

«یادداشت تحقیقاتی»

نیمرخ طولی بی بعد سطح آب در جهش هیدرولیکی آزاد

امیر گرد نوشهری¹، ابراهیم امیری تکلدانی^{2*}

1- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران

* amiri@ut.ac.ir

چکیده- جهش هیدرولیکی یکی از سازوکارهای مهم در استهلاک انرژی اضافی جریان به شمار رفته و در فرایند تشکیل آن جریان فوق بحرانی به جریان زیربحرانی تبدیل می‌شود. به دلیل نقش عوامل هیدرولیکی این پدیده در تعیین ویژگی‌های سازه‌ای حوضچه‌های آرامش نظیر طول و ارتفاع دیوارهای جانبی آن‌ها، تخمین نیمرخ طولی سطح آب در جهش هیدرولیکی از مسائل مورد علاقه مهندسان هیدرولیک بوده، به طوری که تاکنون روابط متعددی برای محاسبه آن توسط محققان مختلف ارائه شده است. با این وجود پارامترهای مورد استفاده در روابط موجود، به لحاظ عملی قابل تعیین نبوده در نتیجه روابط ارائه شده نیز به لحاظ عملی غیرقابل استفاده بوده و در صورت استفاده دارای خطای قابل ملاحظه می‌باشند. در این تحقیق، ضمن معرفی طول پرش هیدرولیکی به صورت یک پارامتر بدون بعد و با استفاده از تعداد زیادی از داده‌های آزمایشگاهی که توسط محققان مختلف بدست آمده و منتشر شده‌اند، یک معادله ساده و کاربردی برای تخمین نیمرخ طولی جهش هیدرولیکی با متوسط خطای $5/08$ درصد نسبت به مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده، ارائه شد. هم چنین مقایسه معادله جدید با روابط موجود نشان دهنده تخمین درست‌تر نتایج در بازه وسیعی از اعداد فرود (از $2/0$ تا $11/3$) می‌باشد.

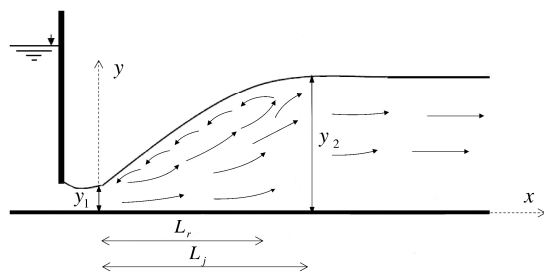
کلیدواژگان: حوضچه آرامش، نیمرخ طولی جهش هیدرولیکی، استهلاک انرژی، جریان فوق بحرانی.

1- مقدمه

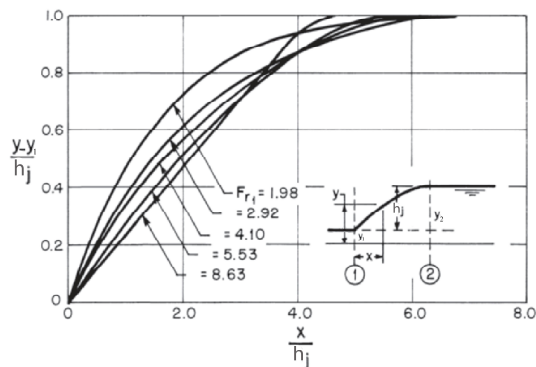
این روش با توصیف رینولدز از جریان متلاطم تطابق دارد که بر اساس آن می‌توان هر کمیت را با مقدار متوسط‌گیری شده زمانی و مقدار لحظه‌ای آن بیان کرد (Hager, 1992).

اگرچه بر اساس مباحث نظری، در صورت وجود شرایط لازم، تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی در طی فرایند جهش هیدرولیکی به صورت آنی می‌باشد، اما به دلیل وقوع جریان به شدت متلاطم و ورود هوا به داخل جریان و نیز ایجاد گردابه‌های بزرگ، همان‌گونه که مشاهدات آزمایشگاهی و صحرایی نیز نشان می‌دهند، در عمل تغییر حالت جریان در یک مقطع مشخص و به طور

پدیده جهش هیدرولیکی یکی از انواع سازوکارها به منظور استهلاک انرژی اضافی جریان است که در آن جریان فوق بحرانی در صورت وجود عمق پایاب برابر یا اندکی بیش از عمق مزدوج پس از جهش، به گونه‌ای سریع به جریان زیربحرانی تبدیل شده و در این فرایند بخش عمده‌ای از انرژی جریان مستهلک می‌شود. جهش هیدرولیکی پدیده‌ای به شدت متلاطم و آشفته است که شامل نوسانات جریان، ورود هوا، ایجاد گردابه‌های بزرگ و رفتار دینامیک بوده، لیکن در صورت ساده‌سازی می‌توان آن را بر حسب کمیت‌های متوسط‌گیری شده زمانی تبیین کرد.



شکل 1 نمای توصیفی جهش هیدرولیکی



شکل 2 نیمرخ‌های بی بعد ارائه شده توسط Bakhmeteff and Matzke (1936)

Rajaratnam (1962) در مطالعه خود و با استفاده از نیمرخ‌های فشار در جهش برای مقادیر Fr_1 از $3/5$ تا $11/3$ در یک آبراهه به عرض $0/3$ متر، نتیجه گرفت که نیمرخ فشار مشابه نیمرخ متوسط سطح آب است. وی برای $Fr_1 \geq 5.0$ رابطه (1) را ارائه نمود:

$$\frac{y}{y_2} = A_1 \left(\frac{x}{y_2} \right) + A_2 \left(\frac{x}{y_2} \right)^2 \quad (1)$$

در رابطه (1)، A_1 و A_2 ضرایب وابسته به Fr_1 هستند و سایر پارامترها در شکل 2 نشان داده شده‌اند. شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد اولین بار توسط Schroder در سال 1963 (به نقل از Hager (1992)) برای داده‌های آزمایشگاهی در محدوده $3.85 < Fr_1 < 6.9$ مورد توجه قرار گرفت. در این تحقیق مختصات طولی و قائم به صورت رابطه (2) بی بعد شدند:

$$X_r = \frac{x}{L_r}, Y = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (2)$$

که L_r طول غلتنده جهش هیدرولیکی است. هم چنین Gupta (1967) معادله تجربی (3) را برای نیمرخ جهش

عمودی صورت نگرفته، بلکه مطابق شکل 1 نیمرخ طولی سطح آب تشکیل می‌شود که از محل عمق مزدوج قبل از جهش هیدرولیکی شروع شده و تا محل عمق مزدوج بعد از جهش امتداد می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت که نیمرخ طولی سطح آب جهش هیدرولیکی، به نوعی منحنی تغییرات سطح آب نسبت به طول جهش می‌باشد.

بر اساس نتایج مطالعات انجام شده، با وجود توزیع غیر هیدرواستاتیک فشار در توده جهش، نیمرخ فشار روی بستر، به جز در بخش کوچکی در مجاورت پنجه جهش، مشابه نیمرخ متوسط سطح آب است و در ابتدای جهش اندکی بیشتر از آن می‌باشد. اطلاعات مربوط به نیمرخ سطح آب جهش هیدرولیکی، در طراحی دیواره‌های جانبی و ضخامت کف حوضچه آرامش به منظور کنترل نیروی بالا برنده در حوضچه‌هایی که بر روی بستر آبرفتی احداث می‌شوند (Rajaratnam and Subramanya, 1968) و نیز برای تعیین نیروی جانبی در حوضچه‌های آرامش واگرا، مورد نیاز می‌باشد.

Hager (1992) در مطالعات خود نتیجه گرفت که سطح آزاد جهش به خوبی منعکس کننده جریان بسیار متلاطم جهش هیدرولیکی می‌باشد و عکس‌برداری از جهش تنها منجر به عکسی از پدیده می‌شود که خصوصیت اصلی آن تلاطم شدید است. Hager (1992) هم چنین گزارش نمود که اگرچه نوسانات سطح جهش قابل ملاحظه هستند و ممکن است از مرتبه $0.2(y_2 - y_1)$ باشند، اما نیمرخ متوسط‌گیری شده زمانی برای مقاصد عملی کافی می‌باشد. اولین داده‌های مربوط به نیمرخ سطح جهش در سال 1936 توسط Bakhmeteff and Matzke جمع آوری شدند. در این تحقیق نیمرخ‌های بی بعد جهش در محدوده $2 < Fr_1 < 8.6$ برای مقادیر y/h_j بر حسب x/h_j ترسیم شدند که در آنها y عمق جریان در فاصله x از پنجه جهش، $h_j = y_2 - y_1$ ارتفاع جهش و y_1 و y_2 به ترتیب عمق‌های اولیه و ثانویه جهش هستند (شکل 2). جهش‌های هیدرولیکی با مقادیر اندک Fr_1 (عدد فرود در پنجه جهش)، در ابتدا دارای شیب زیادی هستند، ولی زمانی که به $y/h_j = 1$ می‌رسند، انحنا بیشتری می‌گیرند و مشابه جهش‌های با Fr_1 زیاد می‌شوند.

ارائه کرد:

$$\left(1 - \frac{y}{h_j}\right) = \frac{h_j}{L_j} \left(\frac{L_j}{h_j} - \frac{x}{h_j}\right)^2 \quad (3)$$

که در آن L_j طول جهش هیدرولیکی است (Rajaratnam and Subramanya, 1968). داده‌های (Rajaratnam (1962) مجدداً توسط Rajaratnam and Subramanya (1968) همراه داده‌های Rouse et al. (1959) و Sananes and Fortey (1966) مورد استفاده قرار گرفته و نتایج در شکل 3 ارائه شده است. نیمرخ جدید به صورت منحنی تغییرات $\eta(X_s)$ در برابر مقادیر $X_s = x/L_s$ رسم شد. در شکل 3، $\eta = (4/3)(y - y_1)/(y_2 - y_1) = (4/3)Y$ است و مقدار L_s نیز از رابطه (4) به دست می‌آید (Hager, 1993):

$$\frac{L_s}{y_1} = 5.08 Fr_1 - 7.82 \quad (4)$$

(Rajaratnam and Subramanya (1968) در نهایت مختصات منحنی توسعه یافته برای نیمرخ بی‌بعد جهش را به صورت جدول 1 ارائه کردند.

(Hager (1993) داده‌های آزمایشگاهی خود را با فرض $Y = f(X_r)$ مورد تجزیه و تحلیل قرار داده (شکل 4) و در نهایت رابطه (5) را برای نیمرخ جهش پیشنهاد نمود.

$$Y = \tanh(1.5 X_r) \quad (5)$$

که مقدار کمیت طولی L_r را می‌توان از طریق روابط (6) به دست آورد.

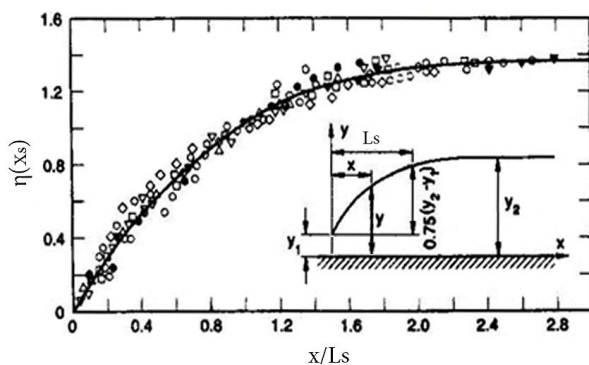
$$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 160 \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right), \quad \frac{y_1}{b} < 0.1 \quad (6)$$

$$\frac{L_r}{y_1} = -12 + 100 \tanh\left(\frac{Fr_1}{12.5}\right), \quad 0.1 < \frac{y_1}{b} < 0.7$$

در روابط (6)، b عرض مقطع آبراهه است. (Hager (1993) گزارش نمود که نتایج حاصل از معادله (5) با نتایج حاصل از معادله‌های ارائه شده توسط سایر محققان دارای تطابق خوبی بوده و برای محدوده $2 < Fr_1 < 10$ ، متوسط اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهده شده در آزمایشگاه در حدود $\pm 5\%$ درصد می‌باشد.

با توجه به مطالب بالا مشاهده می‌شود با وجود ارائه روابط متعدد برای محاسبه نیمرخ طولی سطح آب جهش هیدرولیکی، تاکنون معادله‌ای که به لحاظ کاربردی ساده، لیکن از درستی قابل قبولی هم برخوردار باشد، ارائه نشده

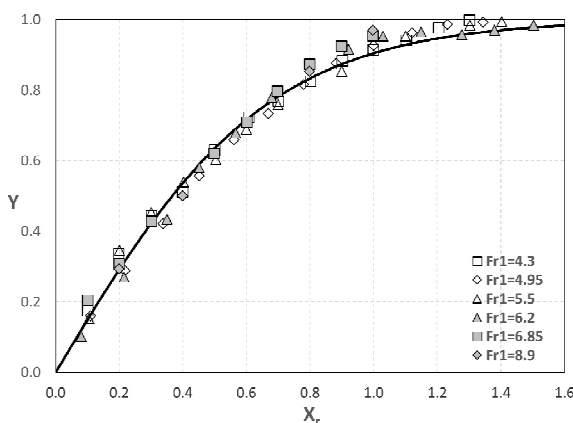
است.



شکل 3 نیمرخ بی‌بعد ارائه شده توسط Rajaratnam and Subramanya (1968)

جدول 1 مختصات نیمرخ بی‌بعد جهش هیدرولیکی در روش

Rajaratnam and Subramanya (1968)			
X_s	η	X_s	η
0	0	1/20	1/105
0/05	0/185	1/30	1/140
0/10	0/245	1/40	1/180
0/15	0/280	1/50	1/215
0/20	0/320	1/60	1/240
0/30	0/405	1/80	1/285
0/40	0/485	2/00	1/315
0/50	0/570	2/20	1/320
0/60	0/655	2/40	1/325
0/70	0/736	2/50	1/333
0/80	0/820	2/60	1/333
0/90	0/920	2/80	1/333
1/00	1/000	3/00	1/333
1/10	1/060		



شکل 4 نیمرخ بی‌بعد ارائه شده توسط Hager (1993)

توسط Bakhmeteff and Matzke (1936) انجام گرفته است. در این تحقیق برای اندازه‌گیری و ترسیم نیمرخ سطح آب در 11 جهش هیدرولیکی مورد آزمایش، از ترکیب عمق سنج نقطه‌ای و اشل استفاده شده است. فلوم مورد استفاده در این آزمایش‌ها به عرض 15/24 سانتی‌متر و طول 6/1 متر و از جنس فلز ساخته شده است.

Rajaratnam (1962) آزمایش‌های خود را در یک فلوم مستطیلی صاف به عرض 30/48 سانتی‌متر انجام داد. وی برای تشکیل جهش از یک دریچه کشویی استفاده کرد و نیمرخ فشار کف را که از طریق قرائت پیزومترهای نصب شده در کف فلوم به دست آمدند، معرف نیمرخ سطح آب جهش هیدرولیکی در نظر گرفت. Schroder (1963) نیز نیمرخ سطح آب 6 جهش را در یک فلوم مستطیلی به عرض 59/8 سانتی‌متر به وسیله عمق سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری کرد. Hager (1993) آزمایش‌های خود را در یک فلوم مستطیلی صاف به عرض 50 سانتی‌متر و ارتفاع 70 سانتی‌متر انجام داد. در این آزمایش‌ها به جز دو آزمایش مربوط به اعداد فرود اولیه معادل 4/95 و 6/2 که در پایین‌دست یک سرریز شیبدار 30 درجه انجام گرفتند، سایر جهش‌ها در پایین‌دست یک دریچه کشویی تشکیل شدند و نیمرخ سطح آب توسط یک عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت $\pm 0/2$ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.

Liu (2004) سه آزمایش در یک فلوم مستطیلی افقی به عرض 46 سانتی‌متر، عمق 60 سانتی‌متر و طول 7/6 متر انجام داد. در این آزمایش‌ها برای تشکیل جهش هیدرولیکی از یک دریچه کشویی استفاده شد و نیمرخ سطح آب جهش نیز توسط یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت $\pm 0/5$ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.

معادله‌های ارائه شده توسط Rajaratnam and Subramanya (1968) و Hager (1993) اگرچه در این خصوص از مقبولیت بیشتری برخوردارند، اما از آنجا که در روش Rajaratnam and Subramanya (1968) از مقیاس طولی L_s برای بی بعد سازی استفاده شده، این امر استفاده کاربردی از آن را بسیار مشکل می‌کند، زیرا در کاربردهای طراحی، عملاً پارامترهای طول جهش و عمق ثانویه جهش بیشتر مورد نظر بوده و این پارامترها برای تعیین ابعاد حوضچه آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش Hager (1993) نیز برای بی‌بعد سازی طولی از طول غلتنده استفاده می‌شود که در طراحی حوضچه آرامش کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و به علاوه شکل معادله به گونه‌ای است که به لحاظ ریاضی در بی‌نهایت به عمق ثانویه جهش مجانب می‌شود. در نتیجه این روش در تعیین انتهای جهش با خطای قابل ملاحظه مواجه شده و به همین دلیل به طور تقریبی انتهای جهش را در نقطه $X_r \approx 1.4$ فرض می‌کند. در تحقیق حاضر ارائه یک رابطه ساده برای تخمین نیمرخ بی‌بعد سطح آب جهش هیدرولیکی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و داده‌های برداشت شده حاصل از تحقیقات انجام شده برای استفاده در طراحی حوضچه آرامش مورد نظر است.

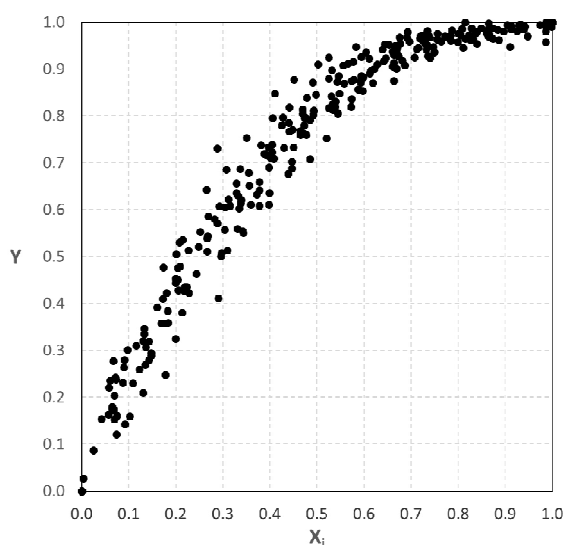
2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از نتایج مربوط به نیمرخ‌های فشار بستر و سطح آب برگرفته از مطالعات محققان مختلف استفاده شده است. در جدول 2 خلاصه‌ای از خصوصیات این آزمایش‌ها و روش اندازه‌گیری نیمرخ جهش هیدرولیکی ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ملاحظه می‌شود اولین تحقیق در مورد نیمرخ سطح آب جهش هیدرولیکی

جدول 2 خصوصیات آزمایش‌های مختلف انجام گرفته توسط محققان

محقق	b (cm)	y_1 (cm)	Fr_1	روش اندازه‌گیری نیمرخ جهش
Bakhmeteff and Matzke (1936)	15/24	1/0 - 7/75	1/99 - 8/7	عمق سنج نقطه‌ای و اشل ثابت
Rajaratnam (1962)	30/48	-	3/5 - 11/3	پیزومترهای نصب شده در کف
Schroder (1963)	59/8	3/4 - 10/2	1/83 - 9/93	عمق سنج نقطه‌ای
Hager (1993)	50	2/07 - 6/38	4/3 - 8/9	عمق سنج نقطه‌ای
Liu (2004)	46	4/1 - 7/1	2/0 - 3/32	عمق سنج نقطه‌ای
Murzyn and Chanson (2009)	50	1/7 - 2/0	3/1 - 8/5	عمق سنج التراسونیک
Chachereau and Chanson (2011)	50	3/78 - 4/54	2/4 - 5/1	عمق سنج التراسونیک

0/977 است.



شکل 5 پراکنش داده‌های استخراج شده به صورت بی‌بعد

از طرف دیگر با توجه به اینکه در انتهای جهش هیدرولیکی ($x=L_j$)، دو شرط مرزی به صورت $y=y_2$ و $dy/dx \approx 0$ وجود دارد، می‌توان ضرایب A و B را به صورت ریاضی محاسبه کرد. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$Y = X_j \exp(1 - X_j) \quad (8)$$

به طوری که ملاحظه می‌شود ضرایب به دست آمده از طریق آنالیز رگرسیون بسیار نزدیک به ضرایب حاصل از روش ریاضی می‌باشد. در نتیجه در ادامه از رابطه اخیر به عنوان معادله بدون بعد معرف نیمرخ طولی سطح آب در جهش هیدرولیکی آزاد استفاده شد.

3-2- مقایسه نتایج حاصل از معادله جدید با نتایج

حاصل از معادلات موجود

به منظور تعیین درستی رابطه (8) و مقایسه آن با نتایج برخی از روابط موجود، از یک سوم باقی مانده از داده‌های استخراج شده (101 داده) که در بخش مربوط به تحلیل رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفته بودند، استفاده شد. همان‌گونه که در شکل 6 نشان داده شده است نتایج حاصل از رابطه جدید در برخی از محدوده‌ها با نتایج محققان دیگر تطابق خوبی دارد (مثلاً نتایج Bakhmeteff and Matzke (1936) and برای مقادیر X_j کمتر از 0/5).

Chachereau and Murzyn and Chanson (2009) و Chanson (2011) از یک فلوم مستطیلی به طول 3/2 متر، عرض 50 سانتی‌متر و عمق 45 سانتی‌متر برای آزمایش‌های خود استفاده کردند. جهش هیدرولیکی در این دو تحقیق در پایین دست یک دریچه کشویی تشکیل شده و برای اندازه‌گیری نیمرخ سطح آب از 6 عمق سنج التراسونیک استفاده شد که همگی دارای دقت 0/18 میلی‌متر بودند.

در تحقیق حاضر داده‌های نیمرخ جهش هیدرولیکی هر یک از تحقیقات فوق استخراج شد و در ادامه استفاده شد.

3- نتایج و بحث

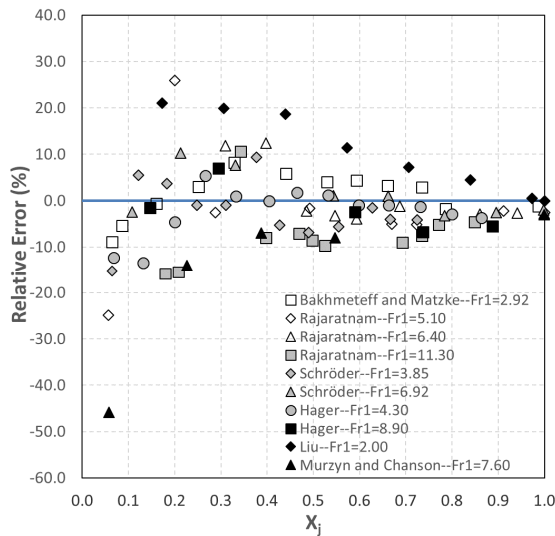
3-1- تحلیل داده‌ها

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در این تحقیق به منظور ارائه یک رابطه ساده کاربردی برای نیمرخ طولی سطح آب در جهش هیدرولیکی آزاد، از نتایج مربوط به نیمرخ‌های فشار بستر و سطح آب برگرفته از مطالعات محققان مختلف شامل Rajaratnam, Bakhmeteff and Matzke (1936), Liu (2004), Hager (1993), Schroder (1963), Chachereau and Murzyn and Chanson (2009) و Chanson (2011) استفاده شده است. در مجموع 314 داده مربوط به نیمرخ سطح آب جهش که در آن‌ها دامنه عدد فرود از 2/0 تا 11/3 گسترده شده بود استخراج شده و در مرحله اول با استفاده از کلیه داده‌ها، مقادیر بی‌بعد شده عمق آب ($Y = y - y_1 / y_2 - y_1$) در برابر مقادیر بی‌بعد شده فاصله طولی از ابتدای جهش ($X_j = x / L_j$) رسم شدند (شکل 5).

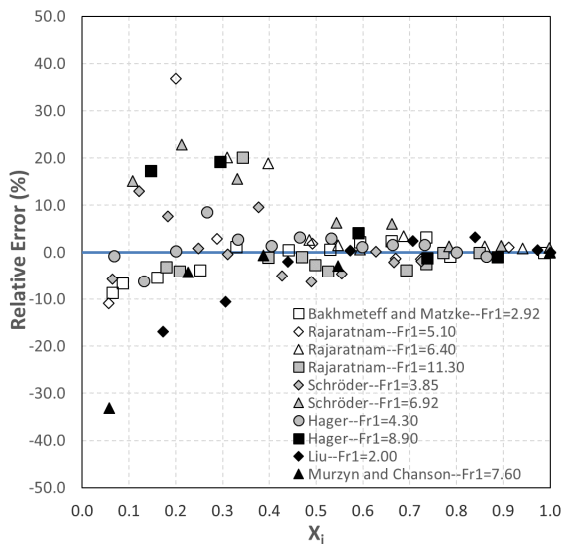
بی‌بعدسازی داده‌ها در مقیاس طولی بر اساس طول جهش L_j و در مقیاس عمودی بر اساس ارتفاع جهش $y_2 - y_1$ صورت گرفت. با استفاده از حدود دو سوم از داده‌های برداشت شده (213 داده) و با برازش معادلات مختلف بر روی این تعداد از داده‌ها توسط نرم‌افزار Lab Fit، بهترین شکل معادله به صورت رابطه (7) به دست آمد.

$$Y = X_j \exp(A + BX_j) \quad (7)$$

بر اساس داده‌های استفاده شده، مقادیر ضرایب ثابت A و B به ترتیب 0/97 و -0/97 به دست آمده و ضریب همبستگی معادله برازش یافته بر روی داده‌ها نیز برابر با



شکل 8 درصد خطای نسبی مقادیر Y محاسبه شده از روش Hager (1993) نسبت به مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی

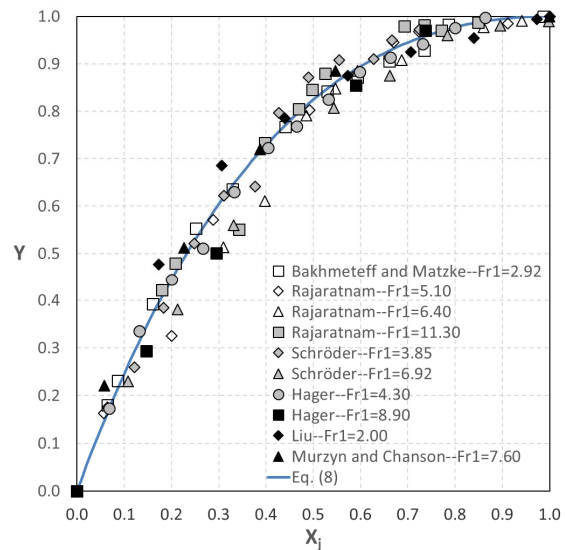


شکل 9 درصد خطای نسبی مقادیر Y محاسبه شده با استفاده از رابطه (8) نسبت به مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی

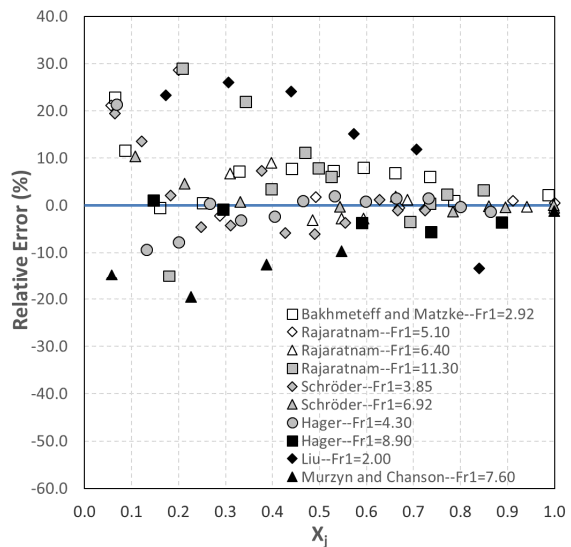
آنالیز آماری خطاهای نسبی مقادیر محاسبه شده از روابط مختلف نسبت به مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میانگین قدر مطلق خطای نسبی در برآورد Y به ترتیب $6/58$ ، $6/49$ ، و $5/08$ درصد برای روش‌های Hager (1993)، Rajaratnam and Subramanya (1968) و رابطه جدید ارائه شده (رابطه 8) بوده که این نشان‌گر درستی بیشتر نتایج حاصل از کاربرد رابطه جدید نسبت به دو رابطه دیگر می‌باشد.

اگرچه در حالت کلی اختلافاتی در نتایج حاصل مشاهده می‌شود.

به منظور تعیین مقدار دقت رابطه جدید و مقایسه کمی نتایج حاصل از آن با دیگر مطالعات، در شکل‌های 7 تا 9 پراکنش خطاهای نسبی نتایج حاصل از کاربرد روابط ارائه شده توسط Rajaratnam and Subramanya (1968)، Hager (1993) و رابطه جدید نسبت به مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی نشان داده شده است.

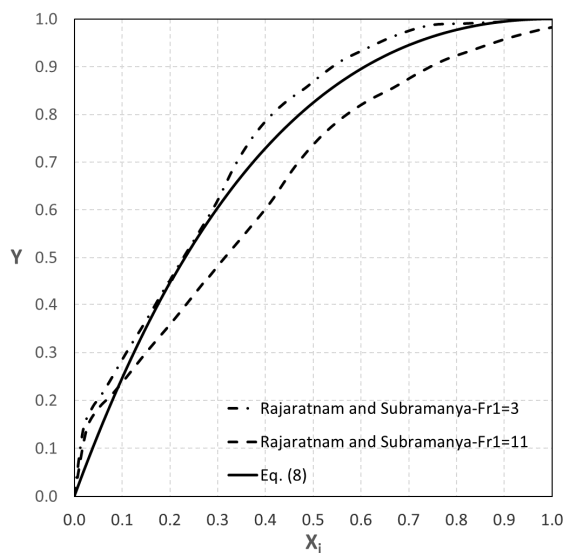


شکل 6 مقایسه نتایج حاصل از روابط موجود با نتایج رابطه (8)

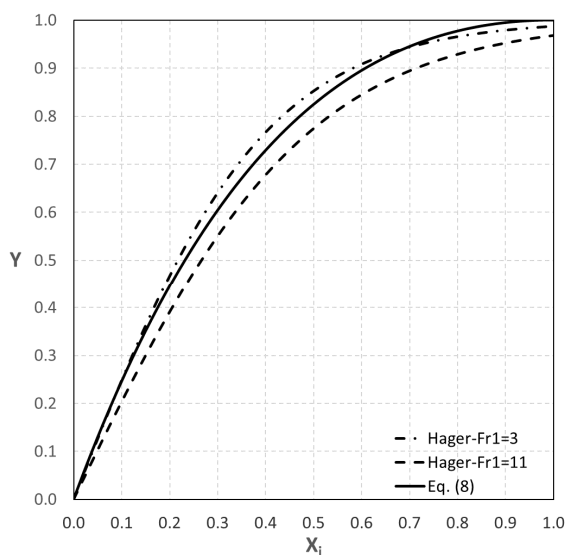


شکل 7 درصد خطای نسبی مقادیر Y محاسبه شده از روش Rajaratnam and Subramanya (1968) نسبت به مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی

(1993) نشان داده شده است که در آن تغییرات Y بر حسب مقادیر $X_j = X_r / (L_j / L_r)$ (همچون حالت قبل، L_j / L_r به Fr_1 بستگی داشته و برای $3 < Fr_1 < 11$ ، نسبت L_j / L_r در بازه $1/69$ تا $1/37$ تغییر می‌کند) رسم شده است.



شکل 10 مقایسه نیمرخ‌های رسم شده بر اساس دو مقدار عدد فرود در روش Rajaratnam and Subramanya (1968) با نتایج حاصل از رابطه جدید



شکل 11 مقایسه نیمرخ‌های رسم شده بر اساس دو مقدار عدد فرود در روش Hager (1993) با نتایج حاصل از رابطه جدید

همان‌گونه که در شکل 11 مشاهده می‌شود انحراف این

نتایج هم چنین نشان می‌دهند که بیشترین خطا در برآورد مقادیر Y مربوط به ابتدای جهش است و با افزایش فاصله از پنجه جهش و در نتیجه افزایش تراز سطح آب، مقدار خطای نسبی کاهش می‌یابد. علت این موضوع در اثر وجود تلاطم شدید جریان در ابتدای جهش و در نتیجه نوسان سطح آب و همچنین ماهیت تعریف خطای نسبی مستتر است، به طوری که در مقادیر کم پارامتر مورد نظر، حتی اندک خطای مطلق (مقدار اندازه‌گیری شده-مقدار برآورد شده) باعث خطای نسبی بزرگی می‌شود و با افزایش مقدار پارامتر، حتی در صورت ثابت باقی ماندن خطای مطلق، مقدار خطای نسبی کاهش می‌یابد.

نکته قابل ملاحظه دیگر، درستی بالای نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی در $X_j > 4$ است. به طوریکه به ترتیب برای روش‌های Rajaratnam and Subramanya (1968)، Hager (1993) و رابطه جدید ارائه شده (رابطه 8)، در مقادیر $X_j > 4$ میانگین قدر مطلق خطای نسبی برآورد Y به ترتیب برابر $3/57$ ، $4/08$ و $1/92$ درصد و در مقادیر $X_j < 4$ این مقادیر به ترتیب $11/05$ ، $10/36$ و $10/13$ درصد است. به عبارت دیگر با افزایش فاصله از ابتدای جهش، درستی مقادیر محاسبه شده در کلیه روش‌ها نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد.

از طرف دیگر در صورتی که بر اساس روش Rajaratnam and Subramanya (1968)، مقادیر $Y = (3/4)\eta$ در برابر مقادیر $X_j = X_s / (L_j / L_s)$ (با توجه به اینکه به اینک L_j / L_s به Fr_1 بستگی دارد و به ازای $3 < Fr_1 < 11$ ، نسبت L_j / L_s در بازه $2/69$ تا $1/95$ تغییر می‌کند) برای اعداد فرود 3 و 11 رسم شوند (شکل 10)، مقایسه نتایج با مقادیر حاصل از رابطه جدید نشان می‌دهد که منحنی‌های روش Rajaratnam and Subramanya (1968) در ابتدا دارای شیب زیاد و نزدیک به قائم هستند و به طور کلی از روند یکنواختی برخوردار نبوده و دارای شکستگی‌هایی می‌باشد. شکل 10 هم چنین نشان می‌دهد که منحنی رابطه (8) به جز در بخش ابتدایی جهش، در سایر نقاط در بین دو مقدار عدد فرود گفته شده در بالا قرار می‌گیرد.

در شکل 11 نیز مقایسه گفته شده برای همان دو عدد فرود، لیکن بر اساس روش ارائه شده توسط Hager

b	عرض مقطع آبراهه
Fr_1	عدد فرود در پنجه جهش
$h_j=y_2-y_1$	ارتفاع جهش
L_j	طول جهش
L_r	طول گلتنده جهش
L_s	طول جهش تا نقطه مربوط به $(3/4)h_j$
x	مختصات افقی نسبت به پنجه جهش
$X_j=x/L_j$	مختصات طولی بی بعد بر حسب L_j
$X_r=x/L_r$	مختصات طولی بی بعد بر حسب L_r
$X_s=x/L_s$	مختصات طولی بی بعد بر حسب L_s
y	عمق جریان
$Y=(y-y_1)/(y_2-y_1)$	عمق جریان بی بعد
y_1	عمق اولیه جهش
y_2	عمق ثانویه جهش
$\eta=(4/3)Y$	عمق جریان بی بعد در روش Rajaratnam and Subramanya (1968)

6- منابع

- Bakhmeteff, B. A. and Matzke, A. E. (1936). "The hydraulic jump in terms of dynamic similarity", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 101(1), pp. 630-647.
- Chachereau, Y. and Chanson, H. (2011). "Free-surface fluctuations and turbulence in hydraulic jumps", Experimental Thermal and Fluid Science, 35(6), pp. 896-909.
- Gupta, N. (1967). "A dimensionless study of the longitudinal element and profile of hydraulic jump", Journal of Institution of Engineers India, 47(11), pp. 1155-1165.
- Hager, W. H. (1992). *Energy dissipators and hydraulic jump*. Springer Science & Business Media.
- Hager, W. H. (1993). "Classical hydraulic jump: free surface profile", Canadian Journal of Civil Engineering, 20(3), pp. 536-539.
- Liu, M., (2004). "Turbulence structure in hydraulic jumps and vertical slot fishways", Ph.D. thesis. University of Alberta, Edmonton, CA.
- Liu, M., Rajaratnam, N., and Zhu, D. (2004). "Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude numbers", Journal of Hydraulic Engineering, 130(6), pp. 511-520.
- Murzyn, F. and Chanson, H. (2009). "Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: Experimental

منحنی‌ها از منحنی مربوط به رابطه (8) ناچیز است، لیکن در محدوده انتهایی جهش، اختلاف در عمق‌های محاسبه شده از رابطه (8) با عمق‌های مشاهده شده وجود داشته و با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود.

4- نتیجه گیری

محاسبات مربوط به نیمرخ طولی سطح آب در جهش هیدرولیکی، در تعیین ارتفاع دیواره‌های جانبی و ضخامت کف حوضچه‌های آرامش اهمیت دارد. در این مطالعه با انتخاب طول جهش (L_j) به عنوان مقیاس طولی بی بعد کننده مختصات طولی و پارامتر (y_2-y_1) به عنوان مقیاس ارتفاعی بی بعد کننده مختصات عمودی نیمرخ جهش، داده‌های مربوط به مطالعات محققان پیشین استخراج شد. در مجموع 314 داده مربوط به نیمرخ سطح آب جهش برای محدوده $2.0 < Fr_1 < 11.30$ از مطالعات مختلف استخراج شده و پس از تحلیل رگرسیون بر روی داده‌ها و مشخص شدن شکل کلی معادله حاکم بر داده‌ها، با استفاده از شرایط مرزی انتهای جهش ضرایب ثابت معادله به دست آمد و در نهایت معادله (8) به عنوان معادله نیمرخ طولی بی بعد سطح آب در جهش هیدرولیکی آزاد ارائه شد. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی مختلف با معادله (8) نشان دادند که معادله از درستی بهتری نسبت به دیگر روابط موجود برخوردار است و میانگین خطای نسبی آن نسبت به مقادیر مشابه آزمایشگاهی مشاهده شده فقط در حدود $\pm 5/08$ درصد می‌باشد. همچنین معادله جدید نیمرخ طولی جهش هیدرولیکی به علت در نظر گرفتن شرایط مرزی انتهای جهش دارای مشکلات متداول معادلات پیشین و عدم انطباق بر عمق ثانویه جهش نمی‌باشد. به علاوه با توجه به وجود معادلات نسبتاً دقیق برای تخمین طول جهش بر اساس مشخصات جریان در پنجه جهش و همچنین تعیین عمق ثانویه جهش کلاسیک بر اساس رابطه نسبت عمق ثانویه حاصل از بقای اندازه حرکت، به راحتی می‌توان از معادله (8) برای تعیین نیمرخ طولی جهش هیدرولیکی آزاد استفاده نمود.

5- فهرست علائم

ضرایب ثابت A, A_1, A_2, B

Rouse, H., Siao, T.T. and Nagaratnam, S. (1959). "Turbulence characteristics of the hydraulic jump", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 124(1), pp. 926-950.

Sananes, F. and Fortey, J. W. (1966). "Discussion to The hydraulic jump as a wall jet", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 92(HY3), pp. 117-119.

observations", Experimental Thermal and Fluid Science, 33(7), pp.1055-1064.

Rajaratnam, N. (1962). "Profile equation for the hydraulic jump", Water Power, 14, pp. 324-327.

Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1968). "Profile of the hydraulic jump", Journal of Hydraulic Division, ASCE, 94(3), pp. 663-673.