

## معادلات مستقیم برای تعیین عمق ثانویه و افت انرژی پرش هیدرولیکی در کانال‌های ذوزنقه‌ای با شیب کم

بهنام شفیعی ثابت<sup>۱</sup> مجید توانگری<sup>۲</sup> غلامعباس بارانی<sup>۳</sup> محمد جواد خانجانی<sup>۳</sup>

(دریافت ۸۵/۱۲/۲۶ پذیرش ۸۶/۶/۱۰)

### چکیده

طراحی کانال‌ها و حوضچه‌های آرامش مستلزم تعیین عمق ثانویه و افت انرژی پرش هیدرولیکی می‌باشد. حل معادلات اندازه حرکت و انرژی در یک کانال با مقطع ذوزنقه‌ای دارای شیب کم با روشهای پیچیده سعی و خطا یا دیگر روشهای عددی امکان پذیر است. راه حل دیگر استفاده از منحنی نیروی مخصوص - عمق به‌ازای دبی مشخص یا استفاده از جدولها و نمودارهای کمکی است. در این تحقیق، ابتدا معادلات اندازه حرکت و انرژی به معادلات بی‌بعد تبدیل شده‌اند. سپس با استفاده از نتایج حل عددی این معادلات و با آنالیز رگرسیون غیرخطی چندمتغیره، معادلات مستقیمی برای تعیین عمق ثانویه و افت انرژی پرش هیدرولیکی در کانال‌های ذوزنقه‌ای با شیب کم، پیشنهاد شده است. معادلات پیشنهادی دقت بسیار خوبی در محدوده کاربردهای مهندسی دارند و برای محدوده وسیعی از مقادیر دبی، ضریب شکل مقطع و اعداد فرود ۱ تا ۱۳ قابل استفاده می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** کانال‌های باز، پرش هیدرولیکی، مقطع ذوزنقه‌ای، افت انرژی، عدد فرود.

## Direct Equations for Sequent Depth and Energy Loss of Hydraulic Jump in Low Slope Trapezoidal Channel

Behnam Shafiee Sabet<sup>1</sup> Majid Tavangari<sup>2</sup> Gholamabbas Barani<sup>3</sup> Mohammad Javad Khanjani<sup>3</sup>

(Received Mar. 16, 2007 Accepted Sep. 1, 2007)

### Abstract

Design of channels and stilling basins requires knowledge of various elements of hydraulic jump such as discharge, sequent depth, and energy loss. In the case of low slope trapezoidal channel, the solutions of energy and momentum equations involve tedious methods of trial and error. To solve this problem, various methods have evolved in terms of tables, graphs, and nomograms or a set of empirical equations valid only in a specific range. In this study, the energy and momentum equations are first converted to the dimensionless form. Then, nonlinear multiple regression analysis of the data set obtained from numerical solution of equations was used to develop direct explicit empirical equations for post-jump depth and energy loss in a low slope trapezoidal channel. The proposed equations for hydraulic jump elements are of high accuracy and applicable to a wide range of discharge intensity values and initial conditions without any limitations in comparison to other methods attempted so far.

**Keywords:** Open Channels, Hydraulic Jump, Trapezoidal Channels, Energy Loss, Froude Number.

1. Faculty Member at University of Gilan, and PhD Student of Hydraulic Structures, Civil Eng. Department, Shahid Bahonar University, behnamshafiee@yahoo.com
2. PhD Student of Hydraulic Structures, Civil Eng. Department, Shahid Bahonar University
3. Professor, Civil Eng. Department, Shahid Bahonar University

- ۱- عضو هیئت علمی دانشگاه گیلان، دانشجوی دکتری عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، behnamshafiee@yahoo.com
- ۲- دانشجوی دکتری عمران - سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۳- استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۶ درصد هستند و به وسیله سوامی و همکاران و سینگ<sup>۷</sup> در سال ۲۰۰۵ مورد نقد و بررسی قرار گرفتند [۱، ۷ و ۸].

در این مقاله، معادلات ساده و صریحی پیشنهاد شده‌اند که با استفاده از آنها می‌توان شرایط جریان در مقطع ثانویه پرش هیدرولیکی را در کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای زمانی که شرایط جریان در مقطع اولیه معلوم باشد، تقریب زد. این معادلات با استفاده از آنالیز رگرسیون غیر خطی چند متغیره اطلاعات به دست آمده از حل عددی معادلات اندازه حرکت و انرژی به دست آمده‌اند و در محدوده وسیعی از شرایط جریان قابل استفاده بوده و دارای دقت بسیار خوبی در برآورد عمق ثانویه و افت انرژی پرش هیدرولیکی هستند.

## ۲- مواد و روشها

### ۱-۲- معادلات حاکم

رابطه بین عمقهای اولیه و ثانویه، دبی جریان و مشخصات هندسی جریان در مقطع اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی در یک کانال باز با مقطع دوزنقه‌ای بر اساس اصل اندازه حرکت و با توجه به فرضیات زیر به دست می‌آید:

۱- بستر کانال افقی است یا شیب طولی آن ملایم است، به طوری که مؤلفه افقی وزن توده آبی که پرش را تشکیل می‌دهد، به اندازه کافی کوچک است.

۲- کانال دوزنقه‌ای و منشوری و با شیب‌های جانبی دو طرف مساوی z است.

۳- پرش به طور ناگهانی رخ می‌دهد و جریان قبل و بعد از پرش بدون اصطکاک است.

۴- طول پرش کوچک است به طوری که اصطکاک سطح کانال ناچیز است.

۵- توزیع سرعت در مقطع کانال قبل و بعد از پرش یکنواخت و توزیع فشار هیدروستاتیک است و ضریب تصحیح اندازه حرکت یک است.

مشخصات مقطع جریان که در شکل ۱ نشان داده شده است، به صورت زیر قابل بیان است:

$$A = \left(\frac{b}{y} + z\right)y^2, \quad T = \left(\frac{b}{y} + 2z\right)y$$

$$\bar{y} = \left(\frac{\frac{b}{2y} + \frac{z}{3}}{\frac{b}{y} + z}\right)y, \quad D = \frac{A}{T} \quad (1)$$

پرش هیدرولیکی از مباحث مهم در هیدرولیک کانال‌های باز است که با توجه به کاربردهای آن در زمینه‌های مختلف از جمله کاهش انرژی جریان عبوری از روی سرریز سدها، افزایش تراز آب در کانال‌ها به منظور پخش آب و مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب، مطالعات دامنه داری روی آن صورت گرفته است. برای طراحی کانال‌ها و حوضچه‌های آرامش لازم است اجزای مختلف پرش هیدرولیکی مانند عمقهای اولیه و ثانویه پرش، افت انرژی و کارآیی پرش برحسب مقادیر مختلف دبی جریان، عدد فرود، عرض کف و شیب جانبی مجرا مشخص شود. برای حل این مسئله در کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای روشهای مختلفی که غالباً بر مبنای استفاده از جدولها، منحنی‌ها یا مجموعه‌ای از روابط تجربی که تنها در محدوده مشخصی از داده‌ها اعتبار دارند، ارائه شده است. راه حل دیگر، حل معادلات اندازه حرکت و انرژی مخصوص با استفاده از روشهای سعی و خطا یا روشهای دیگر است. استفاده از این روشها به منظور بررسی‌های تحلیلی مسائل مربوط به طراحی، دشوار است [۱]. اشتراک<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۸ با استفاده از تقریب ریاضی روش ساده‌ای را برای محاسبه عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال‌های با مقطع دایره پیشنهاد کرد که دارای خطای حدود ۱۰ درصد است [۲]. چادری<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۳ و چاو<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۳ منحنی‌های کمی برای تخمین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال‌های دوزنقه‌ای ارائه نمودند [۳ و ۴]. اداره عمران ایالات متحده<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۳ نمودارهای تحلیلی مختلفی برای تعیین نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه و افت انرژی پرش هیدرولیکی بر حسب عدد فرود و ضریب شکل مقطع کانال‌های دوزنقه‌ای ارائه نمود، لیکن این نمودارها در محدوده‌های پایین عدد فرود و محدوده‌های بالای ضریب شکل مقطع قابل استفاده نیستند [۵]. سوامی<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از قضیه لاگرانژ، رابطه‌های مستقیمی برای محاسبه اجزای پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی افقی ارائه نمودند [۶]. چوراسیا<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۳ با استفاده از رگرسیون غیرخطی چند متغیره معادلات مستقیمی را برای تعیین اجزای پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی افقی پیشنهاد کرد. این معادلات دارای خطایی کمتر از

<sup>1</sup> Strub

<sup>2</sup> Chaudhry

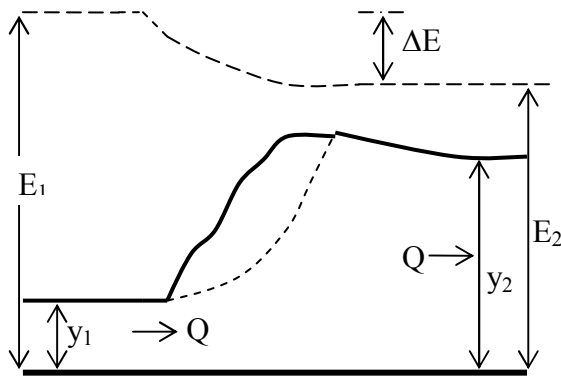
<sup>3</sup> Chow

<sup>4</sup> USBR

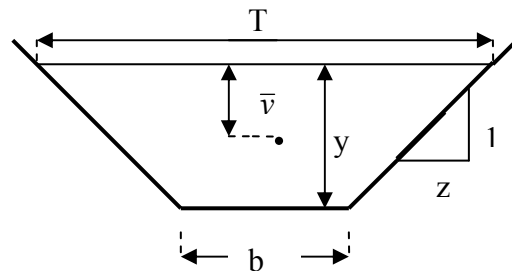
<sup>5</sup> Swamee

<sup>6</sup> Chaurasia

<sup>7</sup> Singh



ب- مقطع طولی پرش هیدرولیکی



الف- مقطع عرضی کانال ذوزنقه‌ای

شکل ۱- مشخصات مقاطع جریان

ابعادی این شش کمیت به چهار کمیت بی بعد  $\Delta E/E_1$ ،  $Fr_1$ ،  $b/y_1$  و  $Z$  تقلیل می‌یابند.

### ۲-۲- معادلات برای تعیین عمق ثانویه

با جایگزینی روابط ۱ و ۳ در رابطه ۲ می‌توان معادله زیر را که بر حسب پارامترهای بی بعد تنظیم شده است، به دست آورد:

$$\left(\frac{b}{zy_1} + 1\right)^2 \times Fr_1^2 \times \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + 0.5 \left(\frac{b}{zy_1} + \frac{1}{3}\right) \times \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 = \left(\frac{b}{zy_1} + 2\right) \times \left(\frac{b}{zy_1} + \frac{1}{3}\right) \times Fr_1^2 \times \left(\frac{y_2}{y_1}\right) + \left(\frac{3b}{zy_1} + 2\left(\frac{y_2}{y_1}\right)\right) \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^4 \quad (6)$$

که در این رابطه،  $b/(zy)$  ضریب شکل مقطع می‌باشد.

حل عددی رابطه ۶،  $y_2/y_1$  را برای مجموعه‌ای از مقادیر  $Fr_1$ ،  $b/y_1$  و  $Z$  به دست می‌دهد. با انجام این تحلیل برای  $1 \leq Fr_1 \leq 13$ ،  $0.1 \leq b/y_1 \leq 50$ ، و  $0.5 \leq Z \leq 2$  مقدار  $y_2/y_1$  به ازای محدوده بسیار وسیعی از داده‌ها به دست آمد. با تحلیل رگرسیون غیرخطی چند متغیره حدود ۵۳۰۰۰ داده تولید شده از حل عددی رابطه ۶، معادلات مستقیم زیر برای محاسبه  $y_2/y_1$  حاصل گردید. این معادلات دارای متوسط قدر مطلق خطای ۱/۵ درصد و حداکثر خطای  $\pm 7$  درصد در تعیین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌باشند (جدول ۱):

که در این معادلات  $A$  سطح مقطع،  $D$  عمق هیدرولیکی جریان و  $\bar{y}$  فاصله مرکز هندسی مقطع جریان تا سطح آزاد می‌باشند. معادله اندازه حرکت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_1 A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_2 A_2 \quad (2)$$

با دقت در روابط ۱ و ۲ مشخص می‌شود که کمیت‌های مؤثر در عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ( $y_2$ ) عبارت‌اند از:  $Q$ ،  $y_1$ ،  $b$ ،  $z$  و  $g$ . با استفاده از آنالیز ابعادی این شش کمیت به چهار کمیت بی بعد  $y_2/y_1$ ،  $Fr_1$ ،  $b/y_1$  و  $Z$  تقلیل می‌یابند. عدد فرود جریان در مقاطع اولیه و ثانویه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Fr_1^2 = \frac{v_1^2}{gD_1} = \frac{Q^2}{gD_1 A_1^2} \quad , \quad Fr_2^2 = \frac{v_2^2}{gD_2} = \frac{Q^2}{gD_2 A_2^2} \quad (3)$$

انرژی مخصوص در مقطع اولیه (قبل از پرش) و مقطع ثانویه (بعد از پرش) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_1 = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad , \quad (4)$$

$$E_2 = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} = y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

افت انرژی و نسبت افت انرژی به انرژی اولیه نیز به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad , \quad \frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

روابط ۴ و ۵ نشان می‌دهند که کمیت‌های مؤثر بر نسبت افت انرژی ( $\Delta E/E_1$ ) عبارت‌اند از:  $Q$ ،  $y_1$ ،  $b$ ،  $z$  و  $g$ . با استفاده از آنالیز

حل عددی همزمان روابط ۶ و ۱۰،  $\Delta E/E_1$  را برای مجموعه‌ای از مقادیر  $Fr_1$ ،  $b/y_1$  و  $z$  به دست می‌دهد. با انجام تحلیل رگرسیون غیرخطی چند متغیره حدود ۴۲۰۰۰ داده تولید شده، معادلات مستقیم زیر برای محاسبه  $\Delta E/E_1$  حاصل گردید. این معادلات دارای متوسط قدر مطلق خطای ۱/۵ درصد و حداکثر خطای ۱۰  $\pm$  درصد در تعیین نسبت افت انرژی به انرژی اولیه پرش هیدرولیکی هستند و در محدوده بسیار وسیعی از شرایط اولیه قابل استفاده می‌باشند (جدول ۲).

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \alpha' \left( \frac{b}{zy_1} \right)^{\beta'} \cdot Fr_1^{\gamma'} \quad (11)$$

از آنجا که در پرش هیدرولیکی موجی ( $1 \leq Fr_1 \leq 1/V$ ) نسبت افت انرژی به انرژی اولیه پرش بسیار کوچک است، از ارائه رابطه برای این حالت اجتناب شده است.

### ۳- نتایج و بحث

بر اساس آنچه مطرح گردید، اگر شرایط جریان قبل از وقوع پرش هیدرولیکی معلوم باشد، با محاسبه پارامترهای بی بعد  $b/(zy_1)$  و  $Fr_1 = Q/(A_1 \times (gD_1)^{0.5})$  از آنجا عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ( $y_2$ )، مستقیماً تعیین می‌شود.

در جدول ۳، مقادیر  $y_2/y_1$  حاصل از رابطه پیشنهادی ۸، در کنار مقادیر دقیق حاصل از حل عددی رابطه ۶ برای ۲۷ وضعیت مختلف، جهت مقایسه آورده شده است. در هر مورد درصد خطای استفاده از معادلات پیشنهادی قید شده است. خطای استفاده از روابط پیشنهادی برای مجموعه‌ای از داده‌ها که در آنالیز رگرسیون مورد استفاده قرار گرفته‌اند از رابطه  $(y_{2a} - y_{2c})/y_{2a} \times 100$  تعیین شده است، که در این رابطه  $y_{2a}$  و  $y_{2c}$  به ترتیب مقادیر حاصل از روش عددی و روابط پیشنهادی هستند.

جدول ۱- مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  در رابطه ۷

ملاحظات	ضریب تعیین ( $R^2$ )	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$Fr_1$
$1 \leq b/y_1 \leq 11$	۰/۹۸	۱/۰۵۷۳	۰/۰۵۱۶	۰/۹۵۵۷	۲/۵ تا ۱/۰۱
$5 \leq b/y_1 \leq 25$	۰/۹۸	۰/۹۸۸۸	۰/۰۷۷۰	۰/۹۷۴۰	۴/۵ تا ۲/۵
$15 \leq b/y_1 \leq 50$	۰/۹۹	۰/۹۳۶۰	۰/۰۹۳۹	۱/۰۱۲۰	۱۳ تا ۴/۵

جدول ۲- مقادیر  $\alpha'$ ،  $\beta'$  و  $\gamma'$  در رابطه ۱۱

ملاحظات	ضریب تعیین ( $R^2$ )	$\gamma'$	$\beta'$	$\alpha'$	$Fr_1$
$3 \leq b/y_1 \leq 10$	۱/۰۹	۳/۴۵۲۰	-۰/۰۲۸۴	۰/۰۰۹۱	۲/۵ تا ۱/۷
$5 \leq b/y_1 \leq 25$	۱/۰۷	۱/۵۴۱۲	-۰/۰۳۷۳	۰/۰۵۴۲	۴/۵ تا ۲/۵
$15 \leq b/y_1 \leq 50$	۱/۰۴	۰/۴۹۲۵	-۰/۰۲۴۱	۰/۲۵۹۹	۱۳ تا ۴/۵

$$\frac{y_2}{y_1} = \alpha \left( \frac{b}{zy_1} \right)^{\beta} \cdot Fr_1^{\gamma} \quad (7)$$

### ۳-۲- معادلات برای تعیین افت انرژی

با جایگذاری روابط ۴ در رابطه ۵ و با استفاده از رابطه ۳، برای نسبت افت انرژی به انرژی اولیه پرش هیدرولیکی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{\frac{y_2}{y_1} + \frac{D_2}{2y_1} \times Fr_2^2}{1 + \frac{D_1}{2y_1} \times Fr_1^2} \quad (8)$$

با استفاده از روابط ۱ و ۳ رابطه بین اعداد فرود جریان در مقاطع قبل و بعد از پرش هیدرولیکی را بر حسب کمیت‌های بی‌بعد معرفی شده می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Fr_2^2 = \frac{\left( \frac{b}{y_1} + z \right)^3 \left( \frac{b}{y_1} + 2z \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \right)}{\left( \frac{b}{y_1} + 2z \right) \left( \frac{b}{y_1} + z \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \right)^3} \cdot \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^{-3} \cdot Fr_1^2 \quad (9)$$

با ترکیب روابط ۱، ۸ و ۹،  $\Delta E/E_1$  بر حسب کمیت‌های بی‌بعد  $Fr_1$ ،  $b/y_1$ ،  $y_2/y_1$  و  $z$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{\left( \frac{y_2}{y_1} \right) + 0.5 \times \frac{\left( \frac{b}{y_1} + z \right)^3 \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^{-2}}{\left( \frac{b}{y_1} + 2z \right) \left( \frac{b}{y_1} + z \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \right)^2} \times Fr_1^2}{1 + 0.5 \times \frac{\left( \frac{b}{y_1} + z \right)}{\left( \frac{b}{y_1} + 2z \right)} \times Fr_1^2} \quad (10)$$

جدول ۳- مقایسه مقادیر  $y_2/y_1$  محاسبه شده به وسیله رابطه پیشنهاد شده و مقادیر حاصل از حل عددی

۲/۲۵		۱/۷۵		۱/۲۵		Fr <sub>1</sub>			
درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	b/(zy <sub>1</sub> )
۱/۹	۲/۳۳۴۶	۲/۲۸۹۸	۰/۸	۱/۷۸۹۹	۱/۸۰۴۱	۲	۱/۲۵۴۱	۱/۲۷۹۶	۲
۱/۳	۲/۴۴۷۷	۲/۴۷۹۱	۱/۶	۱/۸۷۶۵	۱/۹۰۷۷	۰/۴۵	۱/۳۱۴۸	۱/۳۰۸۸	۵
۱/۸	۲/۵۰۷۷	۲/۵۵۴۲	۱/۲	۱/۹۲۲۶	۱/۹۴۶۰	۲/۲	۱/۳۴۷۱	۱/۳۱۸۷	۸

۴		۳/۵		۳		Fr <sub>1</sub>			
درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	b/(zy <sub>1</sub> )
۱/۱۵	۴/۵۸۰۱	۴/۶۳۳۳	۱/۳	۴/۰۱۳۰	۴/۰۶۶۶	۱/۱	۳/۴۴۶۲	۳/۴۸۵۲	۱۰
۱/۳	۴/۷۰۰۳	۴/۷۵۹۸	۱/۱	۴/۱۱۸۹	۴/۱۶۳۹	۰/۵	۳/۵۳۶۶	۳/۵۵۵۶	۱۴
۰/۹۶	۴/۷۹۲۲	۴/۸۳۸۷	۰/۶	۴/۱۹۹۴	۴/۲۲۳۹	۰/۲	۳/۶۰۵۷	۳/۶۰۵۷	۱۸

۹		۷		۵		Fr <sub>1</sub>			
درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۸	حل عددی	b/(zy <sub>1</sub> )
۰/۶۵	۱۰/۲۰۴	۱۰/۲۷۱	۱/۳	۸/۰۶۵۴	۸/۱۷۵۳	۱/۱	۵/۸۸۶۴	۵/۹۵۲۲	۱۵
۱/۵	۱۰/۷۰۵	۱۰/۸۷۱	۱/۳	۸/۴۶۱۷	۸/۵۷۳۳	۰/۱	۶/۱۷۵۷	۶/۱۶۹۹	۲۵
۱/۲۴	۱۱/۰۴۹	۱۱/۱۸۸	۰/۵	۸/۷۳۳۳	۸/۷۷۶۶	-۱/۶	۶/۳۷۳۹	۶/۲۷۶۵	۳۵

جدول ۴- مقایسه مقادیر  $\Delta E/E_1 \times 100$  محاسبه شده به وسیله رابطه پیشنهاد شده و مقادیر حاصل از حل عددی

۲/۲		۱/۸		Fr <sub>1</sub>		
درصد خطا	رابطه ۱۲	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۱۲	حل عددی	b/(zy <sub>1</sub> )
۳/۴۵	۱۳/۳۰	۱۳/۷۸	۱/۲۰	۶/۶۳	۶/۵۸	۴
۳/۱۲	۱۳/۱۵	۱۳/۵۸	۱/۴۰	۶/۵۸	۶/۴۹	۶

۴		۳		Fr <sub>1</sub>		
درصد خطا	رابطه ۱۲	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۱۲	حل عددی	b/(zy <sub>1</sub> )
۰/۰۶	۴۲/۶۹	۴۲/۷۲	۲/۲۰	۲۷/۴۰	۲۸/۰۲	۷
۰/۱۸	۴۱/۸۴	۴۱/۷۷	۱/۸۰	۲۶/۸۶	۲۷/۳۷	۱۲

۹		۵		Fr <sub>1</sub>		
درصد خطا	رابطه ۱۲	حل عددی	درصد خطا	رابطه ۱۲	حل عددی	b/(zy <sub>1</sub> )
۱/۹۰	۷۱/۸۲	۷۳/۲۱	۳/۳۵	۵۴/۷۲	۵۲/۹۶	۲۰
۱/۸۷	۷۰/۹۶	۷۲/۳۱	۳/۳۵	۵۴/۱۰	۵۲/۳۱	۳۵

در جدول ۴، مقادیر  $\Delta E/E_1$  حاصل از معادلات مستقیم پیشنهادی ۱۱، در کنار مقادیر دقیق حاصل از حل عددی همزمان روابط ۶ و ۱۰ برای ۱۲ وضعیت مختلف، به منظور مقایسه آورده شده است. در هر مورد درصد خطای استفاده از روابط پیشنهادی قید شده است. محاسبه خطا مشابه آنچه در بخش قبل توضیح داده شد، صورت گرفته است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

روابط صریح مستقیم با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی چند متغیره برای تعیین عمق ثانویه و افت انرژی پرش هیدرولیکی در کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای و دارای شیب کم پیشنهاد گردید. رابطه ۷ برای تعیین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی دارای حداکثر خطای  $\pm 7\%$  و متوسط قدرمطلق خطای  $1/5\%$  درصد است، که به

طور قابل ملاحظه‌ای کوچک است. رابطه ۱۱ برای تعیین نسبت افت انرژی به انرژی اولیه پرش هیدرولیکی دارای حداکثر خطای  $\pm 10\%$  درصد و متوسط قدر مطلق خطای  $1/5\%$  درصد است، که در مسائل طراحی مهندسی به اندازه کافی کوچک است. در مقایسه با روشهای دیگری که تاکنون مطرح شده‌اند، این معادلات علاوه بر آنکه شکل ساده‌ای دارند، دارای دقت خوبی هستند و می‌توان از آنها برای بررسی‌های تحلیلی حوضچه‌های آرامش و تحلیل پرش هیدرولیکی در کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای استفاده نمود. ضمن آنکه این امر بدون اعمال محدودیت در حجم جریان و افت انرژی میسر است. استفاده از معادلات مستقیم جهت طرح بهینه کانال‌های دوزنقه‌ای به علت صادق بودن این معادلات در محدوده وسیعی از داده‌ها، از مزایای معادلات پیشنهادی می‌باشد.

#### ۵- مراجع

- 1- Chaurasia, S. R. (2003). "Direct equations for hydraulic jump elements in rectangular horizontal channel." *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 129(4), 291-294.
- ۲- حسینی، س، ح، و ابریشمی، ج. (۱۳۷۸). *هیدرولیک کانالهای باز*. انتشارات آستان قدس، چاپ هفتم.
- 3- Chaudhry, M. H. (1993). *Open channel flow*, Prentice-Hall, Inc., New York.
- 4- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, Inc., New York.
- 5- U.S.B.R. (1964). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters*, USBR Pub.
- 6- Swamee, P. K., and Rathie, P. N. (2004). "Exact solutions for sequent depths problem." *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 130(6), 520-522.
- 7- Swamee, P. K., and Rathie, P. N. (2005). "Discussion of direct equations for hydraulic jump elements in rectangular horizontal channel by Chaurasia." *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 131 (3), 298-302.
- 8- Singh, S. K. (2005). "Discussion of direct equations for hydraulic jump elements in rectangular horizontal channel' by Chaurasia." *J. Irrigation and Drainage Eng.*, 131 (3), 305-310.