

## خصوصیات پرش B-F در سطوح شیبدار با بستر صاف

منوچهر شکریان<sup>۱\*</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>

### چکیده

در حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس در پایین دست سطوح شیبدار، معمولاً قسمتی از پرش بر روی سطح شیبدار منتقل می‌شود، و در عمل بیشتر پرش نوع B-F اتفاق می‌افتد. خصوصیات پرش B-F در سطوح شیبدار، از جمله نسبت عمق‌ها و طول غلتابی، می‌تواند کمک شایانی به طراحی مناسب‌تر و ارزان‌تر حوضچه ی آرامش پایین‌دست باشد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از تحلیل ابعادی و انگاره خود-تشابهی ناقص معادله‌ی کلی جهت محاسبه ی نسبت عمق‌های مزدوج استخراج شد. آزمایش‌ها در مدلی با سه شیب مختلف برای نهر بالادست (۱۳/۵، ۲۱/۵ و ۲۹/۵ درجه) با حوضچه‌های آرامش در سه شیب (۰/۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۱۵- درصد) انجام شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش شیب حوضچه ی آرامش نسبت عمق‌های مزدوج کاهش می‌یابد بطوری که در شیب ۰/۱۵- درصد، و برای یک موقعیت پرش ثابت ( $E_0=0/5$ )، نسبت عمق‌های مزدوج حدود شصت درصد نسبت به شیب ۰/۰۵- کاهش پیدا کرد. طول غلتاب پرش نیز بررسی گردید و برای محاسبه ی آن رابطه ای کلی برحسب افت نسبی کارمایه در داخل پرش استخراج شد. نتایج نشان دادند که معادله طول غلتابی مستقل از شیب نهر بالادست و حوضچه ی آرامش است. در نهایت، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق، ضرایب روابط کلی به دست آمد و درصد متوسط خطای معادله‌های کلی جهت محاسبه ی نسبت عمق‌ها و طول غلتابی به ترتیب ۸/۷۲ و ۱۳/۳۱ درصد محاسبه گردیدند.

**واژه‌های کلیدی:** پرش آبی، استهلاک کارمایه، سطوح شیبدار، پرش B-F، حوضچه ی آرامش

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ای‌ران.

Email: m.shokrian65@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ای‌ران.

## ۱- مقدمه

پرش آبی به عنوان یکی از پرکاربرترین و کارآمدترین روش‌ها در بحث استهلاک کارمایه شناخته شده و سالیان متمادی است که به وسیله پژوهشگران مختلف مطالعه می‌شود. بررسی‌های بسیار زیادی، هم به صورت انگاره و هم آزمایشگاهی، در رابطه با پرش آبی صورت گرفته که عمده‌ی آنها مربوط به سطح افقی است. از جمله می‌توان به مطالعه‌ی کارلو و همکاران (۲۰۰۹) اشاره کرد که با استفاده از تحلیل ابعادی و انگاره خود - تشابهی ناقص رابطه‌ای کلی زیر را برای محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج ارائه کردند که قابل کاربرد برای هر دو حالت بستر صاف و زبر است:

$$Y - 1 = m \left( \frac{k_s}{y_c} \right) (Fr_1 - 1)^\epsilon \quad (1)$$

که در آن  $Y = \frac{h_2}{h_1}$  نسبت عمق‌های مزدوج ( $h_1$  و  $h_2$ ) به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش هستند)،  $Fr_1$  معرف عدد فرود جریان در ابتدای پرش،  $k_s$  ارتفاع متوسط زبری‌های کف،  $y_c$  عمق بحرانی،  $\epsilon$  یک ضریب عددی ثابت و  $m$  تابعی بر حسب زبری نسبی  $\frac{k_s}{y_c}$  است. برای حالت زبری نسبی برابر با صفر، معادله‌ی فوق قابل کاربرد برای بستر صاف است. در بسیاری از مسائل کاربردی، برخی مواقع مناسب و حتی ضروری است که علاوه بر سطح افقی، کارکرد پرش آبی بر روی سطوح شیبدار نیز مشخص شود. پرش در سطوح شیبدار بسته به محل تشکیل پرش و موقعیت انتهای طول غلتابی آن نسبت به محل تقاطع سطح شیبدار با حوضچه‌ی پائین‌دست انواع مختلفی دارد. کیندزواتر (۱۹۴۴) برای اولین بار چهار نوع مختلف پرش را بر روی سطوح شیبدار مشخص کرد. پرش نوع A، که محل شروع پرش از ابتدای سطح شیبدار بوده و طول غلتاب کاملاً بر روی سطح افقی تشکیل می‌گردد. این نوع پرش چنانچه ذکر شد به وسیله محققین زیادی بررسی گردیده است. پرش نوع B، که در مسائل عملی بسیار مشابه آبی می‌شود به حالتی گفته می‌شود که محل شروع پرش بر روی سطح شیبدار و انتهای طول غلتابی بر روی سطح افقی باشد. پرش نوع C نیز روی سطح شیبدار شروع و انتهای

طول غلتابی در ابتدا حوضچه آرامش پایین‌دست قرار می‌گیرد. در نهایت، پرش نوع D، که طول غلتابی به طور کامل بر روی سطح شیبدار تشکیل می‌شود. پرش‌های نوع C و D به وسیله‌ی کیندزواتر (۱۹۴۴) در آزمایشگاه بررسی شدند. معادله‌ی نیمه تجربی کیندزواتر عموماً برای محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج انواع مختلف پرش به کار می‌رود. پرش‌های D و B به وسیله‌ی بردلی و پیترکا (۱۹۵۷) و راجرمن (۱۹۶۶) و در شیب‌های بیشتر از ۳۰ درجه، و در سطح صاف مطالعه شد. هاگر (۱۹۸۸) پرش نوع B را در شیب ۴۵ درجه مطالعه کرد. سپس کاواگوشی و هاگر (۱۹۹۰) برای شیب ۳۰ درجه نیز پرش نوع B را بررسی کردند. پرش‌های نوع B و D برای دامنه‌ی وسیع - تری از شیب (۰-۶۰) درجه و در سطح صاف به وسیله‌ی آتسو و یاسودا (۱۹۹۱) بررسی شدند. کارلو و همکاران (۲۰۱۱) پرش نوع B را در سه شیب ۸، ۱۷/۵ و ۳۰ درجه و در سطح صاف مطالعه کرده و با استفاده از تحلیل ابعادی و انگاره خود تشابهی ناقص، معادله‌ی کلی (۲) را به منظور محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج ارائه کردند. معادله‌ی ارائه شده توسط کارلو و همکاران (۲۰۱۱) بر مبنای معادله ۱ است که برای سطح شیبدار صاف بسط و گسترش داده شده است:

$$Y - \frac{1}{E} = m \left( \frac{k_s}{y_c}, E, \tan \alpha \right) (Fr_1 - 1)^\epsilon \quad (2)$$

که در آن  $\tan \alpha$  معرف شیب نهر بالادست است. فراسنج بدون بعد  $E = \frac{h_2 - z}{h_1}$  معرف موقعیت تشکیل پرش بر روی سطح شیبدار است که اولین بار بوسیله‌ی هاگر (۱۹۸۸) ارائه شد. مقدار حداکثر آن برای پرش نوع A برابر با واحد است و با حرکت پرش به سمت سطح شیبدار از مقدار آن کاسته می‌شود. فراسنج  $z$  در این رابطه نشان دهنده‌ی ارتفاع محل شروع پرش بر روی سطح شیبدار است.  $m$  نیز تابعی است که برخلاف پرش در سطح افقی، علاوه بر زبری نسبی به شیب نهر و موقعیت تشکیل پرش نیز بستگی دارد. شکران و شفافی بچستان (۲۰۱۴) خصوصیات پرش نوع B را برای هر دو حالت بستر صاف و زبر بررسی کرده و با استفاده از تحلیل ابعادی و انگاره خود تشابهی - ناقص رابطه‌ی ریاضی زیر را بدست آوردند:

محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج ارائه نمودند. آنها روابطی را برای محاسبه طول غلتایی و استهلاک کارمایه استخراج کردند. آنها همچنین نشان دادند که برای شرایط جریان نزدیک شونده‌ی بالادست یکسان، پرش نوع F دارای نسبت عمق‌ها و طول غلتایی کمتری نسبت به پرش در سطح افقی است. بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) انواع مختلف پرش را در پایین‌دست سرریزهای پیوند با بستر صاف را بررسی کرده و با بسط معادله اندازه حرکت رابطه‌ای کلی را به منظور محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج استخراج نمودند. باتنی و یزداندوست (۲۰۰۹) پرش نوع B-F را در پائین‌دست سرریز پیوند و در حوضچه‌ی آرامش با شیب‌های معکوس ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ در آزمایشگاه بررسی کردند. آنها دو رابطه برای محاسبه نسبت عمق‌های مزدوج با استفاده از بسط معادله اندازه حرکت و تحلیل ابعادی ارائه کردند. علاوه بر این رابطه‌ای را با استفاده از تحلیل ابعادی برای محاسبه‌ی طول غلتایی استخراج کردند و افت نسبی کارمایه را نیز بررسی نمودند. با توجه به اینکه در رابطه‌ی با پرش B-F مطالعات انجام شده صرفاً پائین دست سرریزهای پیوند صورت گرفته است و نیز با توجه به کاربرد زیاد سطوح شیبدار در شبکه‌های آبیاری و زهکشی، هدف اصلی از مطالعه‌ی حاضر بررسی خصوصیات این نوع پرش در پائین دست سطوح شیبدار با بستر صاف و ارائه‌ی معادله‌ای کلی به منظور محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج این نوع پرش با استفاده از انگاره‌ی خود-تشابهی ناقص است.

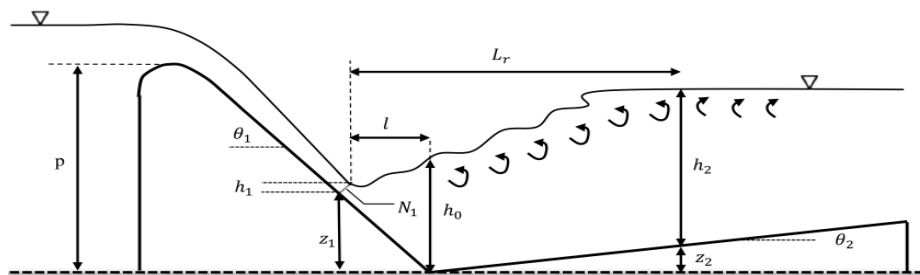
$$Y = \left[ 7.89 - 10.82 \frac{k_s}{y_c} \right] M^{0.73 + 1.86 \frac{k_s}{y_c}} \times N^{2.37} + M \quad (3)$$

که در آن اعداد بدون M و N به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M = \frac{h_2 - k}{h_1} = \frac{z + h_1}{h_1} \quad (4)$$

$$N = \frac{k}{h_2} = 1 - \frac{z + h_1}{h_2} \quad (5)$$

$k_s$  و  $y_c$  نیز به ترتیب معرف اندازه‌ی متوسط زبری‌های کف سطح شیبدار و حوضچه‌ی آرامش و عمق بحرانی هستند.  $k$  معادل اختلاف تراز سطح آب در ابتدا و انتهای پرش است که برای اولین بار به وسیله‌ی شفافی بجستان و شکریان معرفی شد. عدد بدون بعد M در معادله ۳ معرف موقعیت پرش بر روی سطح شیبدار است که برای پرش نوع A برابر با واحد است و حرکت پرش به سمت سطح شیبدار مقدار آن افزایش پیدا می‌کند. پرش در حوضچه‌های با شیب معکوس نیز بوسیله‌ی محققان مختلفی مطالعه شده است. استیونس (۱۹۴۴) با بسط معادله اندازه حرکت رابطه‌ای انگاره را برای پرش نوع F ارائه کرد که قابل کاربرد برای هر شیب معکوسی است. خدار و راجاگوپال (۱۹۷۲) و اوهاشی و همکاران (۱۹۷۳) نیز پرش نوع F را در شیب‌های معکوس کمتر از ۰/۰۲۵ بررسی کردند. کورکوداله و محمد (۱۹۹۴) در پرش نوع F در شیب معکوس ۰/۱، ۰/۱۶۷ و ۰/۲ مطالعه کردند و رابطه‌ای تجربی را برای



شکل (۱) - نمایش پرش B-F و متغیرهای آن بر روی سطح شیبدار با بستر صاف

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل ابعادی برای محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج

$$f(V_1, \rho, g, \mu, h_1, \theta_1, h_2, \theta_2, z_1, z_2) = 0 \quad (6)$$

با توجه به شکل ۱ فراسنج‌های موثر بر نسبت عمق‌های مزدوج را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

خودتشابهی کامل است (بارنبلت، ۱۹۷۹؛ فرو، ۲۰۰۶؛ کارلو و همکاران، ۲۰۱۱). اما اگر تابع  $\psi$  به سمت صفر یا بی-نهایت میل کند، گوییم  $\Pi_n$  دارای شرط خود تشابهی ناقص<sup>۲</sup> است. در این حالت پدیده‌ی فیزیکی فوق را می‌توان توسط رابطه‌ی زیر بیان نمود:

$$\Pi_1 = \Pi_n^\varepsilon (\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}) \quad (12)$$

که  $\varepsilon$  نماد تابع و  $\varepsilon$  ضریبی است که با توجه به آزمایشات به دست می‌آید (بارنبلت، ۱۹۷۹؛ فرو، ۲۰۰۶؛ کارلو و همکاران، ۲۰۱۱). با فرض شرط خود - تشابهی ناقص معادله‌ی ۱۰ نسبت به گروه بدون بعد  $Fr_1$  می‌توان نوشت:

$$Y - \frac{1}{E_0} = m(E_0, \tan \theta_1, \tan \theta_2)(Fr_1 - 1)^\varepsilon \quad (13)$$

در شرایط مرزی پدیده (شیب بحرانی) باید معادله‌ی ایجاد شده پدیده‌ی مورد نظر را در ردیف خودش حفظ کند.

به عنوان یک شرط مرزی، وقتی شرایط شیب بحرانی برقرار باشد ( $Fr_1=1$ ) سمت راست معادله‌ی ۱۳ برابر با صفر است و بنابراین می‌توان نوشت:

$$Y - \frac{1}{E_0} = 0 \rightarrow Y = \frac{1}{E_0} = \frac{h_2}{h_2 + (z_2 - z_1)} \quad (14)$$

و بدلیل اینکه در این شرایط سطح آب تقریباً افقی است داریم:

$$h_2 + z_2 = h_1 + z_1 \quad (15)$$

با قرار دادن رابطه‌ی ۱۵ در ۱۴ می‌توان نوشت:

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \quad (16)$$

۲- تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها  
به منظور انجام این تحقیق، آزمایش‌ها در نهری به طول ۷/۵ متر، عرض ۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر از جنس شیشه و پلاکسی گلاس و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید. مقدار جریان قبل از ورود به مخزن آرام کننده به وسیله‌ی دی-سنج الکترومغناطیس با دقت یک صدم لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد. سطوح شیبدار با استفاده از صفحات پلاکسی گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در شیب‌های مختلف (۱۳/۵، ۲۱/۵ و ۲۹/۵ درجه طراحی نصب شد. حوضچه‌های آرامش با شیب‌های ۰/۰۵، ۰/۱ و

که در آن  $V_1$  سرعت جریان در محل تشکیل پرش،  $\rho$  جرم واحد حجم سیال،  $g$  شتاب گرانش،  $\mu$  لزجت پویائی سیال،  $h_1$  بار آبی در ابتدای پرش،  $z_1$  ارتفاع محل تشکیل پرش نسبت به سطح مبنا،  $\theta_1$  زاویه کف نهر بالادست با افق،  $h_2$  عمق ثانویه پرش نسبت به کف نهر پایین دست با شیب معکوس،  $z_2$  ارتفاع محل انتهای طول غلتایی نسبت به کف نهر افقی پائین دست و  $\theta_2$  زاویه‌ی نهر پائین دست با افق است. با استفاده از انگاره تحلیل ابعادی  $\Pi$  باکینگهام و با انتخاب  $\rho$ ،  $V_1$  و  $h_1$  به عنوان فراسنج‌های تکراری اعداد بدون بعد زیر را می‌توان تعیین کرد:

$$f_1(Fr_1, Re_1, E, \frac{z_2}{h_2}, Y, \tan \theta_1, \tan \theta_2) = 0 \quad (7)$$

که در آن  $Fr_1$ ،  $Re_1$  و  $Y$  به ترتیب عدد فرود جریان به ازای عمق اولیه‌ی پرش، عدد رینولدز جریان و نسبت عمق-های مزدوج است. با ترکیب کردن اعداد بدون بعد  $E$  و

$$\frac{z_2}{h_2}$$
 می‌توان نوشت:

$$E = \frac{h_2 - z_1}{h_2} \quad (8)$$

$$E_0 = E + \frac{z_2}{h_2} = \frac{h_2 + (z_2 - z_1)}{h_2} \quad (9)$$

برای حالتی که  $z_1=z_2$  است مقدار  $E_0$  برابر با واحد است. برای پرش نوع  $F$ ، مقدار  $z_1$  برابر با صفر ب.ده و مقدار  $E_0$  بزرگتر از واحد است.

با توجه به اینکه در مسائل کاربردی جریان کاملاً متلاطم است، بنابراین می‌توان از تاثیر عدد رینولدز به دلیل تلاطم جریان، صرف نظر کرد (کارلو و همکاران ۲۰۰۹، ۲۰۱۱؛ شکریان و شفای بجستان ۲۰۱۴):

$$Y = f_3(Fr_1, E_0, \tan \theta_1, \tan \theta_2) \quad (10)$$

طبق نظریه‌ی خود-تشابهی<sup>۲</sup>، جهت یک پدیده فیزیکی، بعد از مشخص شدن  $n$  گروه بی‌بعد  $\Pi$  خواهیم داشت:

$$\Pi_1 = \psi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (11)$$

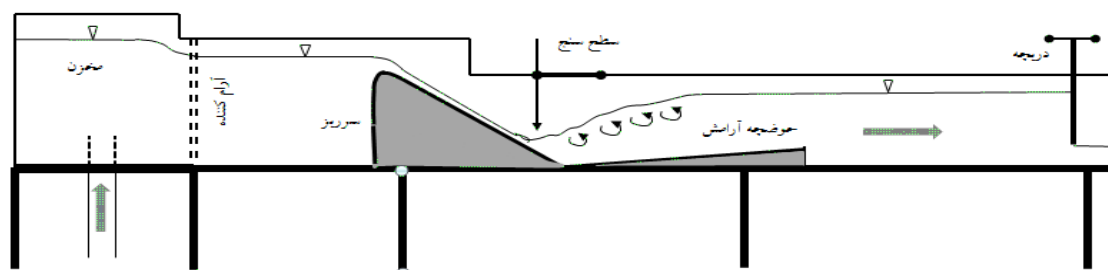
یک پدیده‌ی فیزیکی برای یک گروه بی‌بعد مشخص و معین  $\Pi_n$ ، دارای شرایط خودتشابهی کامل است اگر  $\Pi_1$  مستقل از  $\Pi_n$  گردد. زمانی که  $\Pi_n$  به سمت صفر یا بی‌نهایت میل می‌کند، اگر تابع  $\psi$  دارای مقداری مخالف با صفر و همچنین بی‌نهایت شود، گوییم  $\Pi_n$  دارای شرط

آزمایش‌ها برای دبی‌های مختلف، برای هر حوضچه‌ی آرامش و سطح شیبدار، در ابتدای آزمایش پرش به فاصله‌ی حدود ۱۰ الی ۲۰ سانتی‌متر پایین تر از سطح شیبدار تشکیل می‌گردید و با بستن دریچه به آرامی پرش به روی سطح شیبدار منتقل می‌شد تا پرش‌های نوع B-F در موقعیت‌های مختلف قرار گیرد. پس از تثبیت موقعیت پرش، نیمرخ سطح آب پرش و به خصوص عمق‌های مزدوج با دقت در چندین مرحله از آزمایش برداشت گردید و متوسط اعداد اندازه‌گیری شده مبنای تحلیل داده‌ها قرار می‌گرفت. جدول ۱ دامنه‌ی تغییرات برخی فراسنج‌های بی‌بعد این مطالعه را نشان می‌دهد.

۰/۱۵- در پایین‌دست سطح شیبدار نیز با استفاده از صفحات پلاکسی‌گلاس نصب گردیدند. جهت جلوگیری از خم شدن صفحات پلاکسی‌گلاس پایه‌هایی در زیر آنها تعبیه شدند تا قابلیت تحمل وزن سیال روی خود را داشته باشند. جهت تنظیم عمق پایاب به منظور تشکیل پرش از یک دریچه‌ی کشویی در انتهای نهر استفاده شد. برای اندازه‌گیری سطح آب نیز از عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر که بر روی ریل‌های نهر نصب شده بود استفاده گردید. طول غلتابی در آزمایش‌ها با استفاده از یک شناور مشخص گردید، به این صورت که محل وقوع نقطه‌ی سکون به عنوان طول غلتابی اندازه‌گیری شد. به منظور انجام

جدول ۱- محدوده تغییرات برخی فراسنج‌های بدون بعد این تحقیق

$\tan \theta_2$	$E_0$	$Y$	$Fr_1$	$\theta_1$
(۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵)	۰/۲۸-۲/۶	۵/۸۱-۱۹/۶۴	۳/۶۲-۹/۱۴	۱۳/۵
(۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵)	۰/۳۶-۱/۶۸	۸/۳۳-۲۱/۲۲	۳/۷۲-۱۲/۱۱	۲۱/۵
(۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵)	۰/۴۱-۱/۷۲	۹/۳۳-۲۴/۱۴	۴/۵۵-۱۳/۱۲	۲۹/۵



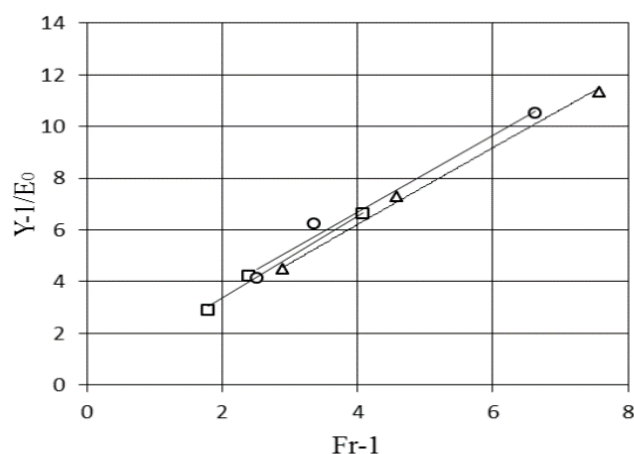
شکل ۲- نمای کنار از نهر آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تعیین ضرایب معادله کلی

کوتاهی از  $E_0$  ( $0.7 < E_0 < 0.8$ ) و شیب‌های مختلف حوضچه آرامش رسم شدند (شکل ۳). نتایج نشان دادند که فرض خود تشابهی ناقص معادله‌ی ۱۰ در گروه بدون بعد  $(Fr_1 - 1)$  برای  $\varepsilon = 0/۹۶۳$  برقرار است. کارلو وهمکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۱۱) نیز همین مقدار را برای پرش در سطح افقی و پرش نوع B محاسبه کرده بودند که در این مطالعه نیز تأیید شد.

همان گونه که ذکر شد، فراسنج‌های  $\varepsilon$  و  $m$  در معادله‌ی ۱۰ به ترتیب ضریب عددی ثابت و تابع هستند. تابع  $m$  در معادله‌ی ۱۰ تابعی از موقعیت پرش  $E_0$ ، شیب نهر بالادست  $\tan \theta_1$  و شیب حوضچه‌ی آرامش  $\tan \theta_2$  است. برای پرش B-F بر روی سطح شیبدار با بستر صاف، مقادیر  $Y - \frac{1}{E_0}$  و  $(Fr_1 - 1)$  در مقابل هم، و برای بازه‌ی



$$\Delta \theta_1 = 13.5 \text{ deg}, S = -0.05$$

$$\square \theta_1 = 13.5 \text{ deg}, S = -0.1$$

$$\circ \theta_1 = 13.5 \text{ deg}, S = -0.15$$

$$\text{——— } Y - 1/E_0 = m(E_0, \theta_1, \theta_2)(Fr - 1)^{0.963}$$

شکل ۳- مقادیر آزمایشگاهی  $Y - \frac{1}{E_0}$  و  $(Fr_1 - 1)$  برای  $0.7 < E_0 < 0.8$

دست، به ازای شیب حوضچه‌ی آرامش ثابت، با افزایش  $E_0$  مقدار تابع  $m$  کاهش پیدا می‌کند، و برای یک مقدار ثابت از  $E_0$ ، مقدار تابع  $m$  با افزایش شیب نهر بالادست کاهش می‌یابد. همچنین برای شیب‌های مختلف حوضچه‌ی آرامش به ازای شیب نهر بالادست ثابت، با افزایش مقدار  $E_0$  مقدار تابع  $m$  کاهش می‌یابد در حالی که برای یک مقدار ثابت  $E_0$ ، تابع  $m$  با افزایش شیب حوضچه آرامش افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که به ازای یک مقدار ثابت  $E_0$ ، شیب نهر بالادست و حوضچه‌ی آرامش اثری کاملاً متضاد را بر تابع  $m$  دارند. همان طور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است رابطه‌ی تابع  $m$  با متغیر  $E_0$  به صورت نمایی است؛ و بنابراین، می‌توان نوشت:

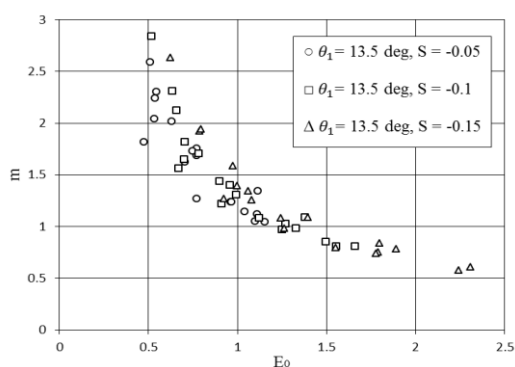
$$m = aE_0^b \quad (18)$$

که ضرایب  $a$  و  $b$  وابسته به شیب نهر بالادست و حوضچه‌ی آرامش هستند.

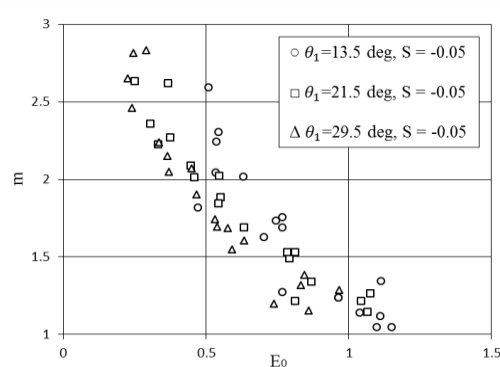
برای استخراج معادله‌ی کلی، باید تابع  $m$  با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین شود. برای تعیین ضریب  $m$  ابتدا مقدار آن از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$m(E_0, \tan \theta_1, \tan \theta_2) = \frac{Y - \frac{1}{E_0}}{(Fr - 1)^{0.963}} \quad (17)$$

برای تعیین تابع  $m$ ، مقادیر محاسبه شده از معادله ۱۷ به ازای مقادیر  $E_0$  رسم شد. شکل‌های ۵ و ۴ تغییرات تابع  $m$  را با متغیر  $E_0$  نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود، برای مقادیر کم  $E_0$  تابع  $m$  تغییرات زیادی را با شیب نهر بالادست و حوضچه‌ی آرامش دارد. دلیل این تغییرات را می‌توان با در نظر گرفتن مفهوم فیزیکی فراسنج  $E_0$  بیان نمود. با کاهش مقدار  $E_0$ ، وزن سیال بر روی سطح شیبدار و حوضچه آرامش افزایش پیدا می‌یابد. در شیب‌های تندتر، مولفه‌ی موثر وزن سیال قرار گرفته روی سطح شیبدار و حوضچه‌ی آرامش نقش بیشتری را در افزایش مقدار تابع  $m$  ایفا می‌کنند. همان گونه که ملاحظه می‌شود، برای شیب‌های مختلف نهر بالا



شکل ۴- نمایش رابطه‌ی متغیر  $E_0$  و تابع  $m$  در شیب‌های مختلف حوضچه‌ی آرامش به ازای نهر بالادست با شیب ۱۳/۵ درجه



شکل ۳- نمایش رابطه‌ی متغیر  $E_0$  و تابع  $m$  در شیب‌های مختلف نهر بالادست به ازای حوضچه‌ی پایین دست با شیب ۰/۰۵-

تحلیل‌های آماری که توسط نرم افزار spss انجام شد شکل کلی روابط  $a$  و  $b$  بصورت زیر تعیین گردیدند:

$$a = \sqrt{2} \exp(\delta \tan \theta_1 + \kappa \tan \theta_2) \quad (21)$$

$$b = \beta (\tan \theta_1)^\lambda + \phi (\tan \theta_2)^\sigma \quad (22)$$

با قرار دادن روابط ۲۱ و ۲۲ در معادله ۱۸ می‌توان نوشت:

$$m = \sqrt{2} \exp(\delta \tan \theta_1 + \kappa \tan \theta_2) E_0^{\beta (\tan \theta_1)^\lambda + \phi (\tan \theta_2)^\sigma} \quad (23)$$

بنابراین، با ترکیب روابط ۲۳ و ۱۳ شکل کلی معادله برای محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج پرش B-F به صورت زیر خواهد شد:

$$Y - \frac{1}{E_0} = \sqrt{2} \exp(\delta \tan \theta_1 + \kappa \tan \theta_2) E_0^{\beta (\tan \theta_1)^\lambda + \phi (\tan \theta_2)^\sigma} (Fr_1 - 1)^{0.963} \quad (24)$$

با برازش معادله‌ی ۲۴ با تمام داده‌های آزمایشگاهی پرش B-F ضرایب معادله‌ی فوق به صورت زیر محاسبه شدند:

$$Y = \sqrt{2} \exp(-0.386 \tan \theta_1 + 1.124 \tan \theta_2) E_0^{-0.398 (\tan \theta_1)^{-0.299} + 1.06 (\tan \theta_2)^{1.662}} (Fr_1 - 1)^{0.963} + \frac{1}{E_0} \quad (25)$$

$$r = \frac{|Y_C - Y_m|}{Y_m} \times 100$$

محاسبه گردید؛ سپس میانگین

این درصد خطاها مد نظر قرار گرفت که درصد متوسط خطای معادله فوق نیز ۸/۷۲ درصد محاسبه شد.

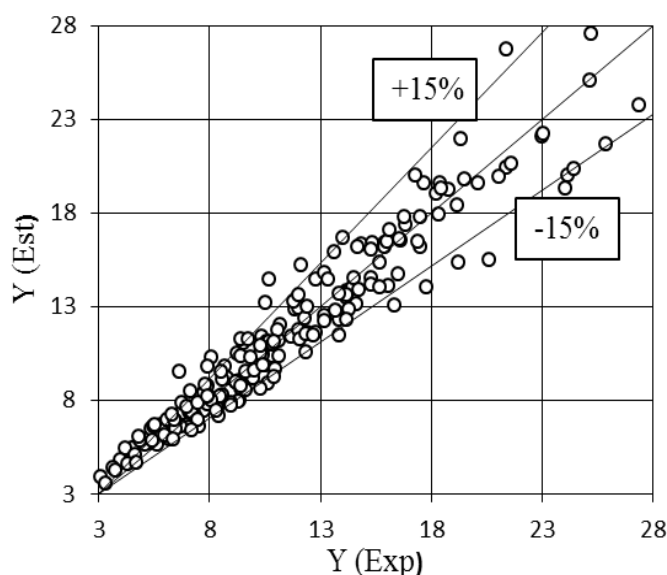
برای پرش نوع B در سطوح شیبدار با بستر صاف، کارلو و همکاران (۲۰۱۱) ضرایب  $a$  و  $b$  را به صورت زیر تعیین کردند:

$$a = \sqrt{2} \exp(\delta \tan \theta_1) \quad (19)$$

$$b = \beta (\tan \theta_1)^\lambda \quad (20)$$

که  $\delta$ ،  $\beta$  و  $\lambda$  ضرایب عددی ثابت هستند که باید با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین شوند. برای پرش B-F، همان گونه که بحث شد، تابع  $m$  علاوه بر شیب نهر بالادست به شیب حوضچه‌ی آرامش هم بستگی دارد. با

مقدار ضریب  $R^2$  معادله فوق ۰/۹۱ محاسبه شد. شکل ۵ نسبت عمق‌های محاسبه شده را از معادله ۲۵ را به ازای مقادیر آزمایشگاهی متناظر نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی درصد متوسط خطا، ابتدا درصد اختلاف مقادیر محاسباتی از اندازه گیری شده با استفاده از معادله‌ی



شکل ۵- نسبت عمق‌های مزدوج آزمایشگاهی و محاسباتی از معادله‌ی ۲۵

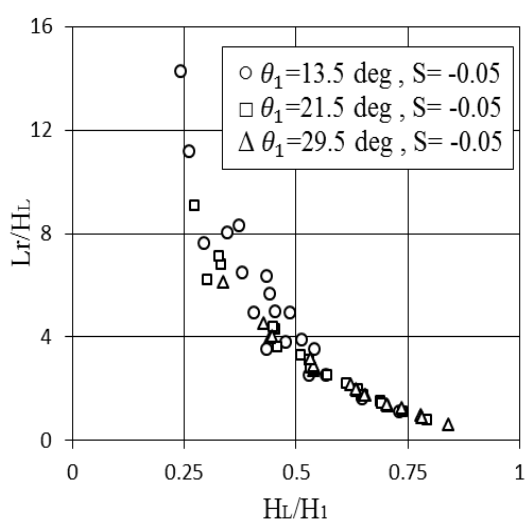
### ۳-۲ - طول غلتابی

است. تحلیل داده‌ها در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داد که برای پرش B-F، دو فراسنج اول معادله‌ی ۲۶ برای محاسبه‌ی طول غلتابی کافی هستند. شکل زیر نتایج آن را نشان می‌دهد.

برای محاسبه‌ی طول غلتابی پرش B-F، معادله‌ی ابعادی زیر در نظر گرفته شد:

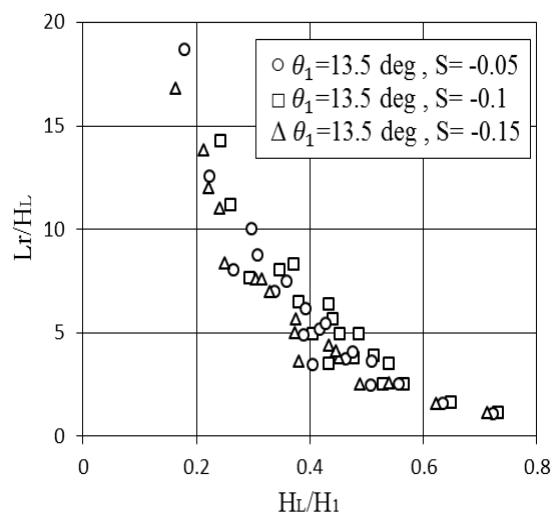
$$f\left(\frac{L_r}{H_L}, \frac{H_L}{H_1}, \tan\theta_1, \tan\theta_2, \frac{h_2}{h_1}\right) = 0 \quad (26)$$

که  $L_r$  طول غلتابی پرش،  $H_1$  و  $H_2$  به ترتیب کارمایه کل جریان در ابتدا و انتهای پرش و  $H_L = H_1 - H_2$



شکل ۷- طول غلتابی به ازای شیب‌های مختلف نهر بالادست

به صورتی که مقادیر مختلف آنها در شیب‌های مختلف نهر بالادست و حوضچه‌ی آرامش تقریباً بر هم منطبق هستند. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که رابطه دو فراسنج بدون



شکل ۶- طول غلتابی به ازای شیب‌های مختلف حوضچه آرامش

همانگونه که در ۶ و ۷ نشان داده شده است، رابطه‌ی

دو فراسنج بدون بعد  $\frac{L_r}{H_L}$  و  $\frac{H_L}{H_1}$  به صورت نمایی است،



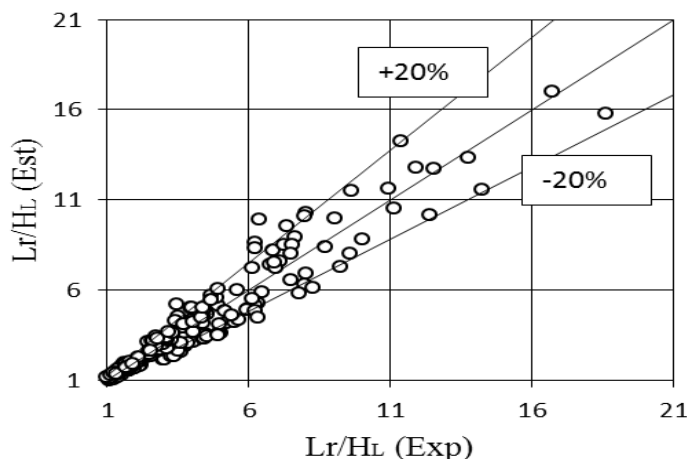
$$\frac{L_r}{H_L} = 38.23 \exp(-4.94 \frac{H_L}{H_1}) \quad (28)$$

مقدار  $R^2$  فوق ۰/۹ و درصد متوسط خطای آن ۱۳/۳ درصد محاسبه شد. شکل ۸ داده‌های محاسباتی از معادله ی ۲۸ را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

بعد فوق یک رابطه نمایی با ضرایب ثابت است که این ضرایب مستقل از شیب نهر بالادست و حوضچه‌ی آرامش هستند. در حالت کلی می‌توان نوشت:

$$\frac{L_r}{H_L} = a \exp(b \frac{H_L}{H_1}) \quad (27)$$

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقادیر ضرایب  $a$  و  $b$  به صورت زیر تعیین شدند:



شکل ۸- طول غلتابی آزمایشگاهی و محاسبه شده از معادله ۲۸

#### ۵- منابع:

- 1) Barenblatt, G.M.1979. Self-similarity and intermediate asymptotics. Consultants Bureau, New York.
- 2) Bradley, J., and Peterka, A.1957. Hydraulic design of stilling basins Stilling basin with sloping apron (Basin V). Journal of Hydraul Div 83(5):1-32.
- 3) Beirami, K., and Chamani, R. 2006. Hydraulic jump in sloping channel: Sequent depth. Journal of Hydraulic Engineering. 132, No. 1, 1061-1068.
- 4) Bateni, S. M., and Yazdandoost, F. 2009. Hydraulics of B-F and F jumps in adverse-slope stilling basins. Institution of Civil Engineers, 162(5): 321-327.
- 5) Carollo, F., Ferro, V., and Pampalone, V. 2009. New solution of classical hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering 135(6): 527-531.
- 6) Carollo, F., Ferro, V., and Pampalone, V. 2011. Sequent depth ratio of a B- jump. Journal of Hydraul Engineering 137(6): 651-658.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خصوصیات کاربردی پرش B-F، در سطوح شیبدار صاف بررسی گردیدند. نتایج نشان دادند که حوضچه‌های آرامش با شیب منفی موجب کاهش زیاد نسبت عمق‌های مزدوج و طول غلتابی می‌شوند که می‌توان از آنها در طراحی حوضچه‌های آرامش ارزانتر استفاده کرد. برای استخراج معادله به منظور محاسبه‌ی نسبت عمق‌های مزدوج، ابتدا با استفاده از تحلیل ابعادی و انگاره‌ی خود-تشابهی ناقص رابطه‌ی کلی مزدوج استخراج شد. برازش معادله‌ی استخراج شده با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که معادله‌ی حاصل از دقت بالایی برخوردار بوده و متوسط خطای آن کمتر از ۱۰ درصد است. طول غلتاب پرش هم بررسی شد و معادله‌ای بر اساس افت نسبی کارمایه در داخل پرش استخراج گردید. نتایج نشان دادند که ضرایب معادله‌ی مربوطه اعدادی ثابت و مستقل از شیب‌های نهر بالادست و حوضچه‌ی آرامش پائین دست هستند. همچنین متوسط خطای معادله‌ی تعیین طول غلتابی در این تحقیق بدست آمده ۱۳/۳ درصد محاسبه شد.

- 7) Ferro, V. 2006. The arrangement of the river basins. 2nd Ed, McGraw-Hill Milano, Italy (in Italian).
- 8) Hager, W. 1988. B-jump in sloping channel. Journal of Hydraulic Research 26(5): 539–558.
- 9) Kindsvater, C. 1944. The hydraulic jump in sloping channels. Trans ASCE 10(9): 1107–1120.
- 10) Kawagoshi, N., and Hager, W. 1990. B-jump in sloping channel II. Journal of Hydraulic Research 28(4): 461–480.
- 11) Khadara, M. H., and Rajagopals. 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. India Irrigation and Power Journal 29(1): 77–81.
- 12) Mccorquodale, J. A., and Mohamed, S. 1994. Hydraulic jump on adverse slope. IAHR Journal of Hydraulic Research 32(1): 119–130.
- 13) Ohtsu, I., and Yasuda, Y. 1991. Hydraulic jump in sloping channels. Journal of Hydraulic Engineering 117(7): 905–921.
- 14) Ohashi, K., Skabe, I., and Akis. 1973. Design of combined hydraulic jump and ski-jump energy dissipaters of flood spillway. Proceedings of 13th ICOLD Congress, Madrid. Q41(R.19), 311–333.
- 15) Shokrian, M., and Shafai bejestan, M. 2014. Mathematical expression for the B-jump sequent depth ratio on sloping bed. KSCE Journal of Civil Engineering 19(3): 790–795.
- 16) Stevense, J. 1944. Discussion on the hydraulic jump in sloping channels by C. E. Kindsvater. Transactions of the American Society of Civil Engineers. paper no. 2228, 1125–1135.