

برآورد نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B بر روی بستر صاف

منوچهر شکریان^۱ و محمود شفاعی بجزستان^۲

*۱- نویسنده مسئول: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
m.shokrian65@gmail.com

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۲

چکیده

پرش نوع B به پرشی اطلاق می‌شود که ابتدای آن در کانال بالادست با شیب مثبت و انتهای طول غلتابی در کانال پایین دست با کف افقی قرار گیرد. پیش‌بینی وقوع این نوع پرش و تعیین مشخصات آن از جمله تعیین نسبت اعماق مزدوج به طراحی مناسب دیواره‌های حوضچه آرامش پایین دست کمک خواهد کرد. به دلیل تأثیر مؤلفه وزن مایع و عدم محاسبه دقیق آن، امکان استفاده از معادله مومنتم به منظور استخراج رابطه ای برای نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B نمی‌باشد. در این مقاله با استفاده از تئوری باکینگهام و نظریه خود-تشابهی ناقص و به کار بردن متغیر k ، اختلاف تراز سطح بالادست و پائین دست پرش، که برای اولین بار استفاده شده است رابطه بدون بعدی شامل پارامترهای بدون بعد M و N به دست آمد. مزیت استفاده از متغیر k این است که رابطه به شیب تندآب وابسته نیست. نتایج نشان داد که این رابطه برای کلیه شیب‌های تندآب صادق بوده و عدم قطعیت آن در محدوده $\pm 15\%$ درصد می‌باشد.

کلید واژه‌ها: پرش نوع B، استهلاک انرژی، تندآب.

Determination of Sequent Depth Ratio of a B-Jump on the Smooth Bed

M.Shokrian¹ and M.Shafai Bejestan²

- 1- Former M.Sc. Student of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 2- Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received: 22 Dec. 2012

Accepted: 7 July 2013

Abstract

B-jump is defined as the jump having the toe section located on a positively sloping upstream channel and the roller end on a downstream horizontal channel. Predicting the occurrence of such jump and determination of the sequent depth can help the engineer to better design the stilling basin's wall. This is because the component of water weight within the jump can not be neglected and it is too difficult to calculate accurately. Therefore the sequent depth ratio relation can not be developed by using the momentum equation then experimental based formula should be used. In this paper first a literature review is conducted then by applying the Π -theorem and defining new variable of k , which is the upstream and downstream jump water surface elevation difference, a non dimensional relation was developed, which is not dependent on slope. To verify such relation an extensive experimental tests was conducted. By using the SPSS software an expression was developed which show the new formula can be applied for all range of chute slope. Comparison of previous relations with our relation show that the new relation can predict the sequent depth more accurate.

Key words: B- jump, Energy dissipation, Chute

مقدمه

یکی از سازه‌هایی که به منظور انتقال آب از کانال با تراز کف بالاتر به تراز پائین‌تر در شبکه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد فراوانی دارد سازه تندآب است. وقوع پرش هیدرولیکی به عنوان یکی از مؤثرترین روش استهلاک انرژی در پایین‌دست تندآبها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نسبت عمق‌های مزدوج و طول پرش از جمله مشخصات مهم پرش هستند که دانستن آنها برای طراحی حوضچه-های آرامش در پائین‌دست تندآبها ضروری است (۵). در طراحی این گونه حوضچه‌ها تلاش می‌شود که نقطه شروع پرش در محل اتصال تندآب و حوضچه آرامش و روی بستر کاملاً افقی قرار گیرد تا نیازی به افزایش ابعاد دیواره‌های جانبی حوضچه نباشد. تأمین شرایط فوق ممکن است همیشه مقدور نباشد و در حالتی که عمق پایاب بیشتر از عمق مزدوج باشد معمولاً پرش به بالادست منتقل خواهد شد بدین معنی که پرش هیدرولیکی مستغرق بوده و بخشی از آن روی تندآب و بخشی دیگر بر روی سطح افقی قرار می‌گیرد که پرش نوع B نامیده می‌شود (۱). درچنین شرایطی ضروری است تا دیواره‌های تندآب به اندازه کافی مرتفع باشند تا جریان آب به خارج از تندآب هدایت نشده و باعث آبستگي پشت دیواره‌ها و در نهایت باعث تخریب سازه نشود. ضمن اینکه دانستن تراز سطح آب در طول پرش به منظور تعیین بارهای وارده و طراحی سازه‌های دیواره‌ها نیاز است (۱). از طرفی تعیین نسبت عمق‌های مزدوج در پرش هیدرولیکی نوع B نیازمند این است که موقعیت شروع پرش بر روی تندآب مشخص شود. به عبارتی برای کانال با هندسه و دبی مشخص، اگر یکی از عمق‌های مزدوج معلوم باشد، تعیین عمق دیگر تنها زمانی امکان‌پذیر است که موقعیت پرش بر روی تندآب نیز مشخص شود. برای پرش نوع B، معادله مومنتم به تنهایی برای تعیین نسبت عمق‌های مزدوج کافی نیست. در حقیقت، در صورت به کار بردن معادله مومنتم در جهت موازی با سطح شیبدار، مؤلفه وزن توده‌ی آب درون پرش باید در نظر گرفته شود. همچنین اگر معادله مومنتم در جهت افقی نوشته شود، فشارهای وارد به کف بین محل تشکیل عمق اولیه پرش و محل تقاطع سطح شیبدار با کف افقی، باید در محاسبات منظور گردد. این فشارها معلوم نیستند و اندازه‌گیری آنها نیز دشوار است. از این رو نمی‌توان روش نظری برای حل پرش نوع B ارائه کرد (۵). در شکل (۱) N_1 : عمق فوق بحرانی که عمود بر کف اندازه گیری شده است. h_2 : عمق مزدوج زیر بحرانی در پایین‌دست کانال، h_1 : بار فشاری در محل اولیه پرش، l : فاصله از محل عمق اولیه پرش تا تقاطع سطح شیبدار و کف افقی، α : زاویه سطح شیبدار با کف افقی و k : اختلاف تراز سطح آب ابتدا و انتهای پرش می‌باشد.

مروری بر تحقیقات پیشین

محققین مختلفی تاکنون با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سعی کرده‌اند تا روابط تجربی یا نیمه تجربی به منظور محاسبه نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B ارائه کنند که از جمله می‌توان به کاواگوشی و هاگر^۱ (۸) اشاره کرد که رابطه (۱) را ارائه کردند.

$$Y = 3.75E^{-\tan\alpha} + \frac{\sqrt{2}(Fr_1 - 3)}{\tanh(3.5E \cos\alpha)} \quad (1)$$

$$E = \left(\frac{h_2 - z}{h_2} \right) \quad (2)$$

$$Fr_1 = Q / (LN_1 \sqrt{gh_1}) \quad (3)$$

در روابط فوق E : پارامتر بدون بعدی است که مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. بدین معنی که در صورت تشکیل پرش در پای تندآب مقدار آن یک و در شیب بحرانی هم مقدار پارامتر فوق نزدیک به عدد صفر می‌شود. h_1 : بار فشاری در محل تشکیل پرش و \tanh تانژانت هایپربولیک می‌باشد. آتسو و یاسودا^۲ (۹) نیز از دیگر محققینی بودند که برای دامنه وسیع‌تری از شیب ($0 < \alpha < 60$) درجه مطالعات خود را انجام دادند و رابطه‌ای معرفی کردند که در محدوده اعداد فرود ۱۲-۶ و $3 < \frac{h_2}{h_2^*} < 1/1$ قابل کاربرد است:

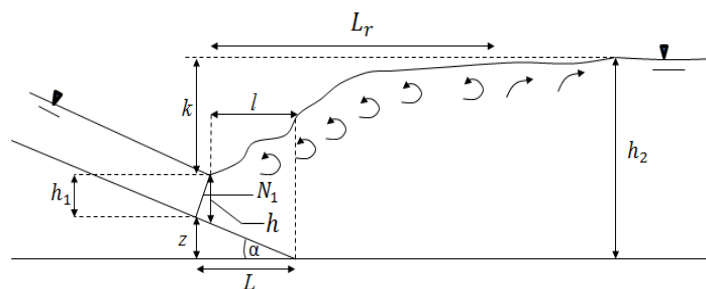
$$\frac{l}{h_2^*} = \left[\frac{2.3}{\tan \alpha^{0.78}} - 0.8 \right] \left(\frac{h_2}{h_2^*} - 1 \right)^{0.75} \quad (4)$$

هاگر^۳ (۷) نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بردلی و پیتراکا (۳) رابطه‌ی (۵) را معرفی کرد:

$$Y = \left[0.92 + \tan\alpha \left(\frac{l}{h_2^*} - 1 \right) \right] \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^{*2}}}{2\cos\alpha} \right] \quad (5)$$

که در آن Y : نسبت عمق‌های مزدوج $(\frac{h_2}{h_1})$ ، Fr_1^* و h_2^* از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

1- Kawagoshi & Hager
2- Otso & Yasuda.
3- Hager



شکل ۱- نمایش متغیرهای پرش نوع B

کارلو و همکاران (۵) نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B را در سه شیب ۸، ۱۷/۵ و ۳۰ درجه مورد مطالعه قرار دادند و با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه خود-تشابهی ناقص^۱ و اینکه رفتار تابع اعداد بدون بعد کاملاً تحت تأثیر عدد فرود قرار دارد رابطه (۱۲) را به دست آوردند:

$$Y = \sqrt{2} e^{-\left(\frac{\tan \alpha}{8.42}\right)^{-0.181}} E^{\frac{-0.181}{\tan \alpha^{0.663}}} (Fr_1 - 1)^{0.963} + \frac{1}{E} \quad (12)$$

در رابطه فوق e : معرف عدد نپر و Fr_1 معرف عدد فرود در بالادست می‌باشد. با توجه به وجود روابط متعدد و پیچیده برای پیش‌بینی عمق مزدوج در پرش هیدرولیکی نوع B این مقاله براین است تا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی میزان دقت هرکدام از روابط فوق را ارزیابی و همچنین رابطه‌ای جامع و ساده‌تر را به منظور محاسبه نسبت عمق‌های مزدوج ارائه کند.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

متغیرهای مؤثر در تعیین نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F(V, g, \rho, h_1, h_2, \mu, k, e, \alpha) = 0 \quad (13)$$

که در آن V : سرعت، g : شتاب ثقل، ρ : جرم حجمی آب، μ : لزجت دینامیکی آب، α : معرف شیب و $e = z + h_1$ می‌باشد. سایر متغیرها در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. با استفاده از تئوری II

$$Fr_1^* = Q / (LN_1 \sqrt{gN_1}) \quad (6)$$

$$h_2^* = \left[\frac{N_1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^*} \right) \right] \quad (7)$$

در روابط فوق Q : دبی و L : عرض کانال می‌باشد. هاگر (۷) با استفاده از معادله‌های (۴) و (۷) نشان داد که می‌توان نسبت عمق‌های مزدوج را از رابطه زیر بدست آورد:

$$Y = \left[\left(\frac{l}{\frac{h_2^*}{2.8} - 0.8} \right)^{1.33} + 1 \right] \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 8Fr_1^{*2}}}{2 \cos \alpha} \right] \quad (8)$$

آدام و همکاران (۱) مشخصات پرش نوع B را در شیب‌های ۱۴، ۱۱/۳ و ۱۸/۴ درجه مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که نتایج آزمایشگاهی او با معادله (۸) تطابق ندارد و برای اصلاح آن رابطه‌ای را بصورت زیر پیشنهاد داد:

$$Y = \frac{Y^*}{a_1 - b_1 \frac{L_1}{H_1}} \quad (9)$$

در رابطه (۹) Y^* : مقادیر به دست آمده از معادله (۸)، L_1 : طول پرش در راستای سطح شیبدار و H_1 : انرژی کل در محل تشکیل پرش است. ضرایب a_1 و b_1 از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$a_1 = 1.838 + \tan \alpha \quad (10)$$

$$b_1 = 0.207 + 1.7 \tan \alpha \quad (11)$$

¹Incomplete Self – Similarity (ISS)

تئوری خود-تشابهی ناقص

برای یک پدیده فیزیکی، بعد از مشخص شدن n گروه بی‌بعد Π خواهیم داشت:

$$\Pi_1 = \psi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (18)$$

که در این رابطه Π_1 : گروه بدون بعد اصلی می‌باشد که در واقع پارامتر مورد نظر اصلی در این گروه وجود دارد. ψ : نشان دهنده تابع است. یک پدیده فیزیکی برای یک گروه بی‌بعد مشخص و معین Π_n دارای شرایط خودتشابهی کامل است اگر Π_1 مستقل از Π_n گردد. زمانی که Π_n به سمت صفر یا بی‌نهایت میل می‌کند، اگر تابع ψ دارای مقداری مخالف با صفر و همچنین بی‌نهایت شود گوییم Π_n دارای شرط خود-تشابهی کامل است (۲ و ۴ و ۶). اما اگر تابع ψ به سمت صفر یا بی‌نهایت میل کند، گوییم Π_n دارای شرط خود-تشابهی ناقص است. در این حالت پدیده فیزیکی فوق را می‌توان توسط رابطه زیر بیان نمود:

$$\Pi_1 = \Pi_n^\epsilon \zeta(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-1}) \quad (19)$$

که ζ : نماد تابع و ϵ : ضریبی است که با توجه به آزمایش‌ها به دست می‌آید (۲ و ۴ و ۶). با در نظر گرفتن شیب بحرانی به عنوان شرایط مرزی و با فرض شرط خود-تشابهی ناقص رابطه (۱۴) نسبت به گروه بی‌بعد N می‌توان نوشت:

$$Y - M = m(M, \alpha) N^\epsilon \quad (20)$$

در شیب بحرانی رابطه $h_2 = z + h_1$ برقرار می‌شود. مقدار N نیز در چنین حالتی برابر صفر می‌باشد و بنابراین مقدار Y برابر M می‌شود و با در نظر گرفتن این نکته که k هم در شیب بحرانی صفر است مقدار Y برابر $\frac{h_2}{h_1}$ خواهد شد.

امکانات آزمایشگاهی و روش انجام تحقیق

به منظور انجام این تحقیق، آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر از جنس شیشه و پلاستیکی گلاس و در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب در دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید. دبی جریان قبل از ورود به مخزن

باکینگهام تحلیل ابعادی و انتخاب ρ ، V و h_1 به عنوان پارامترهای تکراری رابطه بدون بعد زیر حاصل می‌شود:

$$Y = f(\text{Re}, Fr, M, N, \alpha) \quad (14)$$

$$M = \frac{e}{h_1} = \frac{h_2 - k}{h_1} \quad (15)$$

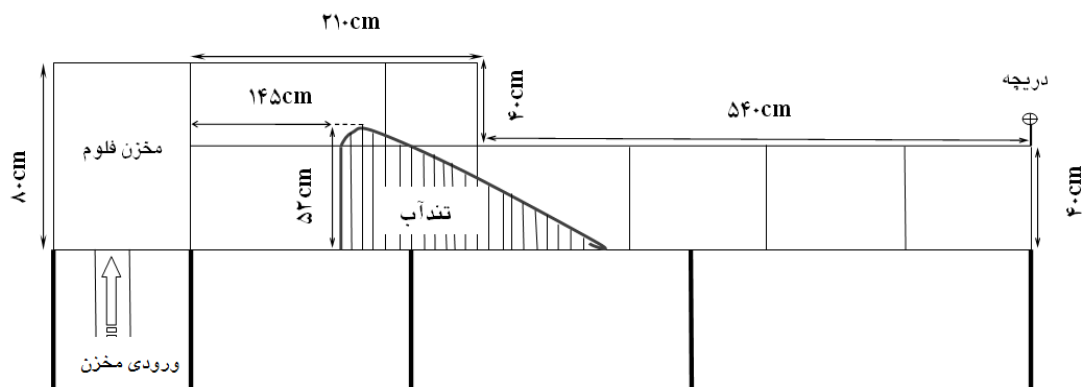
$$N = \frac{k}{h_2} = 1 - \frac{z + h_1}{h_2}; \quad (16)$$

$$0 < \frac{z + h_1}{h_2} \leq 1 \quad (17)$$

همان‌گونه که ذکر شد k برابر اختلاف سطح آب در انتهای پرش و بار فشاری در محل عمق اولیه پرش است. مقدار پارامتر k در کمترین حالت صفر و در بیشترین حالت برابر $(h_2 - h_1)$ می‌باشد. در شیب بحرانی مقدار آن برابر صفر است و سطح آب را می‌توان افقی در نظر گرفت. در یک شیب ثابت بیشترین مقدار برای k زمانی اتفاق می‌افتد که پرش نوع A تشکیل گردد. پرش نوع A به پرشی اطلاق می‌شود که درست در پای تندآب اتفاق بیفتد. پارامتر بدون بعد M معرف موقعیت پرش بر روی سطح شیبدار است. مقدار حداقل پارامتر بدون بعد M برابر واحد است که در پرش نوع A اتفاق می‌افتد. از عدد رینولدز نیز به دلیل برقراری شرایط جریان متلاطم در آزمایش‌ها صرف نظر می‌شود. کارلو و همکاران (۵) پارامتر بدون بعد $(Fr-1)$ را به عنوان متغیری که رفتار تابع اعداد بدون بعد فقط وابسته به آن است را انتخاب کردند و با اعمال شرایط مرزی و سپس تعیین ضرایب معادله (۱۲) را به دست آوردند. در این مطالعه از پارامتر N به جای $(Fr-1)$ استفاده شده است. دلیل این امر تشابه کامل رفتاری این دو پارامتر می‌باشد. بدین‌گونه که هر دو در شیب بحرانی برابر صفر و در پای تندآب به بیشترین مقدار خود می‌رسند. همچنین با افزایش Z هر دو کاهش می‌یابند. عبارت $\frac{z+h_1}{h_2}$ در $Z = 0$ دارای کمترین مقدار خود می‌باشد و بنابراین مقدار N به حداکثر خود می‌رسد. ضمن این که هر دو با افزایش دبی کاهش می‌یابند. در یک Z ثابت با افزایش دبی مقدار $\frac{h_1}{h_2}$ افزایش و بنابراین مقدار N کاهش می‌یابد.

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای این تحقیق

M	Fr	α	Y	Q	محدوده تغییرات
-	-	درجه	-	لیتر بر ثانیه	
۱/۰۶	۲/۱۲	۱۴/۵	۵/۴	۵	حداقل
۱۰/۶۲	۷/۸۶	۲۷/۵	۱۵/۱	۳۰	حداکثر



شکل ۲- مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه

همچنین نمای شماتیک امکانات آزمایشگاهی این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است.

نتایج و بحث

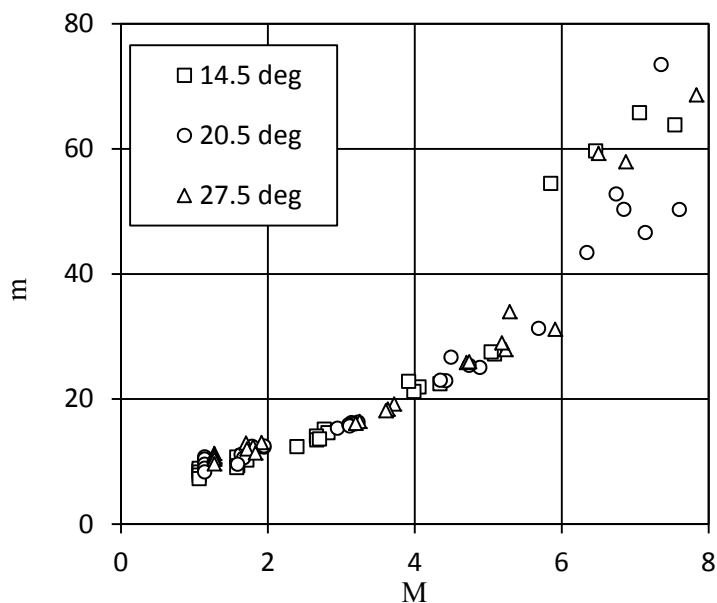
استخراج رابطه

ابتدا مقادیر $m(\alpha, M) = \frac{Y - M}{N^{\alpha}}$ به ازای مقادیر مختلف \mathcal{E} محاسبه و سپس مقادیر m در مقابل M در در شیب‌های

۱۴/۵، ۲۰/۵ و ۲۷/۵ رسم شد. ملاحظه شد که به ازای توان‌های مختلف، داده‌های مربوط به هر سه شیب کاملاً بر هم منطبق و حالت تابع نمایی می‌شوند (شکل ۳). سپس به کمک نرم افزار SPSS توانی انتخاب گردید که رابطه بین مقادیر m و M دارای ساده‌ترین شکل ممکن خود شود. مقدار \mathcal{E} در این حالت ۲/۳۷ تعیین شد.

با توجه به شکل (۳) رابطه‌ی بین m و M را باید نمایی با ضرایب ثابت و مستقل از شیب در نظر گرفت. با توجه به مطالب بیان شده شکل کلی معادله (۲۰) به صورت زیر خواهد شد:

آرام کننده توسط دبی سنج الکترومغناطیس با دقت یک هزارم لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شد. در ابتدای فلوم آزمایش برای تشکیل پرش، سرریزی از نوع اوجی (با ارتفاع ۵۴ سانتی متر) با توجه به استانداردهای USBR طراحی و نصب گردید. تندآبی نیز در پائین دست سرریز فوق با شیب‌های مختلف (۱۴/۵، ۲۰/۵ و ۲۷/۵ درجه) نصب شدند. برای تنظیم عمق پایاب به منظور تشکیل پرش از یک دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده شد. برای اندازه‌گیری سطح آب نیز از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده گردید. به منظور انجام آزمایش‌ها برای دبی‌های مختلف، در ابتدای آزمایش پرش به فاصله حدود ۱۰ الی ۲۰ سانتی متر پایین تر از تندآب تشکیل می‌شد و با بستن دریچه به آرامی پرش به روی تندآب منتقل می‌شد تا پرش‌های نوع B در موقعیت‌های مختلف (چهار موقعیت مختلف) تندآب قرار گیرد. پس از تثبیت موقعیت پرش، پروفیل سطح آب پرش و به خصوص عمق‌های مزدوج با دقت در چندین مرحله از آزمایش برداشت می‌گردید و متوسط اعداد اندازه‌گیری شده مبنای تحلیل داده‌ها قرار می‌گرفت. برای اندازه‌گیری عمق‌های اولیه و ثانویه از عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. در این تحقیق ۷۲ آزمایش انجام گرفت که جدول (۱) محدوده متغیرهای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایش رابطه بین m و M بر روی بستر صاف

کارلو وهمکاران(۵) خطای متوسط روابه (۲۳) حدود ۸/۹ درصد محاسبه شد.

$$Y - M = aM^b \times N^{2.37} \quad (22)$$

با استفاده از نرم افزار آماری SPSS مقدار ضرایب a و b به ترتیب ۷/۸۹۷ و ۰/۷۳ تعیین شدند. فرم کلی معادله فوق با اعمال ضرایب به دست آمده به صورت زیر خواهد شد:

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در رابطه (۲۳) بر خلاف روابط محققین دیگر پارامترهایی چون شیب تندآب و نیز عدد فرود وجود ندارد و می‌توان برای هر شیبی استفاده کرد ضمن اینکه نیازی نیست که دبی و سرعت جریان به منظور محاسبه عدد فرود در اختیار باشد.

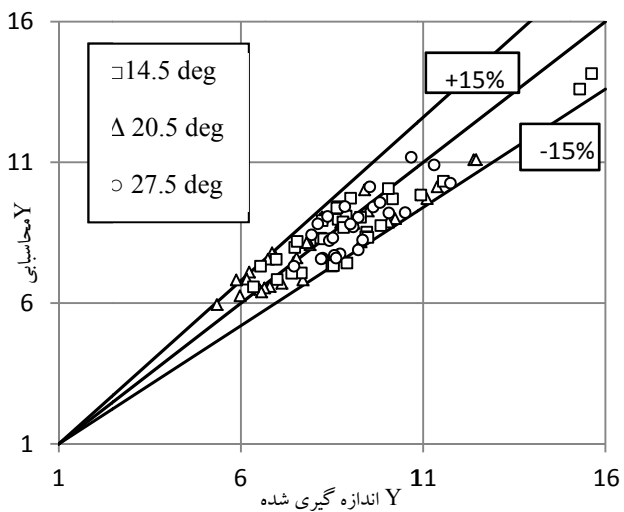
به منظور بررسی میزان دقت رابطه فوق شکل (۴) رسم شده است که حاکی از این است که داده‌ها در محدوده $\pm 15\%$ درصد می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود داده‌های مربوط به هر سه شیب به طور کامل در محدوده خطوط مثبت و منفی ۱۵ درصد قرار دارند و دقت معادله برای هر سه شیب یکسان است. دلیل اصلی این امر مستقل بودن ضرایب معادله از اثر شیب است. معادله (۱۷) به ترتیب در شیب های ۱۴/۵، ۲۰/۵ و ۲۷/۵ درجه متوسط خطایی حدود ۶/۵۱، ۶/۱ و ۶/۸۱ درصد و برای تمامی شیب‌ها متوسط خطای ۶/۸ درصد را دارا می‌باشد. در شکل (۶) نتایج حاصل از داده‌های محاسباتی از رابطه (۲۳) در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش‌های کارلو و فرو (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی کارلو و همکاران (۵) نیز دقت معادله (۲۳) در محدوده خطوط $\pm 15\%$ درصد قرار دارند. برای داده‌های آزمایشگاهی

بررسی دقت روابط سایر محققین

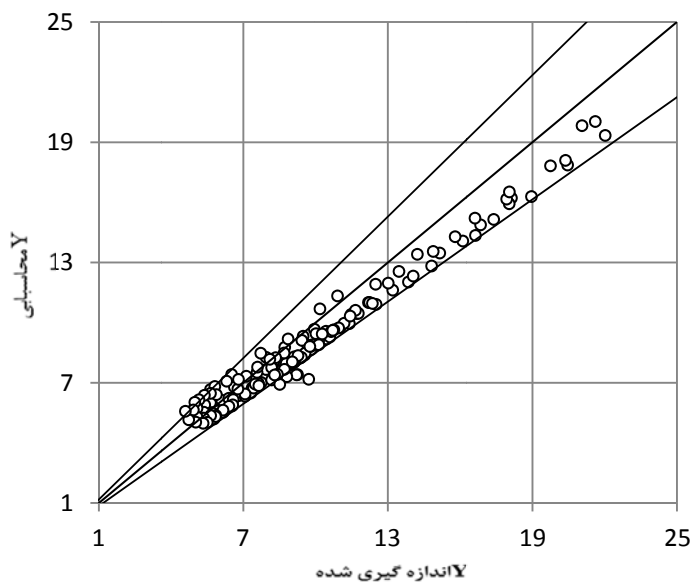
به منظور مقایسه ابتدا عمق‌های اولیه و ثانویه (نسبت عمق‌های مزدوج) از روابط سایر محققین، روابط (۱)، (۴)، (۸) و (۹) که در مقدمه ارائه شدند محاسبه گردید. نتایج ترسیمی در شکل های (۶) الی (۸) نشان داده شده است. بر روی این شکل‌ها همچنین خط ۴۵ درجه و نیز خطوط با خطای $\pm 15\%$ درصد نیز ترسیم شده‌اند. سپس میانگین قدرمطلق خطاهای مقادیر محاسبه شده و مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق مقایسه شدند. میزان انحراف مقادیر محاسبه شده از هر روش با داده‌های آزمایش نیز از رابطه $R = \frac{Y_m - Y_c}{Y_m} \times 100$ ، که در این رابطه Y_m نسبت عمق‌های به

دست آمده از آزمایش و Y_c مقادیر محاسباتی می‌باشد، به دست آمد و سپس میانگین قدر مطلق این خطاها به عنوان متوسط خطا در نظر گرفته شد. نتایج این مقایسه در جدول (۲) ارائه شده است. شکل (۶) نتایج مربوط به رابطه (۱) را نشان می‌دهد.

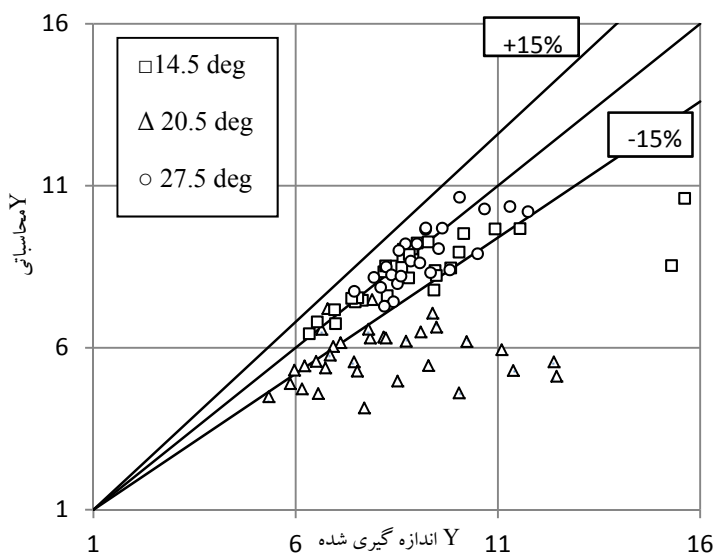
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود داده‌های مربوط به شیب ۲۰/۵ و ۲۷/۵ درجه عموماً در محدوده خطوط مثبت و منفی ۱۵ درصد قرار گرفته‌اند که نشان دهنده دقت خوب این رابطه در این شیب‌ها است. از طرفی ملاحظه می‌شود که بیشتر داده‌های مربوط به شیب ۱۴/۵ درجه خارج از محدوده خطوط ۱۵ درصد قرار گرفته‌اند که حاکی



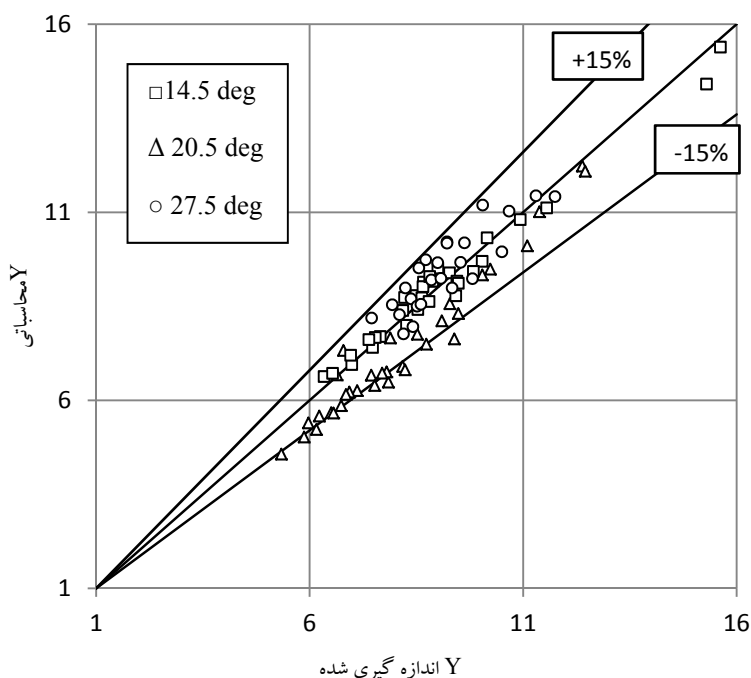
شکل ۴- رسم نسبت عمق‌های محاسباتی از رابطه (۲۳) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۵- نسبت عمق‌های محاسبه شده از معادله (۲۳) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی کارلو و همکاران (۵)



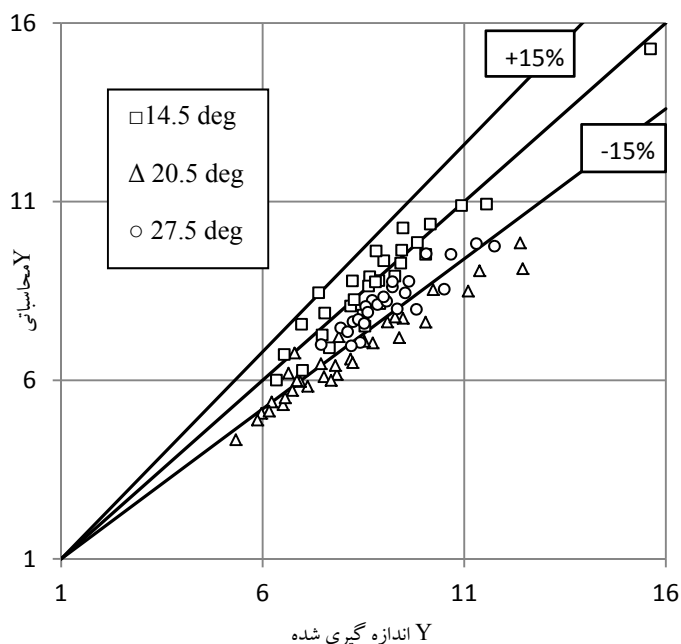
شکل ۶- نسبت عمق‌های محاسبه شده از معادله (۱) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۷- نسبت عمق‌های محاسبه شده از معادله (۴) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی

برای استخراج معادله در این روش دامنه وسیعی از شیب (۰ - ۶۰) درجه مورد استفاده قرار گرفته است که موجب شده است روش فوق در تمامی شیب‌ها از دقت تقریباً یکسانی برخوردار باشد. علاوه بر این استفاده از معادله ممتنم هم می‌تواند از دلایل دقت خوب این روش باشد. نتایج روش معادله (۱۲) نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

از عدم دقت رابطه برای شیب‌های کم می‌باشد. دلیل عمده آن هم این می‌باشد که رابطه (۱) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و برای شیب‌های ۳۰ تا ۴۵ درجه استخراج شده است. شکل (۷) نتایج معادله (۴) را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تمامی نقاط در محدوده خطوط مثبت و منفی ۱۵ درصد قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که ذکر شد



شکل ۸- نسبت عمق‌های محاسبه شده از معادله (۱۲) در مقابل داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۱- درصد متوسط خطای روابط بررسی شده در شیب‌های مختلف

شیب (درجه)	معادله ۱	معادله ۴	معادله ۸	معادله ۹	معادله ۱۲
۱۴/۵	۱۸/۱۴	۱۶/۱	۴/۶۸	۴۴/۵	۷/۹۷
۲۰/۵	۲۰/۵۶	۶/۶۱	۴/۶۷	۴۵/۸	۵/۵۳
۲۷/۵	۳۳/۳۴	۳/۳۱	۷/۲۱	۴۷/۷	۳/۷۸

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا با استفاده از تحلیل ابعادی و نظریه خود-تشابهی ناقص و منظور نمودن پارامتر جدیدی به جای عدد فرود، رابطه‌ای کلی برای برآورد نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B در پائین دست تندآب استخراج گردید. ملاحظه شد که رابطه به دست آمده بر خلاف تمامی روابط موجود، مستقل از شیب و عدد فرود و فقط وابسته به ابعاد هندسی پرش می‌باشد. با انجام آزمایش‌های متعدد تحت سه شیب مختلف، رابطه‌ای برای پیش‌بینی نسبت اعماق مزدوج با دقت بالایی به دست آمد. رابطه به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی کارلو و همکاران (۵) مقایسه شد و نشان داده شد که رابطه حاضر از دقت بالایی برخوردار است. همچنین در این تحقیق پنج رابطه که تاکنون توسط سایر محققین ارائه شده است، مورد صحت سنجی قرار گرفت و نشان داده شد که این روابط حساسیت زیادی نسبت به اثر شیب دارند. دو معادله (۱) و (۹) با داده‌های

با توجه به جدول (۱) ملاحظه می‌شود که متوسط خطای رابطه (۱) با افزایش شیب افزایش می‌یابد. دلیل افزایش خطا در این معادله محدوده شیب‌های انتخاب شده توسط بردلی و پیترکا (۳) است که بین ۲/۹ الی ۱۶/۷ درجه می‌باشد و به همین دلیل با زیاد شدن شیب و با فاصله گرفتن از شیب ۱۶/۷ درجه خطا افزایش می‌یابد. متوسط خطای معادله (۴) با افزایش شیب کاهش می‌یابد. همانطور که ذکر گردید آزمایش‌هایی که برای تعیین این معادله صورت گرفته‌اند بین ۳۰ الی ۴۵ درجه می‌باشد. بنابراین با افزایش شیب بدیهی است که خطای آن کاهش یابد. معادله (۹) بیشترین خطا را نسبت به سایر روابط دارد که دلیل آن ضرابی است که برای آن تعیین شده است. این ضرایب برای شرایط آزمایشگاهی آدام و همکاران (۱) تعیین شده‌اند و برای سایر شرایط سازگار نیستند.

آزمایشگاهی این تحقیق مطابقت نداشتند. معادله (۹) در بین تمامی روابط موجود بیشترین میزان خطا را دارا بود. معادله (۸) بیشترین مطابقت را با داده‌های آزمایشگاهی به دلیل یکسان بودن شیب‌های مورد استفاده در دو تحقیق نشان داد ولی در این رابطه نیز نظیر سایر روابط محققین شیب تندآب حضور دارد.

منابع

- 1- Adam, A. M., Ruff, J. F., AlQaser, G and S. R, Abt. 1993. Characteristics of B-jump with different toe locations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(8): 938–948.
- 2- Barenblatt, G. I. 1979. *Similarity, Self-Similarity and Intermediate Asymptotics*, consultants bureau, New York. 218p.
- 3- Bradley, J. N and A. J, Peterka. 1957. Hydraulic design of stilling basins: Stilling basin with sloping apron (Basin V). *Journal of Hydraulic, Division*, 83(5): 1–32.
- 4- Carollo, F. G., Ferro, V and V, Pampalone. 2009. New solution of classical hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(6): 527–531.
- 5- Carllo, F. G., Ferro, V and V, Pampalone. 2011. Sequent depth ratio of a B-jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(6): 651–658.
- 6- Ferro, V., 2006. *The Arrangement of The River Basins*, 2nd Ed, McGraw-Hill, Milano. Italy in talian.
- 7- Hager, W. H., 1988. B-jump in sloping channel. *Journal of Hydraulic Research*, 26(5): 539–558.
- 8- Kawagoshi, N and W. H, Hager., 1990. B-jump in sloping channel, II. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4): 461–480.
- 9- Ohtsu, I and Y, Yasuda., 1991. Hydraulic jump in sloping channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(7): 905–921.