

معرفی و تحلیلی بر نوع جدید پرش هیدرولیکی (نوع B-F) بر روی سطوح شیبدار با شیب کف منفی و بررسی این نوع پرش در حوضچه‌های آرامش

سیدحسین رجائی، کارشناس ارشد مرکز تحقیقات منابع طبیعی و امور دام خراسان، مشهد*
محمد کریم بیرامی، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان**
محمد رضا چمنی، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان**
*تلفن: ۰۵۱۱-۸۷۹۰۰۱۲، شماره: ۰۵۱۱-۸۷۸۳۸۷۹، پست الکترونیک: Sh_Rajaie@yahoo.co.uk
**تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۱، شماره: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۰، پست الکترونیک: Beirami@cc.iut.ac.ir

چکیده

بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی با توجه به نقش آن در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و کانالهای انتقال آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی‌های انجام شده در مراجع تاکنون با توجه به وضعیت تشکیل پرش و موقعیت ابتدا و انتهای پرش به ۶ نوع پرش A, B, C, D, E, F اختصاص داشته است. در تحقیق حاضر نوع جدیدی از پرش هیدرولیکی بنام $B-F$ معرفی می‌گردد. پرش نوع $B-F$ پرشی است که پنجه پرش بر روی شیب مثبت و انتهای پرش بر روی شیب منفی واقع شده است. آزمایش‌های انجام شده در این رابطه در حوضچه آرامش مربوط به مدل سرریز اوجی انجام شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزایش شیب منفی کف حوضچه موجب کاهش نسبت اعماق مزدوج و همچنین کاهش نسبت طول گرداب پرش به عمق اولیه پرش می‌گردد. در تحقیق حاضر نشان داده شده است که خصوصیات پرشهایی که در محل پنجه سرریز و همچنین محدوده منحنی پای سرریز اتفاق می‌افتد بسیار به یکدیگر شبیه است، همچنین خصوصیات پرش‌هایی که بر روی شیب ثابت بدنه سرریز قرار می‌گیرد با یکدیگر مشابه است. افت نسبی انرژی در پرش‌های نوع $B-F$ کمتر از پرشهایی است که بر روی بستر افقی تشکیل می‌شود. تحقیق حاضر براساس نتایج بیش از ۲۰۰ آزمایش انجام شده می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: پرش هیدرولیکی، عمق‌های مزدوج، طول گرداب، افت نسبی انرژی، حوضچه آرامش، سرریز اوجی.

۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی یکی از مهمترین پدیده‌ها در جریان متغیر سریع می‌باشد که لزوم شناخت دقیق ویژگی‌ها و مسائل مربوط به آن از اهمیت خاصی برخوردار است. در مراجع و مقالات اولین شخصی که بعنوان محقق از او یاد می‌شود مهندسی است بنام بایدون^۱ که در سال ۱۸۱۸ در ایتالیا مطالعاتی را در این زمینه انجام داد [۱]. بلانژ^۲ در سال ۱۸۲۸ در فرانسه توانست رابطه معروف پرش هیدرولیکی را در رابطه با پرش کلاسیک ارائه نماید [۱]. رابطه بلانژ بصورت زیر است:

۱ Bidone

۲ Belanger

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (1)$$

در این رابطه d_1 : عمق اولیه پرش هیدرولیکی، d_2 : عمق ثانویه پرش هیدرولیکی و Fr_1 : عدد فرود اولیه پرش می باشد.

بررسی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح شیبدار در قرن ۱۹ و ۲۰ توسط محققین مختلف پیگیری شد. افرادی نظیر بازین^۱ (۱۸۶۵) [۲]، بب^۲ (۱۹۱۷)، المز^۳ (۱۹۲۷)، یارنل^۴ (۱۹۳۴) [۳]، بختف و ماتزکی^۵ (۱۹۳۸) [۲]، کینسوآتر^۶ (۱۹۴۴)، کنیسون^۷ (۱۹۴۴) [۴]، برادلی و پترکا^۸ (۱۹۵۷) [۵، ۶]، ویگام^۹ (۱۹۵۸)، راجاراتنام^{۱۰} (۱۹۶۵) [۳]، هگر^{۱۱} (۱۹۸۸) [۷]، اوتسو و یاسودا^{۱۲} (۱۹۹۱) [۸]، و مک کروکودال^{۱۳} (۱۹۹۴) [۹] مطالعات مختلفی بر روی انواع پرش هیدرولیکی بر روی سطوح شیبدار انجام دادند. در رابطه با امکان تشکیل پرش نوع F که ابتدا و انتهای پرش کلاً بر روی شیب منفی قرار دارد، راوز^{۱۴} (۱۹۳۸) عقیده دارد که تشکیل چنین پرشی غیر ممکن است [۱۰]. ولی استیونس^{۱۵} (۱۹۴۴) بصورت تئوری تشکیل این نوع پرش را عملی میدانند [۱۱]. اوکادا و آکی^{۱۶} (۱۹۵۹) [۹] و قادر و راجاگوپال^{۱۷} (۱۹۷۲) پرش هایی را تاشیب منفی $S = -0.025$ تثبیت نمودند [۱۰]. ابریشمی و صانعی (۱۹۴۴) مطالعاتی را پیرامون پرش نوع F انجام دادند و رابطه زیر را برای این نوع پرش پیشنهاد نمودند [۱۲]:

$$\frac{d_2}{d_1} = Fr_1(1 + \mu)\mu \quad (2)$$

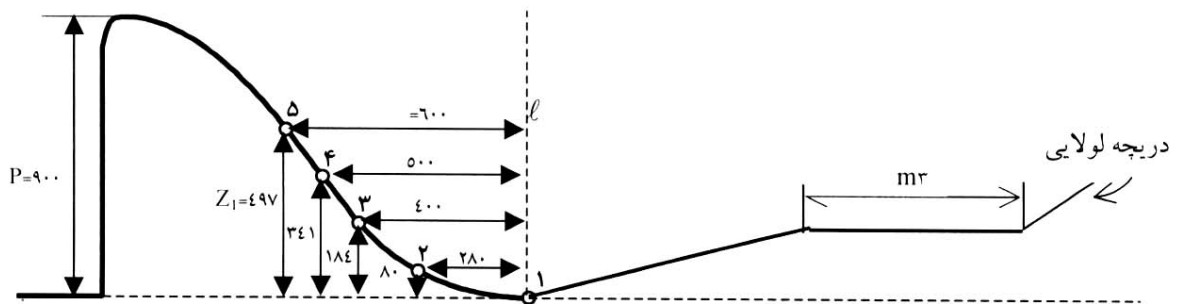
در این رابطه μ یک پارامتر تجربی است که به براساس نتایج آزمایشگاهی بدست می آید. مک کروکودال در سال ۱۹۹۴ پرش هایی را در اعداد فرود اولیه بین ۲ تا ۹ برای شیب های تا ۰/۲- با کمک دریچه تثبیت نمود [۹]. در کارهای محققین یادشده ایجاد جریان فوق بحرانی به کمک دریچه کشویی قائم انجام شده است.

باتوجه به لزوم بررسی عینی پرش هیدرولیکی در سازه های مختلف مطالعه حاضر به بررسی پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش سرریز اوجی استاندارد با شیب کف منفی پرداخته است. از آنجا که در این مطالعه پنجه پرش روی بدنه سرریز با شیب کف مثبت و انتهای پرش بر روی شیب منفی تشکیل می شود، نوع جدیدی از پرش های هیدرولیکی مطرح شده است که بنام پرش نوع B-F نامگذاری می شود. در مراجع مختلف تاکنون چنین پرش هایی مورد بررسی قرار نگرفته است.

۱ Bazin	۲ Beeb	۳ Elms	۴ Yarnel
۵ Bakhmetef & Matzke	۶ Kindsvater	۷ Kennison	۸ Bradly & Peterka
۹ Wigham	۱۰ Rajaratnam	۱۱ Hager	۱۲ Ohtsu & Yasuda
۱۳ McCorquodall	۱۴ Rouse	۱۵ Stevens	۱۶ Okada & Aki
۱۷ Khadar & Rajagopal			

۲- کارهای آزمایشگاهی

به منظور بررسی پرش نوع B-F، ابتدا مدل آزمایشگاهی سرریز اوجی از نوع WES تهیه و در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۱ متر و عرض ۴۰ سانتی متر و قدرت تولید دبی جریان تا ۱۰۰ لیتر بر ثانیه نصب گردید. در انتهای پنجه سرریز، حوضچه معکوس به طول ۱/۶ متر طراحی و اجرا و در انتهای آن شیب افقی به طول ۳ متر وصل گردید. کانال آزمایشگاهی دارای دو سیستم اندازه گیری دبی می باشد که شامل یک دبی سنج توربینی متصل به رایانه آزمایشگاه و نیز یک سرریز لبه تیز مستطیلی در انتهای کانال می باشد. همچنین مدل سرریز اوجی نیز بعنوان یک سیستم اندازه گیری دبی کالیبره گردید و استفاده شد. به منظور بررسی پرش نوع B-F بر روی بدنه سرریز اوجی ۵ نقطه بعنوان محل تشکیل پنجه پرش انتخاب گردید. نقطه ۱ دقیقاً در محل پنجه سرریز، نقطه ۲ بر روی منحنی پای سرریز، نقطه ۳ در محل اتصال منحنی پای سرریز به شیب ثابت بدنه و نقاط ۴ و ۵ بر روی شیب ثابت بدنه سرریز قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱: مدل سرریز اوجی و نقاط تثبیت پنجه پرش هیدرولیکی (ارقام به میلی متر)

شیب کف حوضچه نیز برای پنج شیب مختلف تنظیم شد که عبارتند از ۰/۱، ۰/۰۷۵، ۰/۰۵، ۰/۰۲۵ و صفر. بنابراین آزمایشها در ۲۵ حالت برای پرش هیدرولیکی انجام شد. برای نامگذاری این حالتها در کنار نام B-F دو عدد قرار گرفت که عدد سمت چپ معرف نقطه تشکیل و عدد سمت راست معرف شیب کف حوضچه می باشد. مثلاً پرش نوع B-F3-2.5 در نقطه ۳ با شیب کف حوضچه ۰/۰۲۵ تشکیل شده است. پرشهای تشکیل شده در نقطه ۱ پرش نوع F می باشد. در صورتی که گروه های کلی تر مثلاً کلیه پرش های تشکیل شده در نقطه ۴ با شیب کف مختلف مد نظر باشد، عدد متغیر حذف و بصورت B-F4 بیان می شود. پرش نوع A فقط روی شیب افقی حوضچه و پرش نوع B روی شیب سرریز و شیب افقی بیان شده است. در این تحقیق بیش از ۲۰۰ مورد آزمایش در دبی های بین ۱۲/۶۷ تا ۷۳/۳۱ لیتر در ثانیه و عدد فرود بین ۴/۸۳ تا ۱۲/۱۱ انجام شده است.

۳- محاسبه پارامترهای مورد نیاز

پارامترهای اندازه‌گیری شد در طول آزمایش شامل d_1 : عمق اولیه پرش (در محل پنجه پرش و عمود بر کف)، d_2 : عمق ثانویه پرش (در محل انتهای گرداب پرش و عمود بر کف)، Z_1 : فاصله قائم کف کانال در محل پنجه پرش تا پنجه سرریز (این فاصله با توجه به تثبیت پرش‌ها در ۵ نقطه مشخص در شکل ۱ دیده می‌شود)، Z_2 : فاصله قائم کف کانال در انتهای گرداب پرش تا پنجه سرریز، Lr : طول گرداب پرش، TW : عمق جریان در پایین دست پرش هیدرولیکی و Q : دبی جریان است. دبی جریان با استفاده از متوسط اندازه‌گیری توسط دبی سنج توربینی، سرریزهای مستطیلی و اوجی بدست آمده است.

با استفاده از پارامترهای فوق سایر پارامترهای مورد نیاز محاسبه گردید که $V_1 = \frac{Q}{A_1}$ سرعت جریان در

پنجه پرش، $V_2 = \frac{Q}{A_2}$ سرعت جریان در انتهای گرداب پرش، $Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$ عدد فرود در پنجه

پرش، $E_1 = d_1 \cos \theta_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1$ هد انرژی در پنجه پرش، $E_2 = d_2 \cos \theta_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2$

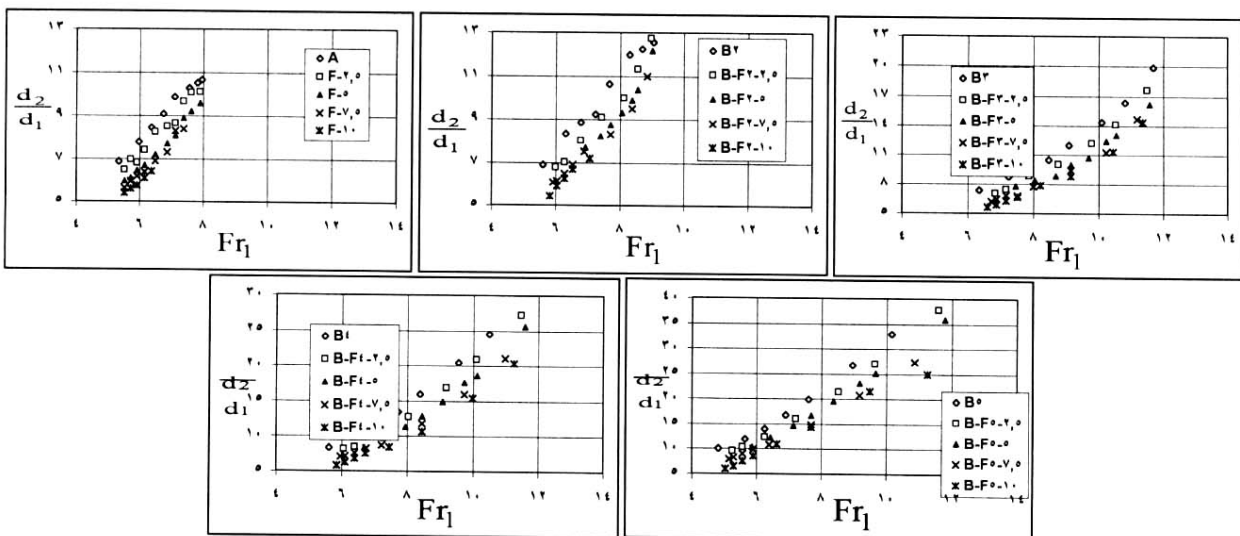
هد انرژی در انتهای گرداب پرش و $\Delta E = E_1 - E_2$ افت انرژی در طول پرش است.

۴- بررسی نتایج آزمایشگاهی

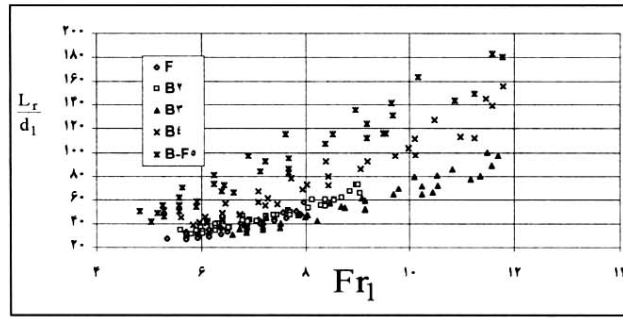
الف) نسبت اعماق مزدوج (در گروه‌های پنج‌گانه)

روند تغییرات نسبت اعماق مزدوج برای کلیه پرش‌ها $\frac{d_2}{d_1}$ ، نسبت به عدد فرود در شکل ۲ ارائه شده است.

همانطور که در این شکلها مشاهده می‌شود، نسبت اعماق مزدوج در تمام گروه‌ها در اعداد فرود ثابت با افزایش شیب منفی کف حوضچه کاهش می‌یابد.



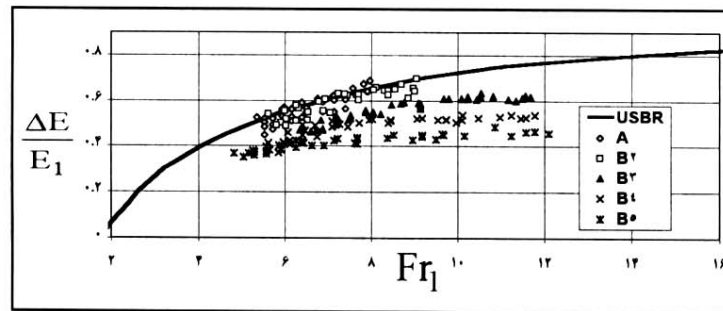
شکل ۲: نسبت اعماق مزدوج در گروه‌های پنج‌گانه



شکل 5: مقایسه تأثیر محل تشکیل پنجه پرش بر روی طول گرداب در پرش نوع B-F

ج) افت نسبی انرژی

برای بررسی وضعیت افت انرژی در پرش نوع B-F مقادیر $\frac{\Delta E}{E_1}$ برای کلیه پرش‌ها محاسبه و در نمودار شکل 6 ارائه گردیده است. در این شکل نمودار پیشنهادی USBR که برای پرش نوع A ارائه شده نیز مشاهده می‌شود [5]. همانطور که در شکل دیده می‌شود، انتقال پنجه پرش به سمت بالادست موجب کاهش افت انرژی می‌گردد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پرش بر روی بدنه سرریز دارای تلاطم کمتری است و بخش عمده‌ای از جریانهای گردابی حذف می‌گردد. در واقع می‌توان گفت پرش هیدرولیکی بر روی بدنه سرریز حالت توسعه یافته خود را نداشته لذا از افت نسبی کمتری نسبت به پرش‌هایی که در پنجه سرریز تشکیل می‌شود برخوردار است.



شکل 6: افت نسبی انرژی در گروه‌های پنج‌گانه

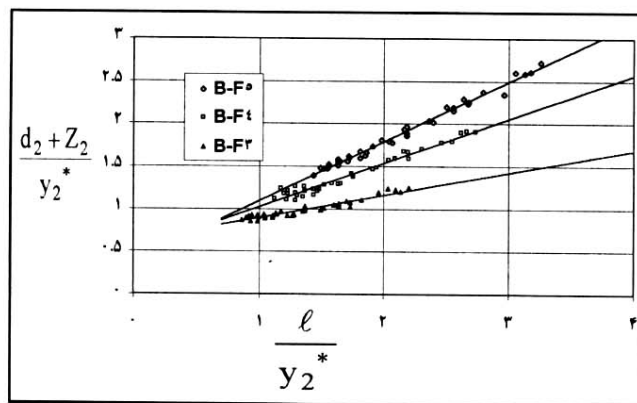
5- چند رابطه و نمودار پیشنهادی برای محاسبه پارامترهای پرش هیدرولیکی نوع B-F

الف) عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

برای دستیابی به رابطه‌ای مناسب برای اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی نوع B-F با توجه به اندک بودن مطالعات مشابه در این زمینه سعی در ارائه نمودارهایی مشابه نتایج مطالعات برادلی و پترکا [5,6] در رابطه با پرش نوع B-F شد. بدین منظور با توجه به تشابه پرش‌های B-F3، B-F4، B-F5 با یکدیگر برای

هریک از این پرش‌ها مقادیر $\frac{d_2 + Z_2}{y_2^*}$ و $\frac{l}{y_2^*}$ محاسبه گردید. در این روابط y_2^* از رابطه بلائز یا

رابطه (۱) محاسبه می‌گردد و l عبارت است از فاصله افقی بین مقطع پنجه پرش هیدرولیکی و مقطع ۱ در پنجه سرریز (شکل ۱). مقادیر فوق برای سه گروه ۳، ۴ و ۵ در شکل ۷ ارائه شده است. به کمک این نمودارها و با داشتن مقادیر l و d_1 و طول گرداب پرش عمق ثانویه پرش بدست می‌آید.



شکل ۷: نمودارهای مربوط به پرش نوع B-F3, B-F4, B-F5

ب) طول گرداب پرش

به منظور دست یابی به رابطه‌ای مناسب برای محاسبه طول گرداب پرش هیدرولیکی به کمک روش آنالیز ابعادی و تئوری باکینگهام، این نکته در نظر گرفته شد که طول گرداب پرش باید با افت انرژی نسبت داشته باشد و ارتباط آن با پارامترهای مختلف بصورت رابطه زیر پیشنهاد شد:

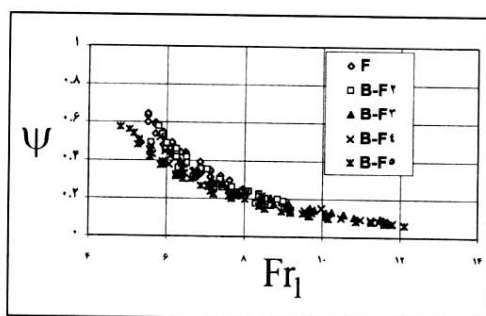
$$f(Lr, d_1 \cos \theta, d_r, \Delta E, Fr_1) = 0 \quad (3)$$

که در نهایت رابطه زیر حاصل شد:

$$\psi = \frac{\frac{Lr}{d_2}}{\frac{\Delta E}{d_1 \cos \theta}} = f(Fr_1) \quad (4)$$

با رسم $\psi = f(Fr_1)$ به صورت شکل ۸ و با برازش تابعی بصورت $\psi = a Fr_1^b$ برای گروه‌های مختلف مقادیر تجربی a و b بدست آمد که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامتر a و b در رابطه ۵



شکل ۸: مقادیر پارامتر ψ در گروه‌های پنج‌گانه

پرش هیدرولیکی	پارامتر a	پارامتر b
F	۴۳/۳۰	-۲/۵
B-F2	۴۸/۴۴۱	-۲/۵۷۸
B-F3	۳۸/۰۷۲	-۲/۴۶۷
B-F4	۳۹/۷۳۵	-۲/۵۲۲
B-F5	۳۰/۳۵۲	-۲/۴۶۷

۶- خلاصه و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر علاوه بر ۶ نوع پرش که بر روی سطوح شیبدار توسط محققین مطرح شده است، نوع جدیدی از پرش هیدرولیکی بنام B-F معرفی شده است. در پرش نوع B-F افزایش شیب منفی کف حوضچه موجب کاهش نسبت $\frac{Lr}{d_1}$ و $\frac{d_2}{d_1}$ در اعداد فرود ثابت می‌شود. هدایت پنجه پرش نوع B-F در حوضچه‌های آرامش سرریز اوجی به سمت بالادست بر روی منحنی پای سرریز، موجب کاهش نسبت $\frac{Lr}{d_1}$ و $\frac{d_2}{d_1}$ در اعداد فرود ثابت می‌شود و انتقال پرش به سمت بالادست و بر روی شیب ثابت بدنه موجب افزایش نسبت $\frac{Lr}{d_1}$ و $\frac{d_2}{d_1}$ در اعداد فرود ثابت می‌گردد. افت انرژی در زمانی که پرش در پنجه سرریز تشکیل می‌گردد، نسبت به تمام حالات دیگر بیشتر است. بنابراین تشکیل پرش هیدرولیکی در محدوده پای سرریز و وجود حوضچه با شیب کف منفی می‌تواند حوضچه اقتصادی ارائه دهد.

۷-مراجع

- [۱] Chow, V. T., "Open channel hydraulics", McGraw-Hill, New York, 1959.
- [۲] Bachmeteff, B. A., and Matzke, A. E., "The hydraulic jump in sloped channels", Trans., ASCE, 60, pp. 111-118, 1938.
- [۳] Rajaratnam, N., "Hydraulic jumps", Advances Hydrosience, V. T. Chow., Ed. 4, Academic Press, New York, pp. 198-280, 1965.
- [۴] Kindsvater, C. E., "The hudraulic jump in sloping channels", Trans., ASCE, 109, pp. 1107-1120, 1944.
- [۵] Bradkey, J. N., and Peterka, A. J., "Hydraulic design of stilling basins with sloping apron(basinV)", J. Hydr. Div., ASCE, 83(5), pp. 1-32, 1957.
- [۶] Bradkey, J. N., "Hydraulic dsign of stilling Basins and Energy Dissipators", U.S.B.R, 7th priting, 1983.
- [۷] Hager, W. H., "B-jump in sloping channel", J. Hydr. Res., IAHR, 26(5), pp. 539-558, 1988.
- [۸] Ohtsu, I., and Yasuda, Y., "Hydraulic jump in sloping channels", J. Hydr. Engin., ASCE, 117(7), pp. 905-921, 1991.
- [۹] McCrquodale, J. A., "Hydraulic jumps on advers slope", J. Hydr. Res., 32(1), pp. 119-130, 1994.
- [۱۰] Khadar, M. H. A., and Rajagopal, S. "Hydraulic jump in adverse channel slopes", Irrig. Pwt., 29, pp. 77-82, 1972.
- [۱۱] Stevens, J. C., "Discussion of the paper by Kindsvater, Hydraulic jump in sloping channel", Trans., ASCE, 109, pp. 1125-1135, 1944.
- [۱۲] Abrishami, J., and Saneie, M., "Hydraulic jump in adverse basin slopes.", Iranian J. of Water Res. Engin., 2(1), pp. 51-63, 1994.
- [۱۳] رجائی، س ح، " بررسی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش سرریز اوجی با شیب کف منفی."، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، تابستان ۱۳۷۹.