۱۰	۰/۰۶۴	-	-
	توسو و باورز	۵/۴۹	۱۲	۰/۰۶۴	-	-
	توسو و باورز	۵/۴۹	۱۵	۰/۰۰۶	-	-
	توسو و باورز	۵/۴۹	۱۶	۰/۰۵۹	-	-
	آرمینیو و همکاران	۶	۸/۴	۰/۰۳۸	-	-
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۰	۰/۰۵۴	-	-
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۲	۰/۰۰۶	-	-
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۵	۰/۰۶۵	-	-
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۶	۰/۰۶۷	-	-
پرش پله معکوس با بستر صاف	آرمینیو و همکاران	۶	۸	۰/۱۲۸	-۱۱۶/۹۵	پرش کلاسیک انجام شده توسط آرمینیو و همکاران
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۰	۰/۰۷۹	-۱۰۷/۸۹	
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۲	۰/۰۶۵	-۲۰/۳۷	
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۵	۰/۰۴۴	۲۶/۶۷	
	آرمینیو و همکاران	۶	۱۶	۰/۰۴۱	۳۶/۹۲	
پرش پله معکوس با بستر زبر	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۸/۲۲	۰/۰۰۲	۸۴/۲۹	پرش پله معکوس انجام شده توسط آرمینیو و همکاران با بستر صاف
	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۱۰	۰/۰۵۱	۳۴/۹۷	
	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۱۲	۰/۰۳۸	۴۱/۹۵	
	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۱۵	۰/۰۰۲	۵۴/۰۶	
	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۱۶	۰/۰۱۷	۵۹/۶۸	
	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۲۰	۰/۰۱۴	۵۴/۳۰	

شکل ۸- تغییرات حداکثر ضرایب مثبت و منفی فشار نسبت به عدد فرود بالادست.

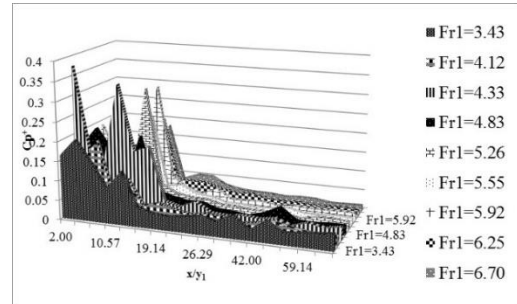
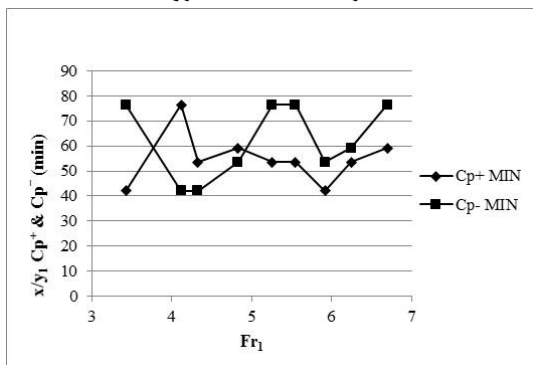


شکل ۹- تغییرات حداقل ضرایب مثبت و منفی فشار نسبت به عدد فرود بالادست.

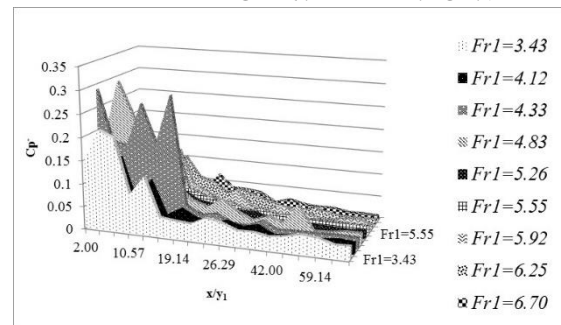
به منظور بررسی محل‌های ایجاد ضرایب حداکثر و حداقل فشار در طول پرش ضریب بی‌بعد طول (x/y_1) در مقابل عدد فرود (Fr_1) ترسیم شده که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ضرایب مثبت و منفی فشار $(Cp^+_{max}$ و Cp^+_{min}) تا $Fr_1 \leq 4.83$ در فاصله‌های برابر از ابتدای پرش اتفاق می‌افتد. سپس و بعد از عدد فرود $Fr_1 = 4.83$ این محلها از هم جدا شده و مقدار Cp^+_{max} در $x/y_1 = 13.43$ و مقدار Cp^+_{min} پس از یک تغییر در $x/y_1 = 4.86$ تثبیت می‌گردند. همچنین مقادیر حداقل ضرایب مثبت و منفی فشار $(Cp^+_{max}$ و $Cp^+_{min})$ از روند متغیری نسبت به عدد فرود برخوردارند، اما در محدوده $40 < x/y_1 < 80$ اتفاق می‌افتند.



شکل ۱۰- محل‌های ایجاد حداکثر ضرایب مثبت و منفی فشار نسبت به عدد فرود.



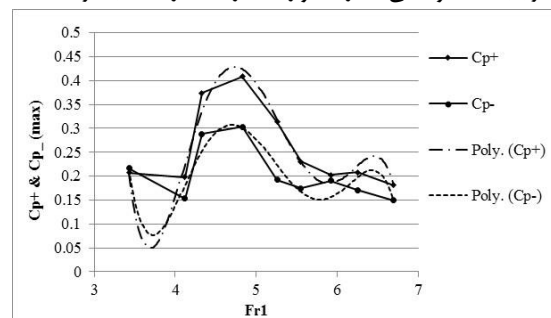
شکل ۶- تغییرات ضریب مثبت فشار (Cp^+) در طول پرش برای اعداد فرود بین ۳,۴۳ تا ۶,۷۰.



شکل ۷- تغییرات ضریب منفی فشار (Cp^-) در طول پرش برای اعداد فرود بین ۳,۴۳ تا ۶,۷۰.

جهت بررسی مقادیر حداکثر و حداقل ضرایب فشار مثبت و منفی $(Cp^+_{max}, Cp^+_{min}, Cp^-_{max}, Cp^-_{min})$ تغییرات آنها نسبت به عدد فرود ترسیم و برای هرکدام از ضرایب مثبت و منفی بهترین متحنی برازش داده شد. که از برازش خوبی برخوردار بود (شکل‌های ۸ و ۹).

بر اساس شکل‌های ۸ و ۹ با افزایش عدد فرود مقادیر حداکثر ضرایب مثبت و منفی فشار $(Cp^+_{max}$ و $Cp^+_{min})$ ابتدا افزایش داشته و سپس سیر نزولی را طی می‌کند. این افزایش تا عدد فرود $Fr_1 = 4.83$ به مقدار حداکثر خود می‌رسد. دلیل این افزایش را می‌توان به شرایط ناپایدار پرش هیدرولیکی در اعداد فرود بین ۲,۵ تا ۴,۵ مربوط دانست. همچنین مقادیر حداقل ضرایب مثبت و منفی فشار $(Cp^-_{max}$ و $Cp^-_{min})$ با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. این کاهش نشانگر کاهش انحراف ماکزیمم و مینیمم از مقدار متوسط می‌باشد. به عبارت دیگر، نسبت افزایش فشارهای دینامیکی بیشتر از نسبت افزایش نوسانات فشار است. علاوه بر آن، در هر دو نمودار مقادیر حداکثر و حداقل ضرایب مثبت و منفی فشار، همواره مقدار Cp^+ از Cp^- بیشتر است.



شکل ۱۱- محل‌های ایجاد حداقل ضرایب مثبت و منفی

فشار نسبت به عدد فرود .

در ادامه به مقایسه ضرایب مثبت و منفی فشار در پله معکوس با بستر زبر و پله معکوس با بستر صاف پرداخته شده است. جدول (۲) تغییرات این ضرایب را نسبت به طول بی‌بعد شده (x/y_1) در دو نوع پله معکوس صاف و زبر با نسبت افتادگی برابر ۱ ($\Delta z/y_1=1$) نشان داده است. با توجه به جدول ۲ میتوان موارد زیر را استنتاج نمود.

- (۱) در یک فاصله ثابت از ابتدای پرش، مقادیر ضرایب مثبت و منفی فشار (Cp^+ و Cp^-) در پرش پله معکوس با بستر زبر نسبت به بستر صاف، همواره با درصد بالای ۹۰ درصد، کمتر می‌باشد.
- (۲) مقدار حداکثر Cp^+ و Cp^- در پرش بر بستر صاف نسبت به بستر زبر در محل نزدیکتری نسبت به پله رخ میدهد.
- (۳) با زبر نمودن بستر پرش در پله معکوس، مقدار کاهش Cp^+ همواره از کاهش Cp^- بیشتر است.

جدول ۲- مقایسه ضرایب مثبت و منفی فشار در پله معکوس با بسترهای صاف و زبر

نوع پرش	محققین	Fr ₁	x/y ₁	Cp ⁻	Cp ⁺	درصد کاهش Cp ⁻	درصد کاهش Cp ⁺
پرش پله معکوس با بستر صاف	آرمینو و همکاران	۶	۴/۹۲	۰/۷۰۲	۰/۸۹۱	-	-
		۶	۶/۱۵	۰/۷۶۵	۰/۸۰۸	-	-
		۶	۷/۳۸	۰/۷۵۱	۱/۰۲	-	-
پرش پله معکوس با بستر زبر	تحقیق حاضر	۵/۸۵	۴/۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۹۷/۳۷	۹۸
		۵/۸۵	۶/۱۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲	۹۷/۱۶	۹۷/۵۷
		۵/۸۵	۷/۳۸	۰/۰۴۳	۰/۰۳۹	۹۴/۲۹	۹۶/۲۰
		۵/۸۵	۸/۲۲	۰/۰۷۶	۰/۰۷	-	-
		۵/۸۵	۱۰/۴۴	۰/۰۸۳	۰/۰۷	-	-
		۵/۸۵	۱۳/۷۸	۰/۰۵۶	۰/۰۴۵	-	-

نتیجه گیری

بر اساس آزمایشات انجام شده میتوان گفت که زبری بر پرش هیدرولیکی با پله معکوس کاملاً موثر است و این تأثیرات در جهت افزایش مهار انرژی در پرش و کاهش نیروهای هیدرودینامیکی کف میباشد. در مجموع موارد مطرح شده در بخش پیشین را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- (۶) مقدار حداکثر ضرایب مثبت و منفی فشار (Cp^+ و Cp^-) در پرش پله معکوس با بستر زبر، با افزایش عدد فرود ابتدا تا $Fr_1=4.83$ افزایش یافته و بعد از آن شروع به کاهش می‌نماید.
- (۷) مقدار حداقل ضرایب مثبت و منفی فشار (Cp^+ و Cp^-) در پرش پله معکوس با بستر زبر، با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد.
- (۸) محل تشکیل حداکثر Cp^+ و Cp^- در اعداد فرود $Fr_1 \leq 4.83$ در محل‌های مشابه و پس از آن برای Cp^+ در $x/y_1=13.43$ و برای Cp^- در $x/y_1=4.86$ تثبیت می‌گردد. همچنین مقادیر حداقل Cp^+ و Cp^- در $40 < x/y_1 < 80$ تشکیل می‌گردد.
- (۹) ضرایب مثبت و منفی فشار (Cp^+ و Cp^-) در پرش پله معکوس با بستر زبر کاهش چشمگیری (بیش از ۹۰٪) نسبت به پرش پله معکوس با بستر صاف دارد.

(۱) ضریب بی‌بعد فشار ($C'p$) در پرش پله معکوس با بستر زبر به دلیل وجود آمدن جریان‌های ثانویه و گردابه‌های عمودی در پشت زبری‌ها کمتر از پله معکوس با بستر صاف است.

(۲) حداکثر مقدار $C'p$ در منطقه بحرانی پرش $x/y_1=10.44$ بوجود می‌آید.

(۳) بحرانی ترین منطقه پرش از لحاظ بوجود آمدن حداکثر نیروهای هیدرودینامیکی و کاویتاسیون در پرش پله معکوس با بستر زبر در منطقه با طول بی‌بعد $10.44 < x/y_1 < 13.43$ می‌باشد. که x فاصله از ابتدای پرش و y_1 عمق اولیه پرش می‌باشد.

(۴) افزایش عدد فرود احتمال وقوع کاویتاسیون را افزایش می‌دهد.

(۵) نوسانات فشار با فاصله گرفتن از لبه پرش در پرش پله معکوس با بستر زبر، ابتدا افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر سیر نزولی خود را طی میکند. این تغییرات بدلیل افزایش عمق آب و کم شدن تأثیر

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: روزبه ریاضی، محمود شفاعی بجنستان؛ روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: روزبه ریاضی، محمود شفاعی بجنستان، حیدرعلی کشکولی؛ نظارت و نگارش نهایی: روزبه ریاضی.

تعارض منافع

References

- Hassounizadeh, H., and Shafaei-Bajestan, M. 2001. Investigation of the combined effects of hydrodynamic forces due to hydraulic jump and lifting forces on stilling basin's bed. PhD thesis of Hydro Structures, Faculty of Water Science Engineering. Shahid Chamran University of Ahvaz. 281 p. [In Persian].
- Neysi, K., and Shafaei-Bajestan, M. 2009. Experimental study of the effect of roughness's shape on hydraulic jump characteristics in stilling basins. M.Sc. thesis of Hydro Structures, Faculty of Water Science Engineering. Shahid Chamran University of Ahvaz. 125 p. [In Persian].
- Abdul-Kader, M.H., and Elango, K. 1974. Turbulent pressure beneath a hydraulic jump. Journal of Hydraulic Research, 12(4): 469-489.
- Aremenio, V., Toscano, P., and Fiorotto, V. 2000. The effects of a negative step in pressure fluctuations at the bottom of a hydraulic jump. Journal of Hydraulic Research, 38(5): 359-368.
- Bendat, J.S., and Piersol, A.G. 1971. Random data: analysis and measurement procedures. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Carollo, F.G., and Ferro, V. 2004b. Determination of pressure fluctuations in hydraulic jump in scarp bed. RI vista di Ingegneria Agraria, 35(4): 1-11 (in Italian).
- Carolo, F.G., Ferro, V., and Pam-Palone, V. 2007. Hydraulic Jumps on rough beds. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 133 (9): 989-999.
- Ead, S.A., and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic Jumps on corrugated Beds. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(7): 656-663.
- Fiorotto, V., and Rinaldo, A. 1992. Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Research, 30(4):499-520.
- Gill, M.A. 1980. Effect of boundary roughness on hydraulic Jump. Water Power & Dam construction, 32(Jan): 22-24.
- Hager, W.H., and Kawagoshi, N. 1990. Hydraulic Jump At rounded drop. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 89(4): 443-470.
- Hughes, W.C., Flack, J.E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough Bed. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(12): 1755-1771.
- Izadjoo, F., and Shafai-Bejestan, M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. Journal of Applied Sciences, 7(8):1164-1169.
- Lopardo, R.A., and Henning, R.E. 1985. Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps. Melbourne: 21st International Congress Association of Hydraulic Research.
- Moore, W.L., and Morgan, C.W. 1958. Hydraulic jump at an abrupt drop. Transaction. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124(29): 507-524.
- Pagliara, S., Lotti, I., and Palermo, M. 2008. Hydraulic Jump on rough bed of stream rehabilitation structure. Journal of Hydro-environment research, 2(1): 29-38.
- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. urnal of Hydraulic Engineering, 128(7): 656-670.
- Sharp, J.J. 1974. Observations on Hydraulic jumps at rounded steps. Journal of hydraulic Division, 100(HY6): 787-795.
- Toso, J.W., and Bowers, C.E. 1988. Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins. Journal of hydraulic Engineering, ASCE, 114(8): 829-843.

