

## بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس

زهرا شجاعیان<sup>1\*</sup>، علی حسین‌زاده دلیر<sup>2</sup>، داود فرسادی‌زاده<sup>3</sup> و فرزین سلماسی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 89/3/26 تاریخ پذیرش: 89/5/17

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2-3- دانشیار و استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسول مکاتبه E-mail: [z.shojaeian64@gmail.com](mailto:z.shojaeian64@gmail.com)

### چکیده

حوضچه‌های آرامش قسمت کوتاهی از یک کانال کف سازی شده اند که به صورت سازه‌های خاص در انتهای سرریزها و هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد می‌کند برای کنترل پرش هیدرولیکی ساخته می‌شوند و هر چه طول آنها کوتاه تر باشد از نظر اقتصادی مناسب تر خواهند بود. هدف از این تحقیق بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای کانال با شیب معکوس می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که واگرایی و شیب معکوس کانال، نسبت اعماق مزدوج و طول پرش را کاهش می‌دهد. همچنین واگرایی باعث افزایش افت نسبی انرژی پرش نیز می‌گردد. اما در کانال با شیب معکوس تغییر محسوس در افت نسبی پرش نسبت به حالت کف افقی مشاهده نشد. بنابراین نقش واگرایی در افزایش افت نسبی انرژی پرش بیشتر از شیب معکوس است. نتایج هم چنین نشان داد که کاهش 37/22 درصد نسبت اعماق مزدوج و 61 درصد طول پرش و هم چنین افزایش 54 درصد افت انرژی پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش کلاسیک مشهود بوده است. بنابراین از مقاطع واگرا با شیب معکوس برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرام کننده جریان می‌توان استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، شیب معکوس، مقطع واگرا

## Investigation of Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Rectangular Sections on Inverse Slope

Z Shojaeian<sup>1\*</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>2</sup>, D Farsadizadeh<sup>3</sup> and F Salmasi<sup>3</sup>

Received: 16 June 2010 Accepted: 8 August 2010

<sup>1</sup>Former MSc Student, Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>2,3</sup> Assoc., and Assist, Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

\*Corresponding author: E-mail: [z.shojaeian64@gmail.com](mailto:z.shojaeian64@gmail.com)

### Abstract

Stilling basins are short lengths of paved channels placed at the end of spillways and any source of supercritical flow to control the hydraulic jump, therefore shortening the lengths of stilling basins will economically be feasible. The purpose of this study is to investigate the characteristics of hydraulic jump in divergent channels on inverse slopes. The results showed that the divergence and the inverse slope of the channel had noticeable effects on the hydraulic jump characteristics. It was shown that the divergence and inverse slope reduced sequent depth ratios and length of hydraulic jump and furthermore the channel divergence increased the relative head loss of the jump. However in channels with inverse slope there was not any remarkable change in relative head loss compared with the classical jump. Therefore, the role of channel divergence in the relative head loss of the hydraulic jump might be considered more than the role of inverse slope. The results also revealed that the reduction of 37.22 percent at sequent depth ratios and 61 percent at the length of hydraulic jump were evident compared with the classical jump. The relative head loss of the hydraulic jump in a divergent channel on inverse slope was 54 percent greater than the classical jump's one. Therefore, the divergent channel with inverse slope could be used as an energy dissipator to control the hydraulic jumps.

**Key words:** Divergent channel, Hydraulic jump, Reverse slope, Stilling basin.

### مقدمه

شده و در هر مورد سعی شده تا اقتصادی‌ترین حالت انتخاب شود. بیشترین تحقیقات بر روی کف‌های افقی و ندرتا کف‌های با شیب مثبت بوده و ایجاد شیب منفی در مسیر پرش اگرچه توانسته به عنوان یک عامل مهم در کاهش طول پرش و هزینه‌های احداث حوضچه آرامش موثر باشد، اما به دلیل مشکلاتی که بر سر راه تحقیق در این زمینه وجود دارد کمتر مورد توجه قرار گرفته

پرش هیدرولیکی به عنوان عامل مهم استهلاک انرژی از دیرباز مورد توجه بوده و روی عوامل کنترل موقعیت پرش و مشخصات آن در جهت اقتصادی‌تر کردن سازه‌ها تحقیقات قابل ملاحظه‌ای صورت گرفته است. بر این اساس حوضچه‌های آرامش با شکل‌ها و مشخصات متفاوت و شرایط حاکم بر جریان آب ساخته

در این تحقیق با فرض شکل ربع بیضی برای پروفیل پرش و به کارگیری اصول پیوستگی، انرژی و اندازه حرکت، روابطی برای نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی ارائه گردید. همچنین با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش‌هایی که در یک کانال آزمایشگاهی واگرا با مقطع مستطیلی و با زوایای واگرایی 0 تا 13 درجه انجام گرفت، صحت روابط تئوری ارزیابی شد. نتایج هم-چنین نشان داد که، واگرایی باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج، افزایش افت انرژی و کاهش طول پرش، در مقایسه با پرش کلاسیک می‌شود. با توجه به اینکه در مورد مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس تحقیقات زیادی صورت نگرفته لذا اقدام به انجام این تحقیق صورت پذیرفت. این تحقیق بر این فرضیه استوار است که واگرایی و شیب معکوس به‌طور هم‌زمان می‌تواند باعث تغییراتی در ویژه‌گی‌های پرش هیدرولیکی و کاهش طول پرش و افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی شود که در نهایت می‌توان سازه‌های مستهلک کننده انرژی اقتصادی‌تری طراحی نمود.

تئوری پرش هیدرولیکی در مقطع مستطیلی واگرا

شکل 1 طرح کلی از پرش هیدرولیکی واگرا در یک کانال مستطیلی را نشان می‌دهد. معادله مومنتم برای حجم کنترل نشان داده شده می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (اربابهیراما و ابلا 1971).

$$F_{sx} + F_{1x} - F_{2x} = \iint v_x (r\bar{V} \cdot d\bar{A}) \quad [1]$$

که در آن  $F_{sx}$ ، نیروی فشاری در جهت  $x$ ،  $F_{1x}$ ،  $F_{2x}$ ، نیروهای هیدرواستاتیک در مقاطع 1 و 2 و  $\iint v_x (r\bar{V} \cdot d\bar{A})$  مومنتم خروجی از حجم کنترل در جهت  $x$  هستند. مولفه نیروی هیدرواستاتیک در مقطع 1 و 2 به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$F_{1x} = \frac{\rho y_1^2 r_1}{2} \sin q, F_{2x} = \frac{\rho y_2^2 r_2}{2} \sin q \quad [2]$$

است (ابریشمی و حسینی 1384). پرش در روی حوضچه‌های با شیب معکوس در ابتدا توسط رز (بیرامی و چمنی 2006) و استیونس (1944) مورد مطالعه قرار گرفت و سپس توسط خدر و راجاگوپال (1972)، ابریشمی و صانعی (1994) ادامه یافت که به نتایج مفیدی منتهی شد. تحقیقات مذکور، نشان دادند که برای یک عمق معین با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه کاهش می‌یابد. همچنین شیب معکوس نقش مهمی در کاهش طول پرش داشته اما از نظر افت انرژی تغییر محسوسی بین حالت کف افقی با شیب معکوس مشاهده نشده است. پوزی و هسینگ (1938) تاثیر شیب جانبی را بر طول پرش در حوضچه نوزنقه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی که بر روی یک مدل آزمایشگاهی با شیب‌های جانبی - عمودی 1: 0/5 تا 2:1 صورت گرفت، مشخص شد که کاهش شیب جانبی باعث افزایش طول پرش نسبت به پرش کلاسیک می‌شود. امید (1376) خصوصیات و عملکرد پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش نوزنقه‌ای را به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کرد. در آن پژوهش، روابط تئوری برای نسبت اعماق مزدوج و افت نسبی انرژی ارائه شده و با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌هایی که بر روی یک مدل آزمایشگاهی با مقاطع مستطیلی و نوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی مختلف و اعداد فرود 2 تا 9 انجام شد، پارامترهای مهم پرش، از جمله طول آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش شیب جانبی باعث افزایش افت نسبی انرژی، کاهش نسبت اعماق مزدوج و افزایش طول نسبی پرش در مقایسه با پرش کلاسیک می‌شود. اسمعیلی و رکی (1382) ویژه‌گی‌های پرش هیدرولیکی در کانال نوزنقه‌ای واگرا را بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پارامترهای پرش هیدرولیکی در مقطع نوزنقه‌ای تغییرات بیشتری نسبت به مقطع مستطیلی واگرا دارد. تحقیق بر روی مقطع نوزنقه‌ای وگرا در 4 زاویه واگرایی 3، 5، 7 و 9 درجه و در کانالی به عرض 1 متر صورت پذیرفت.

اربابهیراما و ابلا (1971) ویژه‌گی‌های پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا را بررسی کردند.

با جانشینی معادلات 2، 5 و 6 و استفاده از معادله پیوستگی  $V_2 = \frac{V_1 y_1 r_1}{y_2 r_2}$  در معادله 1 و پس از ساده کردن معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$2(r_0 - 1) \left( \frac{y_0^2}{3} + 0.118 y_0 + 0.048 \right) + 1 - r_0 y_0^2 = 2F_1^2 \left( \frac{1 - r_0 y_0}{r_0 y_0} \right) \quad [7]$$

در رابطه 7 پارامترهای بی‌بعد عبارتند از:

$$F_1^2 = \frac{V^2}{gy_1} = \frac{Q^2}{4B_1^2 gy_1^3} \quad [8]$$

$$y_0 = \frac{y_2}{y_1} \quad [9]$$

$$r_0 = \frac{r_2}{r_1} \quad [10]$$

که معادله 7 نمایانگر پرش در کانال‌های واگرا می‌باشد.

با استفاده از معادلات انرژی و پیوستگی شکل کلی رابطه اتلاف انرژی بین مقاطع 1 و 2 بدست می‌آید:

$$\frac{V_1^2}{2g} + y_1 = \frac{V_2^2}{2g} + y_2 + (\Delta E)_{12} \quad [11]$$

در اینجا  $(\Delta E)_{12} = E_1 - E_2$  بوده و با استفاده از معادله پیوستگی می‌توان نوشت:

$$V_2 = \frac{V_1 y_1 r_1}{y_2 r_2} \quad [12]$$

$$\frac{(\Delta E)_{12}}{y_1} = \frac{F_1^2}{2} \left( \frac{r_0^2 y_0^2 - 1}{r_0^2 y_0^2} \right) + (1 - y_0) \quad [13]$$

در روابط فوق  $y_1$  عمق اولیه پرش،  $r_1$  فاصله مرکز پرش تا پیشانی پرش (شعاع اولیه پرش)،  $y_2$  عمق ثانویه پرش،  $r_2$  فاصله مرکز پرش تا انتهای پرش (شعاع ثانویه پرش) و  $q$  زاویه واگرایی دیواره‌ها می‌باشد. انتهای پرش جایی در نظر گرفته می‌شود که در آن، جریان آرام شده است. پروفیل سطح آب در پرش، ربعی از بیضی فرض شده که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{(y - y_1)^2}{(y_2 - y_1)^2} + \frac{(x - L)^2}{L^2} = 1 \quad [3]$$

در رابطه فوق  $y$  عمق پرش در هر نقطه،  $y_1$  عمق اولیه پرش،  $y_2$  عمق ثانویه پرش،  $x$  فاصله هر نقطه از مرکز پرش و  $L$  طول پرش می‌باشند. فشار جانبی در طول دیواره‌های جانبی هیدرواستاتیک فرض شده و لذا نیروی وارده به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$F_s = \int_0^L \frac{\rho g y^2}{2} dx \quad [4]$$

مولفه نیروهای جانبی در جهت  $x$ ، با استفاده از معادله 3 و 4 به صورت زیر در می‌آید:

$$F_{sx} = g(r_2 - r_1) \left( \frac{y_2^2}{3} + 0.118 y_2 y_1 + 0.048 y_1^2 \right) \sin q \quad [5]$$

ترم میزان مومنتم خروجی از حجم کنترل به صورت زیر بیان شده است:

$$\begin{aligned} \iint V_x (r \bar{v} d\bar{A}) &= r V_2^2 y_2 r_2 \int_0^q \cos q dq - r V_1^2 y_1 r_1 \int_0^q \cos q dq \\ &= r V_2^2 y_2 r_2 \sin q - r V_1^2 y_1 r_1 \sin q \end{aligned} \quad [6]$$

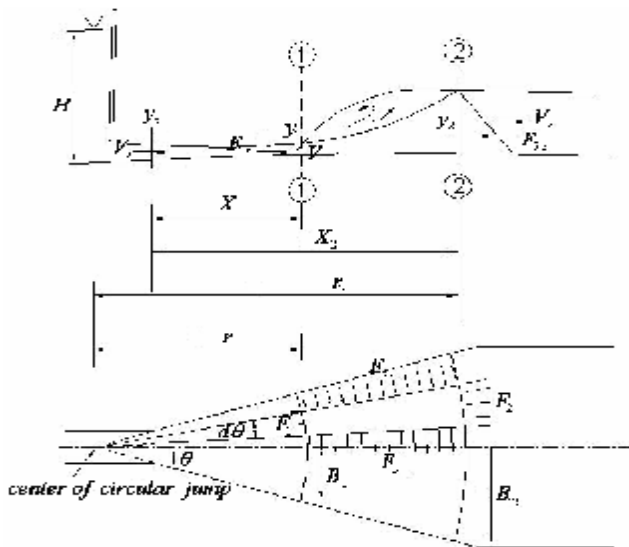
به این معنی که افت انرژی در پرش هیدرولیکی روی شیب‌های معکوس نسبت به انرژی کل سنجیده می‌شود.

تئوری پرش هیدرولیکی در مقطع واگرا روی شیب معکوس

حال اگر کف حوضچه را مانند شکل 2 با شیب معکوس در نظر بگیریم تاثیر نیروی وزن  $(W \sin a)$  آب نقش مهمی را ایفا نموده و لذا دخالت دادن این نیرو در بدست آوردن معادلات مربوطه ضروری است. از این رو معادله مومنتم برای حجم کنترل به صورت زیر نوشته می‌شود (ابریشمی و حسینی 1384):

$$F_{sx} + F_{1x} - F_{2x} - W \sin a = \iint v_x (r \bar{V} \cdot d\bar{A}) \quad [14]$$

$$W = \frac{1}{2} gKL(y_1 + y_2) \quad [15]$$



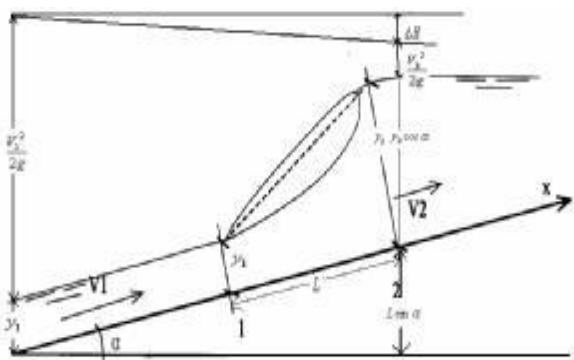
شکل 1- نمای کلی پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا (اربابهیراما و ابلا 1971)

که پس از جایگذاری و ساده کردن معادله زیر بدست می‌آید:

$$2(r_0 - 1) \left( \frac{y_0^2}{3} + 0.118y_0 + 0.048 \right) + 1 - r_0 y_0^2 - \frac{Lk(y_1 + y_2) \sin a}{y_1^2 r_1 \sin q} = 2F_1^2 \left( \frac{1 - r_0 y_0}{r_0 y_0} \right) \quad [16]$$

در معادله‌های بالا  $g$  وزن مخصوص آب،  $W$  وزن آب محصور بین ابتدا و انتهای پرش،  $\theta$  زاویه واگرایی و  $\alpha$  زاویه شیب معکوس کف حوضچه،  $y_1, y_2$  عمق اولیه و عمق ثانویه پرش و اندیس‌های 1 و 2 نشان‌دهنده مقطع مربوطه‌اند. برای تصحیح پروفیل فرضی نسبت به پروفیل واقعی و دخالت دادن اثر هوای مخلوط شده با آب، از ضریب  $K$  استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مقاطع واگرای بدون شیب اثر مقاومت ناشی از هوا ناچیز فرض می‌شود.

اتلاف انرژی پرش در مقاطع واگرا با شیب‌های معکوس نیز مانند معادله 13 می‌باشد با این تفاوت که  $y_2$  برابر با عمق ثانویه پرش به اضافه  $L \sin a$  می‌باشد.



شکل 2 - پرش هیدرولیکی بر روی کف با شیب معکوس (بیرامی و چمنی 2006)

#### مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با شیب معکوس، از مدل‌های فیزیکی از جنس پلاکسی گلاس که برای زاویه‌های واگرایی 4/56 درجه و 12 درجه و شیب معکوس 1/6 و

با توجه به اینکه اغلب پدیده‌ها در هیدرولیک به طرق پیچیده‌ای به پارامترهای هندسی و مؤلفه های جریان بستگی دارند، لذا با استفاده از آنالیز ابعادی، و پس از تجزیه و تحلیل آنها یکسری پارامترهای بی بعد استخراج گردید. پارامترهای موثر در پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا در شیب معکوس را به صورت زیر می توان نوشت:

$$f(r, m, v_1, y_1, y_2, B_1, B_2, \Delta Z, L, g, L_j) = 0 \quad [17]$$

که در این رابطه  $r$  عبارت است از جرم مخصوص سیال،  $m$  لزوجت دینامیک،  $V_1$  سرعت متوسط ورودی،  $y_1$  عمق جریان فوق بحرانی،  $y_2$  عمق جریان در انتهای پرش،  $B_1$  عرض مقطع در محل عمق جریان فوق بحرانی،  $B_2$  عرض مقطع در محل عمق ثانویه پرش،  $\Delta z$  ارتفاع بالاآمدگی انتهای حوضچه،  $L$  طول کف حوضچه روی شیب معکوس،  $g$  شتاب ثقل،  $L_j$  طول پرش. با استفاده از تئوری  $p$  باکینگهام رابطه (17) را به شکل زیر می توان ساده کرد.

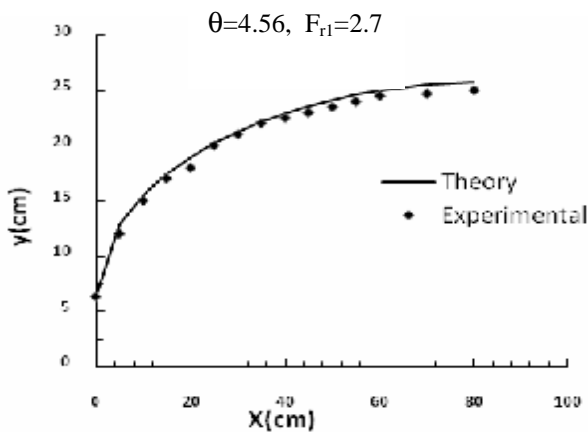
$$f\left(\frac{\rho v_1 y_1}{\mu}, \frac{v_1}{(g y_1)^{1/2}}, \frac{B_1}{y_1}, \frac{B_2}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{\Delta z}{y_1}, \frac{L}{y_1}\right) = 0 \quad [18]$$

با تقسیم برخی از پارامترهای بدون بعد رابطه 18 بر همدیگر، رابطه 19 را می توان بدست آورد:

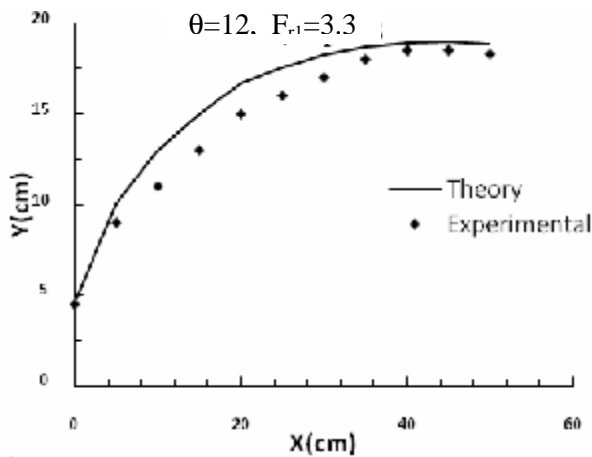
$$f\left(R_n, F_1, \frac{B_1}{B_2}, \frac{L}{\Delta Z}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{L}\right) = 0 \quad [19]$$

با توجه به اینکه مقادیر اعداد رینولدز  $(R_n) > 10^5$  در این آزمایش‌ها زیاد بوده است از عدد رینولدز می توان صرف نظر نمود. از طرفی از آنجائی که  $(B_1/B_2)$  و  $(B_2/L)$  به نوعی تأثیر زاویه واگرایی  $\theta$  و  $(L/\Delta Z)$  نیز تأثیر زاویه معکوس کف  $\alpha$  را شامل می شود، لذا می توان به جای این پارامترها، به ترتیب پارامترهای بی بعد  $\theta$  و  $\alpha$

5 درصد و شیب صفر درجه ساخته شد استفاده گردید. با برقراری شرایط هیدرولیکی مورد نظر، آزمایش‌های این تحقیق انجام گرفت. مراحل عملی و آزمایشات این تحقیق در فلوم مستطیلی به عرض 0/25 متر، ارتفاع 0/5 متر و طول 10 متر با شیب کف 0/002 انجام شد. آب از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه پمپاژ گردیده و توسط لوله‌ای با شیر کنترل به مخزن آرام کننده بالادست فلوم هدایت شده و از طریق یک تبدیل آرام کننده جریان وارد فلوم می گردد. در انتهای فلوم، یک دریچه تنظیم جریان جهت کنترل سطح آب در فلوم قرار دارد. جریان خروجی از فلوم، وارد مخزن پایین دست گردیده که اندازه گیری دبی جریان را از طریق یک سرریز مثلثی با زاویه راس 53 درجه و اسنجی شده میسر می سازد. برای اندازه گیری عمق از یک عمق سنج با دقت 0/1 میلی متر استفاده شد. برای ایجاد پایاب لازم، جهت تشکیل کامل پرش، از یک دریچه کشویی در انتهای کانال پایین دست استفاده گردید. پس از نصب مدل‌ها در فاصله تقریبی 4 متری از ابتدای فلوم 25 سانتی متری، آزمایش‌هایی در دبی‌های مختلف (9/60 تا 18/95 لیتر در ثانیه) و اعداد فرود مختلف 2/6 تا 3/7 صورت گرفت. با توجه به تأثیر عمق پایاب روی محل پرش هیدرولیکی به کمک دریچه‌های پایین دست، محل وقوع پرش در محدوده تبدیل واگرا تنظیم می گردید. پس از ثابت شدن و برقراری کامل پرش در محدوده تبدیل اقدام به اندازه گیری پارامترهای مورد نظر می گردید. این پارامترها عبارت بودند از عمق بالادست دریچه  $(y_p)$ ، ارتفاع بازشدگی دریچه  $(y_0)$ ، عمق اولیه پرش  $(y_1)$ ، عمق ثانویه پرش  $(y_2)$ ، عرض مقطع واگرا در محل عمق اولیه پرش  $(B_1)$ ، عرض مقطع واگرا در محل عمق ثانویه پرش  $(B_2)$ ، طول پرش  $(L_j)$  و ارتفاع آب روی سرریز مثلثی با زاویه راس 53 درجه. در اندازه گیری طول پرش با توجه به اینکه معیارهای متفاوتی برای تعریف آن وجود دارد، در این تحقیق، طول پرش از شروع تا جایی که غلطاب‌ها و نوسان‌های سطح آب در آن حداقل بوده و تغییرات عمق ناچیز می گردد، در نظر گرفته شد.



الف



ب

شکل ۳- مقایسه منحنی‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی برای پروفیل پرش در مقاطع مستطیلی واگرا

در اشکال فوق  $\theta$  نماد زاویه واگرایی و  $F_{r1}$  عدد فرود اولیه می‌باشد. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، تطابق زیادی بین منحنی‌های تئوری و داده‌های تجربی پروفیل پرش در مقاطع مستطیلی وجود دارد که این تطابق صحت فرضیات بکار گرفته شده در محاسبه نیروی جانبی در معادله اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از پرش را تأیید می‌نماید.

را قرار داد. هم‌چنین پارامتر  $\frac{L_j}{L}$  و  $\frac{L_j}{y_1}$  هر دو طول بدون بعد پرش را مشخص می‌سازند لذا می‌توان تاثیر عدد فرود، زاویه واگرایی و شیب معکوس را در روی اعماق مزدوج و طول پرش به صورت روابط زیر در مدل فیزیکی مطالعه کرد.

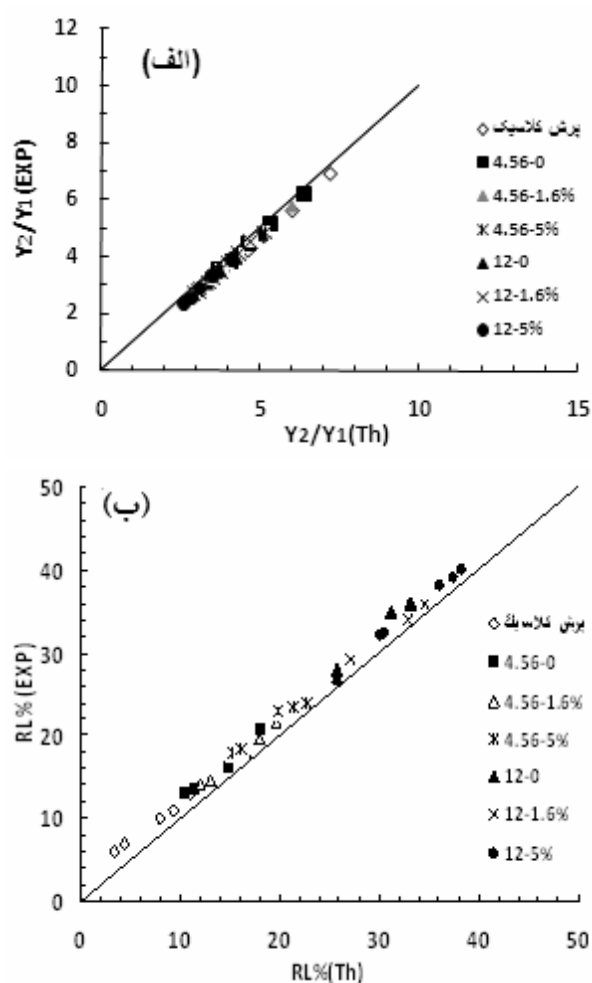
$$\frac{y_2}{y_1} = f(F_{r1}, q, a) \quad [20]$$

$$\frac{L_j}{y_1} \text{ OR } \frac{L_j}{L} = f(F_{r1}, q, a) \quad [21]$$

### نتایج و بحث

پروفیل پرش در مقاطع مستطیلی واگرا

یکی از تفاوت‌های اساسی در استخراج روابط تئوری پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با پرش‌های کلاسیک، وجود نیروهای جانبی در معادله اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشد. برای محاسبه این نیرو شناخت نوع معادله پروفیل سطح آب ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه به منظور استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه به اولیه، معادله ربع بیضی برای پروفیل سطح آب در طول پرش در نظر گرفته شده است (اربابهیراما و ابلا 1971)، لذا جهت بررسی صحت این فرض، در کلیه آزمایش‌ها پروفیل طولی پرش برداشت گردید. سپس برای تمام پروفیل‌های آزمایشگاهی، منحنی تئوری (منحنی بیضی معادله 4) ترسیم گردیده که همراه با پروفیل‌های آزمایشگاهی برای مقطع مستطیلی با زوایای واگرایی و اعداد فرود مختلف در شکل 3 نشان داده شده است.



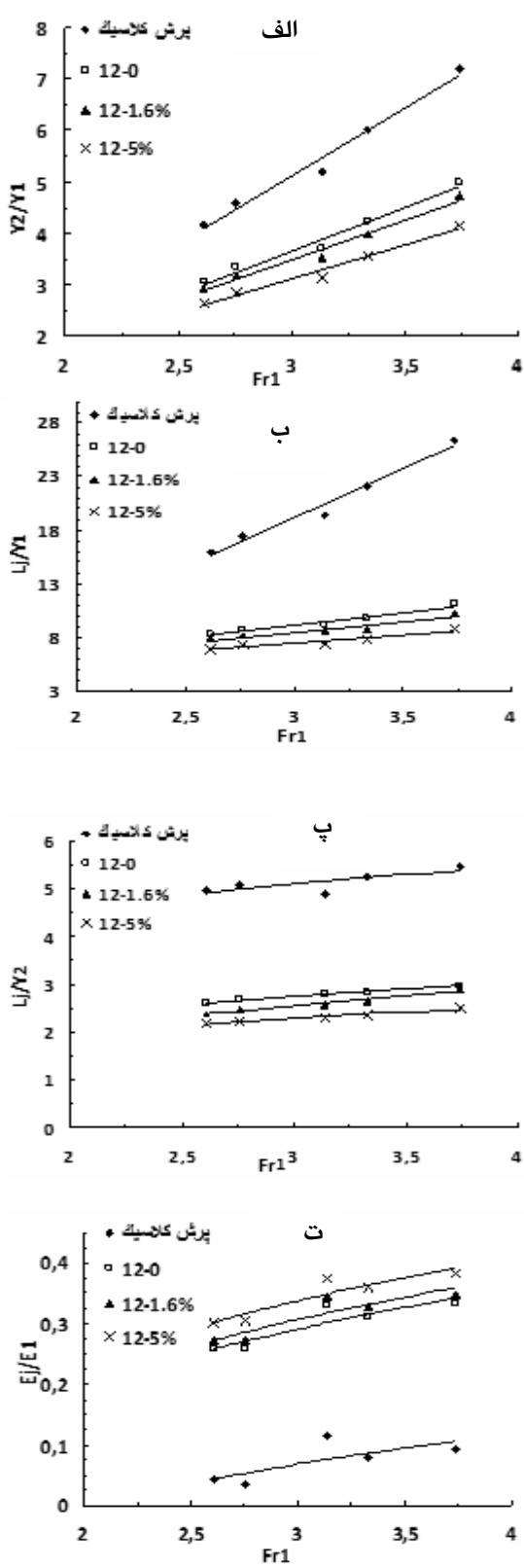
شکل ۴- مقایسه روابط تئوری و نتایج آزمایشگاهی اعماق مزدوج پرش (الف) و افت نسبی پرش (ب) در مقطع واگرا با شیب معکوس

برای بررسی روند تغییرات خصوصیات پرش در هر زاویه واگرایی با شیب معکوس، منحنی تغییرات پارامترهای پرش در مقابل اعداد فرود اولیه در شکل‌های 5 و 6 ترسیم گردید. در این شکل‌ها نقاط، مربوط به داده‌های آزمایشگاهی و خطوط ممتد از برآزش بهترین خط بر این نقاط حاصل شده است.

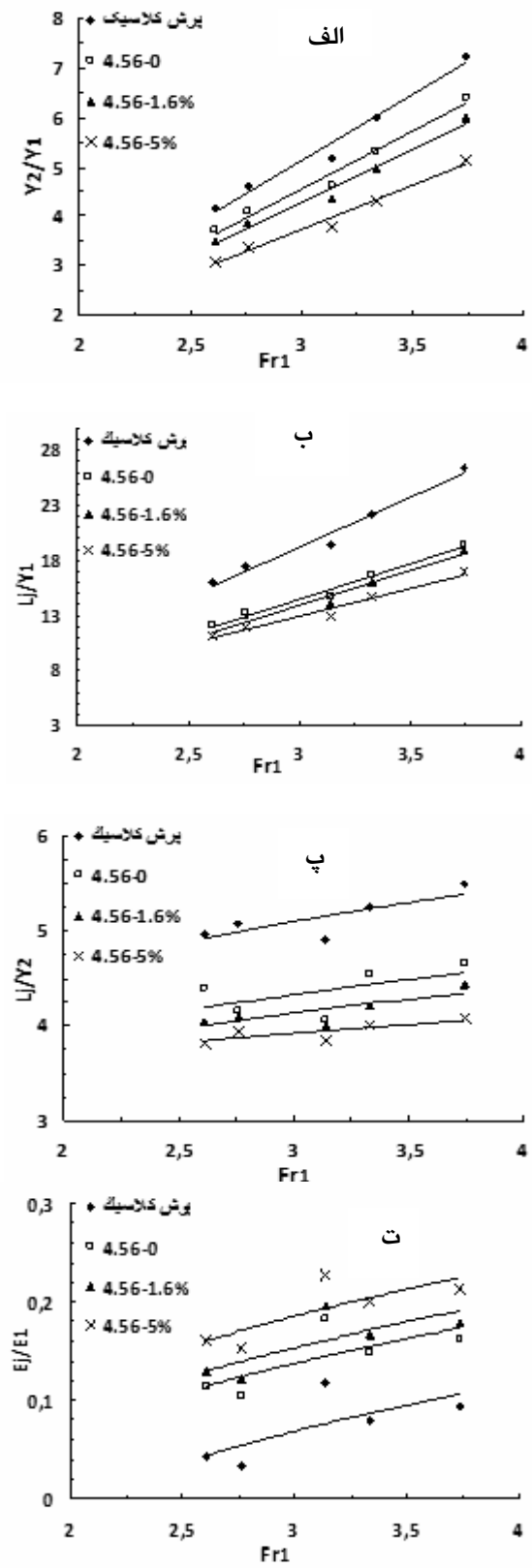
نتایج بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با شیب معکوس

جهت ارزیابی صحت روابط تئوری و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی، مقادیر تئوری متناظر با عمق‌های ثانویه و افت‌های نسبی انرژی از معادله‌های 16 و 13 محاسبه گردید. از آنجایی‌که در رابطه نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا با شیب معکوس، طول پرش از پارامترهای ورودی محسوب می‌شود، لذا برای محاسبه مقادیر تئوری از طول پرش آزمایشگاهی متناظر با آنها استفاده شد. پس از محاسبه کلیه مقادیر تئوری، به منظور ارزیابی و مقایسه روابط تئوری با مقادیر آزمایشگاهی، منحنی‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی در مقابل اعداد فرود اولیه ترسیم گردید. منحنی‌های ترسیم شده برای مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس در شکل‌های 4-الف و 4-ب آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، تطابق زیادی بین مقادیر تئوری و داده‌های برداشت شده آزمایشگاهی برای نسبت عمق ثانویه به اولیه و افت نسبی انرژی در مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس وجود دارد به طوری که همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تئوری بیش از 95 درصد می‌باشد. قابل توجه است که کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت عمق ثانویه به اولیه کمتر از مقادیر محاسبه شده آن می‌باشد، که این می‌تواند به دلیل خطای ناشی از اندازه‌گیری آزمایشگاهی، ساده‌سازی معادلات حاکم و وجود پدیده جداسازی در این گونه جریان‌ها باشد. لازم به ذکر است که در تمامی نمودارها عدد سمت چپ معرف زاویه واگرایی بر حسب درجه و عدد سمت راست معرف شیب معکوس بر حسب درصد و عدد صفر معرف کف بدون شیب است.





شکل ۶- تغییرات پارامترهای پرش با عدد فرود ( $Fr_1$ ) برای زاویه واگرایی ۱۲ درجه با شیب معکوس



شکل ۵- تغییرات پارامترهای پرش با عدد فرود ( $Fr_1$ ) برای زاویه واگرایی ۴/۵۶ درجه با شیب معکوس

کاهش می‌یابد. در واقع شیب منفی مشابه بالا آمدگی تدریجی بستر کانال عمل می‌کند که انرژی مخصوص در مقطع بالا آمده به اندازه مقداری که بالا آمده کاهش می‌یابد که وقتی جریان زیر بحرانی به آن برخورد می‌کند، سطح آب بر اثر کاهش انرژی مخصوص، افت پیدا می‌کند و دچار کاهش عمق می‌شود. از آنجا که معادله تئوری استخراج شده برای افت نسبی پرش به صورت رابطه 13 می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد افت نسبی پرش با نسبت عمق ثانویه به اولیه رابطه معکوس دارد از این-رو می‌توان نتیجه گرفت که افت نسبی انرژی با افزایش زاویه واگرایی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش طول نسی پرش و طول پرش نسبت به عمق ثانویه با افزایش زاویه واگرایی به دلیل کاهش طول مقطع واگرا در زاویه-های واگرایی بالا و تاثیر نیروی وزن در خلاف جهت جریان می‌باشد. از مطالب بیان شده می‌توان به نوعی به نتایج حاصل شده از این تحقیق دست یافت.

مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج تحقیق بختیاری

نتایج بدست آمده از این تحقیق در مقایسه با نتایج بدست آمده از تحقیق بختیاری (1387) که بر روی حوضچه واگرای بدون شیب انجام شد نشان می‌دهد که پارامترهای پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای بدون شیب تغییرات کمتری نسبت به مقطع واگرا با شیب معکوس دارد. همچنین در مقایسه با تحقیق بر روی مقطع واگرا در 5 زاویه واگرایی 5، 12/5، 15 و 22/5 درجه و در کانالی به عرض 0/25 متر نشان داد که نتایج کلی تغییرات پارامترهای پرش مشابه با نتایج حاصل از این تحقیق بود. یعنی افزایش در زاویه واگرایی موجب کاهش پارامترهای اعماق مزدوج پرش، طول نسبی پرش و نسبت طول پرش به عمق ثانویه و افزایش افت نسبی پرش گردید. این تغییرات با وجود شیب معکوس در کف افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در نمودارهای شکل 7 منحنی‌های بختیاری با خط چین و اشکال تو خالی نشان داده شده است.

مقایسه صورت گرفته در نمودارهای بالا نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود اولیه نسبت اعماق مزدوج و طول نسبی پرش به صورت خطی، افت نسبی پرش و نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش به صورت غیر خطی، افزایش می‌یابد. همین وضعیت در مقطع مستطیلی مشاهده می‌گردد. اما افزایش این پارامترها در مقطع مستطیلی بیشتر از مقاطع واگرا می‌باشد. همچنین این افزایش در مقاطع واگرا بدون شیب معکوس بیشتر از مقاطع واگرا با شیب معکوس می‌باشد. نمودارها نشان می‌دهد که افزایش افت نسبی انرژی پرش در مقاطع واگرا بیشتر از مقطع مستطیلی می‌باشد. همچنین افت نسبی انرژی در مقاطع واگرا با شیب معکوس مقداری بیشتر از افت انرژی در مقاطع واگرا بدون شیب معکوس می‌باشد که این افزایش خیلی چشمگیر نیست.

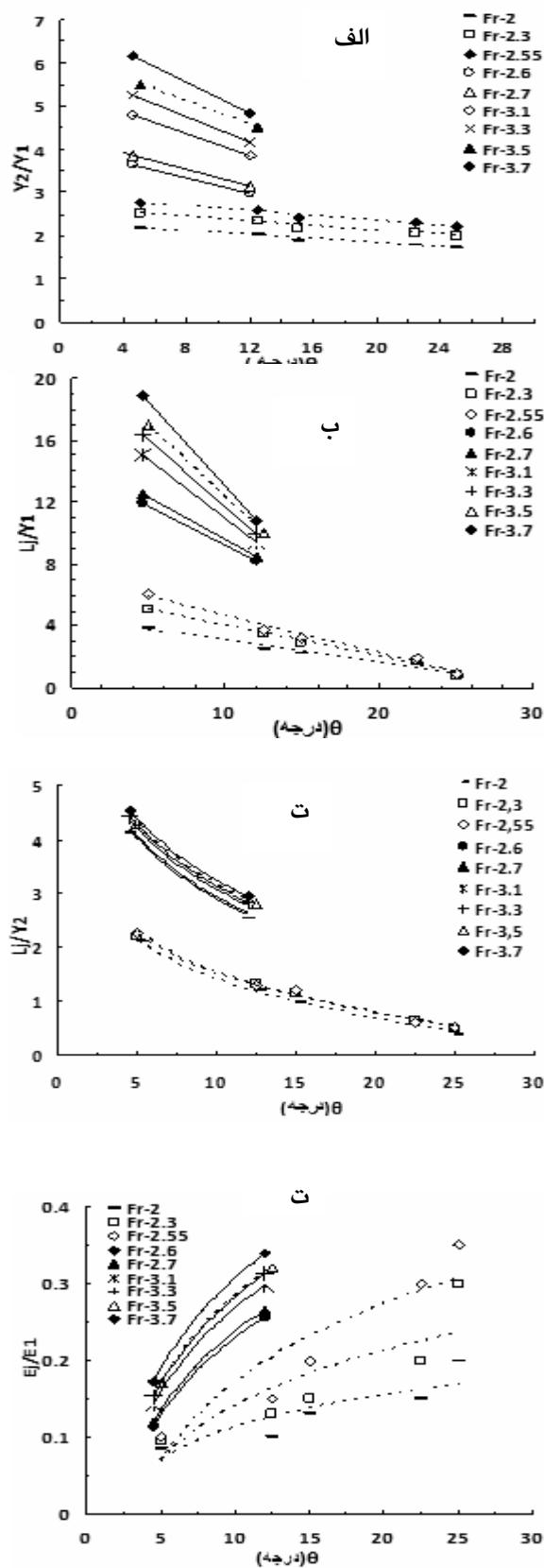
در توجیه این پدیده می‌توان بیان نمود که در مقاطع واگرا با توجه به اینکه عرض مقطع به تدریج در حال افزایش می‌باشد لذا حد فاصل مقاطع 1 و 2 دو وضعیت پیش می‌آید اول اینکه در زاویه‌های واگرایی بالاتر جریان‌های ثانویه بوجود می‌آیند. جریان‌های ثانویه جریان‌هایی هستند که در صفحه مقطع جریان و یا حول محوری عمود بر صفحه مقطع جریان به وجود می‌آیند، که خود موجب اتلاف انرژی می‌گردد. دوم اینکه به دلیل واگرایی دیواره‌ها نیروهای جانبی به حجم کنترل وارد می‌گردد لذا ترم جدیدی در معادله مومنتم وارد می‌گردد همچنین در قسمت‌های قبل دو موضوع بیان گردید اول اینکه در یک طول معین در زاویه‌های بالاتر عرض افزایش می‌یابد، که موجب کاهش نسبت اعماق مزدوج در زوایای بالاتر می‌شود. ثانیاً با افزایش زاویه واگرایی طول مقطع واگرا کاهش پیدا می‌کند. این مطلب را می‌توان بدین‌گونه تفسیر نمود که در یک طول معین عرض مقطع 2 در زاویه‌های واگرایی بالاتر، بیشتر از عرض مقطع 2 در زاویه‌های واگرایی کمتر می‌باشد، لذا طبق قانون پیوستگی افزایش عرض کف در مقطع پایین دست منجر به کاهش ارتفاع آب می‌گردد. همچنین با افزایش زاویه واگرایی سرعت جت آب کاهش یافته و منجر به ایجاد عمق ثانویه به اولیه کمتر می‌گردد. هم-چنین با افزایش شیب منفی نسبت عمق ثانویه به اولیه

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر تغییرات توام زاویه واگرایی و شیب معکوس بر عملکرد پارامترهای پرش، به طور نظری و عملی مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی خصوصیات پرش و مقایسه نتایج مربوط به زوایای واگرایی و شیب‌های معکوس، مشخص شد که حوضچه‌های آرامش واگرا با شیب معکوس علاوه بر مزیت عدم نیاز به سازه تبدیل در ابتدا و انتها، از نظر مشخصات و عملکرد پرش وضع مطلوب‌تری نسبت به پرش در حوضچه‌های کلاسیک داشته و می‌تواند گزینه خوبی برای جایگزینی حوضچه‌های معمولی باشد. علاوه بر نتیجه‌گیری کلی فوق، نتایج زیر نیز از پژوهش حاضر به دست آمده است:

- 1- مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی پروفیل‌های طولی پرش و منحنی‌های تئوری دیده شد که صحت فرضیه پیشنهادی معادله بیضی برای پروفیل طولی در معادله تئوری پرش را تایید می‌کند.
- 2- در کلیه آزمایش‌ها، بین مقادیر تئوری و نتایج آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه و افت نسبی پرش هم‌بستگی خوبی وجود دارد.
- 3- در هر زاویه واگرایی، با افزایش عدد فرود اولیه طول نسبی پرش و اعماق مزدوج به صورت خطی و نسبت طول پرش به عمق ثانویه و افت نسبی پرش به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. نتایج هم چنین نشان داد که کاهش  $37/22$  درصد نسبت اعماق مزدوج و  $61$  درصد طول پرش هیدرولیکی در مقطع واگرایی  $4/56$  و  $12$  درجه با شیب معکوس  $1/6$  و  $5$  درصد در مقایسه با پرش کلاسیک مشهود بوده است. بنابراین از مقاطع واگرا با شیب معکوس برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرام کننده جریان می‌توان استفاده نمود. نتایج تحقیقات آراباه‌پیراما (1971) نیز این مطلب را تایید می‌کند.
- 4- واگرایی دیواره‌ها، در تثبیت موقعیت پرش و کاهش طول آن مؤثر می‌باشد.

- 5- در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب معکوس در کف، نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه و طول نسبی پرش به صورت خطی کاهش می‌یابد اما اثر



شکل ۷- مقایسه منحنی‌های تغییرات طول نسبی پرش نسبت به زاویه واگرایی در اعداد فرود مختلف با تحقیق بختیاری (۱۳۸۷)

نسبی پرش و نسبت طول پرش به عمق ثانویه و افزایش افت نسبی پرش گردید.

8- حوضچه‌های آرامش واگرا با شیب معکوس در مقطع مستطیلی یک نوع از حوضچه‌های آرامش می‌باشد که به دلیل عدم نیاز به استفاده از سازه تبدیل در ابتدا و انتهای آنها، جایگزینی مناسبی برای این گونه حوضچه‌ها می‌تواند باشد. از این تحقیق می‌توان به عنوان ایده‌ای در طراحی حوضچه‌های آرامش استفاده نمود. از این تحقیق نتیجه گرفته می‌شود که حوضچه‌های آرامش با دیواره‌های واگرا در اتلاف انرژی پرش بسیار مؤثرتر از حوضچه‌های آرامش مستقیم عمل می‌نمایند.

افزایش شیب منفی در یک مقطع واگرا بر مقدار افت نسبی انرژی نامحسوس است. نقش واگرایی در افزایش افت نسبی انرژی بیشتر از شیب معکوس می‌باشد

6- بین نتایج این تحقیق که بر روی مقاطع واگرا با شیب معکوس بوده با نتایج حاصل از تحقیق بر روی مقاطع واگرایی بدون شیب هم‌خوانی خوبی وجود دارد.

7- نتایج بدست آمده از این تحقیق در مقایسه با نتایج بدست آمده از تحقیق ورکی (1384) نشان داد که نتایج کلی تغییرات پارامترهای پرش مشابه با نتایج حاصل از این تحقیق بود. یعنی افزایش در زاویه واگرایی موجب کاهش پارامترهای اعماق مزدوج پرش، طول

#### منابع مورد استفاده

ابریشمی ج و حسینی س م، 1384. هیدرولیک کانالهای باز. انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا (ع). چاپ دوازدهم.

اسمعیلی ورکی م، 1382. مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه آرامش دوزنقه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

امید مح، 1376. پرش هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه‌ای. مجله علوم کشاورزی ایران 28. صفحات 113-121.

بختیاری م، 1387. بررسی هیدرولیکی پارامترهای پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا (تبدیل‌های خروجی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

Abrishami J and Saneie M, 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. Iranian Journal of Water Research Engineering 2: 51-63.

Arabhabhrama A and Abela A, 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 97: 31-42.

Beirami MK and Chamani MR, 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: Sequent depth ratio. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 132: 1061-1068.

Khadar A and Rajagopal S, 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. J Irrig Pwr India, 29: 77-82.

Posey CJ and Hsing PS, 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Engineering News Record 121: 797-798.

Stevens JC, 1944. Discussion of the paper by Kindsvater, Hydraulic jump in sloping channel, Trans ASCE 109: 1125-1135.