

مقاله پژوهشی

برآورد مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای

مهدی اسمعیلی ورکی^{۱*} و محمد حسین امید^۲

دریافت: ۱۳۸۶/۱۱/۲۱ پذیرش: ۱۳۸۷/۰۵/۰۶

چکیده

حوضچه‌های آرامش واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، به دلیل عدم نیاز به استفاده از سازه تبدیل در ابتدا و انتهای آنها و نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تر از نظر نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی، جایگزین‌های مناسبی برای حوضچه‌های کلاسیک می‌باشند. در پژوهش حاضر، به منظور تسهیل در طراحی اینگونه حوضچه‌ها، با تجزیه و تحلیل آماری، معادلاتی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش ارائه شده است. برای رسیدن به مدل‌های رگرسیونی با دقت مطلوب، پارامترهای بی‌بعد موثر با استفاده از تحلیل ابعادی استخراج و با بکارگیری آنها ۵ مدل رگرسیونی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای و ۵ مدل رگرسیونی برای مقطع مستطیلی استخراج شد. سپس بر اساس آماره‌های R^2 ، EF و RMSE، مناسب‌ترین مدل برای برآورد نسبت عمق ثانویه در مقطع مستطیلی مدلی با $R^2=0/989$ ، $EF=0/9895$ و $RMSE=0/21264$ و برای طول نسبی جهش با $R^2=0/951$ ، $EF=0/9528$ و $RMSE=0/001949$ انتخاب گردید. مناسب‌ترین مدل برای برآورد نسبت عمق ثانویه در مقطع دوزنقه‌ای مدلی با $R^2=0/964$ ، $EF=0/9654$ و $RMSE=0/318$ و برای برآورد طول نسبی جهش مدلی با $R^2=0/951$ ، $EF=0/9505$ و $RMSE=3/159$ بدست آمد. ارزیابی مدل‌های ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد این مدل‌ها قادرند با دقت قابل قبولی نسبت عمق ثانویه و طول جهش هیدرولیکی واگرا را برآورد نمایند.

واژه‌های کلیدی: حوضچه آرامش واگرا، مدل رگرسیونی، جهش هیدرولیکی واگرا و حوضچه آرامش دوزنقه‌ای

ارجاع: اسمعیلی ورکی م. و امید م. ح. ۱۳۸۷. برآورد مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای. مجله پژوهش آب ایران. ۲(۲): ۲۷-۳۵.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه تهران.

۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی آب و خاک دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: m_esmaelivaraki@yahoo.com

مقدمه

یکی از متداولترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در انتهای سازه‌هایی نظیر سرریزها، تندابها، آبشارها و دریچه‌ها، حوضچه‌های آرامش است که در آنها با شکل‌گیری جهش هیدرولیکی و عبور جریان از رژیم فوق بحرانی به زیربحرانی، انرژی جریان مستهلک می‌شود. حوضچه‌های آرامش واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، دو نوع از حوضچه‌های آرامش است که به دلیل عدم نیاز به استفاده از سازه تبدیل در ابتدا و انتهای آنها و نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تر از نظر نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی، قابل رقابت با حوضچه‌های کلاسیک (معمولی) بوده و جایگزین مناسبی برای این گونه حوضچه‌ها می‌باشند (امید و همکاران، 2007).

در مطالعه جهش هیدرولیکی پارامترهای نسبت عمق ثانویه، طول جهش و افت نسبی انرژی اهمیت بیشتری دارد. از این رو، محققین سعی کرده‌اند تحقیقات خود ضمن مطالعه روند تغییرات این پارامترها تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف، به روابط تئوری، تجربی و یا ترکیبی از هر دو برای برآورد این پارامترها به منظور طراحی حوضچه‌های آرامش دست یابند (پترکا، 1983). در ادامه، به برخی از تحقیقات صورت گرفته در مورد جهش‌های هیدرولیکی مستقیم و واگرا در حوضچه‌های آرامش با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای اشاره می‌شود.

نتایج تحقیقات صورت گرفته در خصوص مشخصات جهش هیدرولیکی مستقیم در مقاطع دوزنقه‌ای نشان می‌دهد که بکارگیری اصول پیوستگی و مومنوم و استفاده از فرضیاتی می‌توان رابطه تئوری برای نسبت عمق ثانویه ارائه نمود که مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد (دیکسین، 1961، ماسی، 1966 و انوسچک و هگر، 1989 و امید، 1376). نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که با کاهش شیب دیواره‌های جانبی حوضچه آرامش در مقایسه با جهش کلاسیک، طول نسبی جهش افزایش (پیوزی و هسینگ، 1938، وانوسچک و هگر، 1989 و امید، 1376)، نسبت عمق ثانویه کاهش (دیکسین، 1961، وانوسچک و هگر، 1989 و امید، 1376) و افت نسبی انرژی (امید، 1376) افزایش می‌یابد.

نتایج تحقیقات اجرا شده در خصوص مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای نشان می‌دهد که با بکارگیری اصول پیوستگی و مومنوم و استفاده از فرضیاتی که مهمترین آنها بکارگیری تابع مناسب برای نیمرخ طولی سطح آب در امتداد جهش است، می‌توان رابطه تئوری-تجربی که تابعی از طول نسبی جهش است، برای برآورد نسبت عمق ثانویه ارائه نمود (کلوسیوس و احمد، 1961، اربهابهیراما و ابلا، 1971، خلیفه و کروکودل، 1979، لاسون و فیلیپس، 1983 و امید و همکاران، 2007). رابطه تئوری زیر برای محاسبه نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع دوزنقه‌ای توسط امید و همکاران (2007) ارائه شده است.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left[Fr_1^2 \frac{D_1}{y_1} (1 - \frac{A_1}{A_2}) + K_1 \right] \frac{A_1}{A_2 K_2} + \frac{2L_{js} \left(\frac{y_2^2}{3} + 0.048y_1^2 + 0.118y_1y_2 \right) \sin\theta}{A_2 K_2 y_1} \quad (1)$$

در این رابطه، y_1 و y_2 به ترتیب عمق‌های اولیه و ثانویه جهش، Fr_1 عدد فرود اولیه جریان قبل از پرش، A_1 و A_2 سطح مقطع‌های جریان قبل و بعد از جهش، L_{js} طول جهش در امتداد دیواره حوضچه، θ زاویه واگرایی، Z نماینده شیب جانبی، $K = \frac{1}{3} + \frac{b}{6b'}$ ، b' عرض کف حوضچه، $D = \frac{by + y^2z}{b + 2yz}$ و نمایه‌های 1 و 2 به ترتیب مربوط به موقعیت جریان قبل و بعد از جهش می‌باشد.

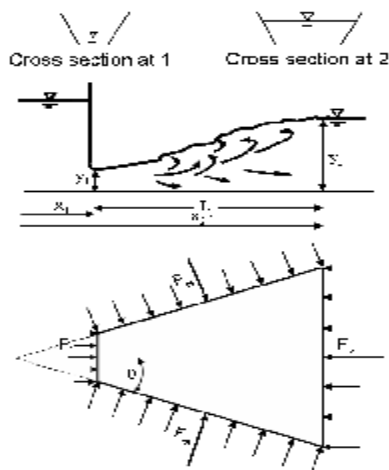
بررسی‌های صورت گرفته در رابطه با اثر واگرایی دیواره‌های حوضچه بر عملکرد پارامترهای مهم جهش هیدرولیکی نشان می‌دهد که واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش افت نسبی انرژی و کاهش طول جهش، در مقایسه با جهش کلاسیک، جهش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستطیلی، می‌شود (اربهابهیراما و ابلا، 1971، خلیفه و کروکودل، 1979، امید و اسمعیلی ورکی، 1384 و امید و همکاران، 2007). همچنین مطالعه صورت گرفته در خصوص تأثیر توأم شیب جانبی و واگرایی طولی دیواره‌ها بر خصوصیات جهش هیدرولیکی نشان می‌دهد که افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در هر شیب جانبی، در مقایسه با حوضچه دوزنقه‌ای مستقیم، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی می‌گردد (امید و اسمعیلی ورکی، 1384 و امید و همکاران، 2007).

جهش)، $p_6 = z$ ، (شیب جانبی دیواره‌های حوضچه) و $p_7 = q$ ، (زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه) می‌باشد. از آنجاکه در طراحی حوضچه‌های آرامش نیاز به برآورد عمق ثانویه و طول جهش می‌باشد، معادله 3 را می‌توان به صورت معادلات 4 و 5 خلاصه نمود.

$$\frac{y_1}{y_2} = f_3\left(\frac{L_j}{y_1}, Fr_1, Fr_2, z, q\right) \quad (4)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = f_4\left(\frac{y_2}{y_1}, Fr_1, Fr_2, z, q\right) \quad (5)$$

معادلات 4 و 5 به عنوان مدل‌های اولیه در تجزیه و تحلیل‌های آماری برای یافتن مدل‌های با دقت برآوردی مناسب بکار گرفته شد.



شکل 1- شمای جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع دوزنقه‌ای

تجزیه و تحلیل آماری

برای توسعه و صحت‌سنجی مدل‌های ساده و با دقت مناسب برای تخمین نسبت عمق ثانویه و طول جهش، از 792 داده آزمایشگاهی عمق‌های اولیه و ثانویه جهش، اعداد فرود قبل و بعد از جهش، طول جهش، شیب جانبی و زاویه واگرایی، برای مقطع مستطیلی و مقاطع دوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی 0/5:1، 1:1 و 1/5:1 و زوایای واگرایی 3، 5، 7 و 9 درجه، در دامنه اعداد فرود 3 تا 10 استفاده شد که دامنه داده‌های آزمایشگاهی در جدول 1 ارائه شده است.

با توجه به عدم امکان حل صریح معادلات تئوری استخراج شده برای نسبت عمق ثانویه در جهش واگرا (به دلیل وجود دو پارامتر مجهول در یک معادله) از یک سو و نبود روابطی تجربی برای برآورد طول نسبی جهش از سوی دیگر، ارائه مدل‌های تجربی که قادر باشند با دقت مناسب مشخصات جهش واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای را برآورد نمایند، می‌توانند به طراحی اینگونه حوضچه‌ها کمک کند.

در پژوهش حاضر، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از مطالعه صورت گرفته در مورد مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی توسط اسمعیلی ورکی (1382)، امکان دستیابی به مدل‌های تجربی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش بررسی شده است.

مواد و روشها تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع دوزنقه‌ای عبارتند از: عرض کف حوضچه در محل شروع جهش (b_1)، عرض کف حوضچه در محل انتهای جهش (b_2)، شیب دیواره‌های جانبی حوضچه (z)، زاویه واگرایی حوضچه (θ)، عمق اولیه جهش (y_1)، عمق ثانویه جهش (y_2)، سرعت جریان در محل عمق اولیه جهش (V_1)، سرعت جریان در محل عمق ثانویه جهش (V_2) و طول جهش (L_j). این پارامترها را می‌توان به صورت رابطه تابعی زیر نوشت. شمای عمومی از موقعیت این پارامترها در شکل 1 نشان داده شده است.

$$f_1(b_1, b_2, z, q, y_1, y_2, V_1, V_2, L_j) = 0 \quad (2)$$

با استفاده از تئوری باکینگهام، معادله 2 را می‌توان به صورت معادله 3 نوشت.

$$f_2(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7) = 0 \quad (3)$$

که در آن پارامترهای بی‌بعد استخراج شده عبارتند از $p_1 = y_1 / y_2$ (نسبت عمق ثانویه)، $p_2 = L_j / y_1$ و $p_3 = L_j / y_2$ (طول نسبی جهش)، $p_4 = Fr_1$ (عدد فرود در شروع جهش)، $p_5 = Fr_2$ (عدد فرود در انتهای

به منظور اشتقاق مدل‌های رگرسیونی نمایی، از نرم افزار SAS استفاده شد. به این ترتیب امکان برآورد مناسب‌تر پارامترهای مورد نظر در مقطع مستطیلی و مقاطع دوزنقه‌ای حاصل شد. جهت ارزیابی مدل‌های رگرسیونی بدست آمده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، راندمان مدل (EF)، معادله 6، و میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE)، معادله 7، استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_{Exp})^2}{n}} \quad (6)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{Exp} - \bar{x}_{Exp})^2 - \sum_{i=1}^n (x_p - x_{Exp})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{Exp} - \bar{x}_{Exp})^2} \quad (7)$$

در معادلات 6 و 7، x_{Exp} و \bar{x}_{Exp} مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و مقدار میانگین آنها و x_p مقدار برآورد شده توسط مدل می‌باشد.

نتایج

با توجه به این که طول جهش یکی از پارامترهای ورودی در معادله تئوری نسبت عمق ثانویه است، مدل‌های رگرسیونی به گونه‌ای ارائه گردیدند که نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش به عنوان پارامترهای ورودی و خروجی در دو طرف معادله حضور داشته باشند. به این ترتیب با ایجاد دو معادله برای دو مجهول یادشده، می‌توان پارامترهای مورد نظر را برآورد نمود. نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری برای مدل‌های رگرسیونی ایجاد شده برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای که در سطح احتمال 95 درصد معنی‌دار بوده‌اند، به شرح زیر می‌باشد.

الف) مدل‌های رگرسیونی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقطع مستطیلی

با توجه به آماره‌های R^2 ، EF و RMSE مدل‌های آماری برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش

جدول 1- دامنه داده‌های آزمایشگاهی

| پارامتر قرائت شده | واحد | حداقل | حداکثر |
|-------------------|----------|-------|--------|
| b_1 | cm | 50 | 50 |
| b_2 | cm | 81/5 | 145/1 |
| y_1 | cm | 1/9 | 2/3 |
| y_2 | cm | 6/9 | 26/1 |
| Fr_1 | بدون بعد | 2/99 | 9/38 |
| L_j | cm | 15 | 170 |
| Q | Lit/s | 15/9 | 44/9 |
| z | بدون بعد | 0/5:1 | 1/5:1 |
| θ | درجه | 3 | 9 |

از آنجا که در تجزیه و تحلیل آماری، فرض بر نرمال بودن داده‌ها است و غیر نرمال بودن آنها این آزمون‌ها را غیرمعتبر می‌سازد، لذا نخستین گام در تجزیه و تحلیل آماری، نرمال کردن داده‌ها است. آزمون نرمال بودن پارامترها توسط نرم‌افزار MiniTab برای پارامترهای یادشده در معادله 3 و ترکیبی از آنها صورت گرفت. در مجموع 17 پارامتر بدون بعد برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقطع دوزنقه‌ای و 10 پارامتر بدون بعد برای برآورد پارامترهای یادشده در مقطع مستطیلی استخراج گردید.

هنگام برقراری رگرسیون خطی چندگانه، چنانچه بین متغیرهای مستقل رابطه خطی قوی مشاهده شود، هم‌راستایی چندگانه به وجود می‌آید. اگر چه نبود هم‌راستایی از فرض‌های اصلی رگرسیون نیست، لیکن به دلیل مشکلاتی که در تفسیر و برآورد متغیرهای وابسته ایجاد می‌نماید، باید از ایجاد آن جلوگیری نمود. در این پژوهش از میان پارامترهای بی‌بعدی که مورد تایید آزمون نرمال بودند، 5 مدل رگرسیونی برای برآورد هر یک از پارامترهای نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقطع دوزنقه‌ای و 5 مدل رگرسیونی برای تخمین هر یک از پارامترهای نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقطع مستطیلی ایجاد شده و سپس آزمون هم‌راستایی برای هر یک از مدل‌ها به وسیله نرم‌افزار MiniTab انجام شد.

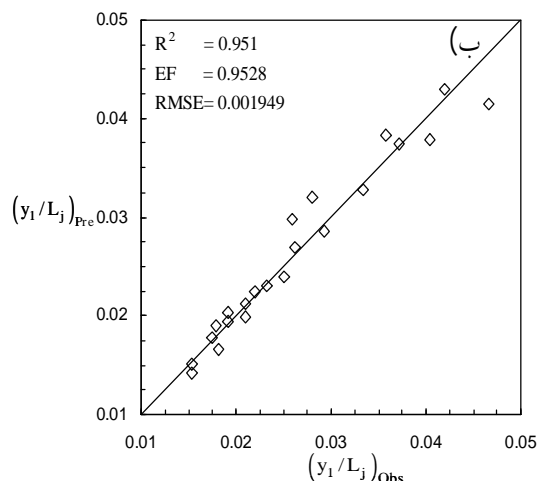
واگرا که در جداول 2 و 3 آورده شده است، مناسبترین مدل برای برآورد نسبت عمق ثانویه، مدل شماره 1 در جدول 2- مدل های رگرسیونی برآورد نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع مستطیلی

| شماره مدل | مدل استخراج شده برای برآورد نسبت عمق ثانویه جهش واگرا در مقطع مستطیلی | R ² | EF | RSME |
|-----------|--|----------------|--------|---------|
| 1 | $y_2 / y_1 = 18.8718 (Fr_1 y_1 / L_j) - 0.3524 (L_j / y_1 \theta) + 0.5695 (Fr_1 L_j / y_1 \theta)^{0.6444} - 38.7315 (y_1 / L_j) + 0.974$ | 0/989 | 0/9895 | 0/21264 |
| 2 | $y_2 / y_1 = -0.0412 (L_j / y_1 \theta) + 0.0278 (Fr_1 L_j / y_1 \theta) + 2.0543 (1 / Fr_1)^{-0.6696} - 1.1295$ | 0/984 | 0/9843 | 0/26031 |
| 3 | $y_2 / y_1 = 0.0168 (Fr_1 L_j / y_1 \theta)^{1.0474} + 1.579 (1 / Fr_1)^{-0.7759} - 0.6239$ | 0/983 | 0/9833 | 0/26851 |
| 4 | $y_2 / y_1 = -0.4948 (L_j / y_1 \theta) + 0.4445 (Fr_1 L_j / y_1 \theta)^{0.7155} - 20.9129 (y_1 / L_j) + 4.4445$ | 0/975 | 0/9755 | 0/32497 |
| 5 | $y_2 / y_1 = 0.1377 (L_j / y_1 \theta)^{-1.1664} + 0.6534 (1 / Fr_1) + 0.3236$ | 0/972 | 0/9718 | 0/34874 |

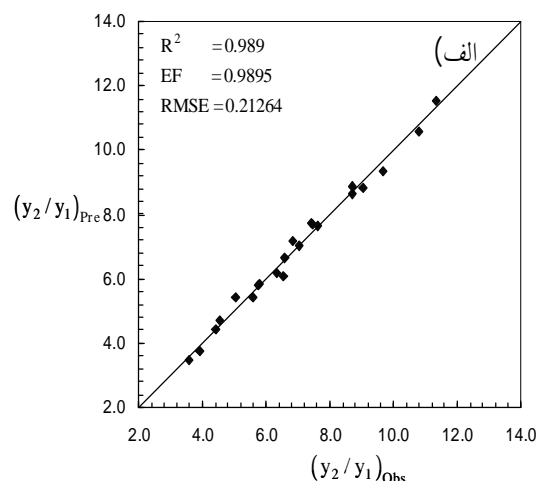
جدول 3- مدل های رگرسیونی برآورد طول نسبی جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع مستطیلی

| شماره مدل | مدل استخراج شده برای برآورد طول نسبی جهش واگرا در مقطع مستطیلی | R ² | EF | RSME |
|-----------|--|----------------|--------|----------|
| 1 | $y_1 / L_j = 0.0028 (y_2 \theta / y_1 Fr_1) + 0.0032 (y_2 / y_1 \theta) + 0.194 (1 / Fr_1)^{0.2724} - 0.1168$ | 0/951 | 0/9528 | 0/001949 |
| 2 | $y_1 / L_j = 0.00291 (y_2 \theta / y_1 Fr_1) + 0.0051 (y_2 / y_1 \theta) + 1.2856 (y_1 / y_2)^{0.0138} + 0.0935 (1 / Fr_1) - 1.2688$ | 0/937 | 0/9418 | 0/002164 |
| 3 | $y_1 / L_j = 0.00279 (y_2 \theta / y_1 Fr_1) + 0.00712 (y_2 / y_1 \theta) + 0.2142 (y_1 / y_2)^{0.3056} - 0.1229$ | 0/927 | 0/9319 | 0/002342 |
| 4 | $y_1 / L_j = 0.001805 (y_2 \theta / y_1 Fr_1) + 0.1708 (1 / Fr_1)^{0.24978} - 0.09517$ | 0/925 | 0/9308 | 0/00236 |
| 5 | $y_1 / L_j = 0.05374 (y_2 / y_1 Fr_1) - 0.294 (y_2 / y_1 \theta)^{0.04382} + 0.08943 (y_1 / y_2) + 0.2482$ | 0/897 | 0/9211 | 0/002521 |

برگزیده برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش در مقابل داده های آزمایشگاهی مربوطه در شکل 2 نشان داده شده است.

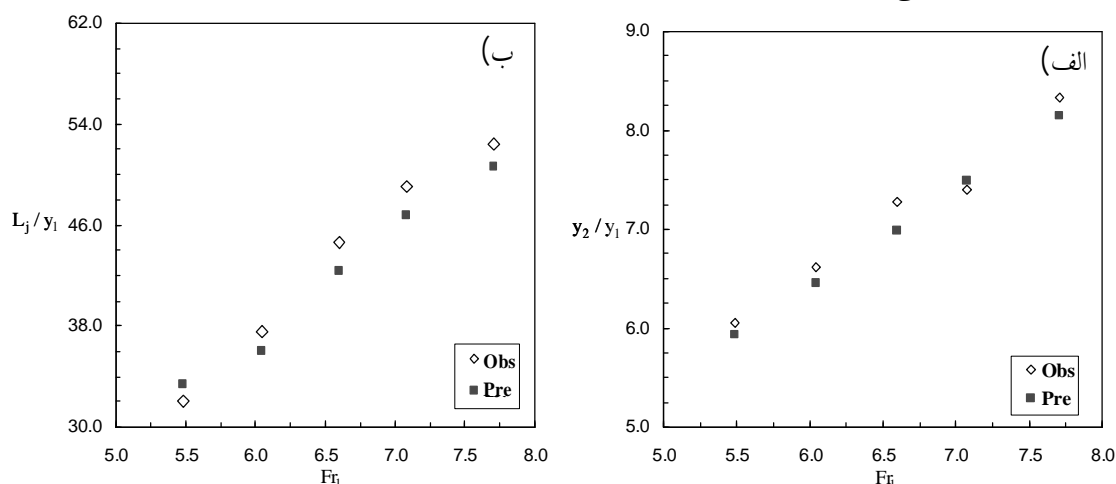


برای درک بهتر وضعیت عملکرد مدل های رگرسیونی در برآورد پارامترهای نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقطع مستطیلی، نمودارهای خروجی مدل های



شکل 2- ارزیابی عملکرد مدل های رگرسیونی در برآورد پارامترهای جهش واگرا در مقطع مستطیلی در مقابل نتایج آزمایشگاهی، الف) نسبت عمق ثانویه و ب) طول نسبی جهش

ارزیابی مدل‌های انتخابی، عملکرد آنها با 35 داده آزمایشگاهی مربوط به زاویه واگرایی 7 درجه که در مرحله انتخاب مدل‌ها مورد استفاده قرار نگرفته بود، بررسی شد (شکل 3).



شکل 3- مقایسه عملکرد مدل‌ها در برآورد پارامترهای جهش واگرا در مقطع مستطیلی با زاویه 7 درجه
الف) نسب عمق ثانویه و ب) طول نسبی جهش

مدل‌های آماری برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در جداول 4 و 5 آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، مناسب‌ترین مدل برای برآورد نسبت عمق ثانویه مدل شماره 1 در جدول 4 و برای برآورد طول نسبی جهش مدل شماره 1 در جدول 5 می‌باشد.

همانگونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، مدل‌های پیشنهادی دقت کافی را در برآورد پارامترهای مورد نظر دارند.

ب) مدل‌های رگرسیونی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقطع دوزنقه‌ای

جدول 4- مدل‌های رگرسیونی برآورد نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع دوزنقه‌ای

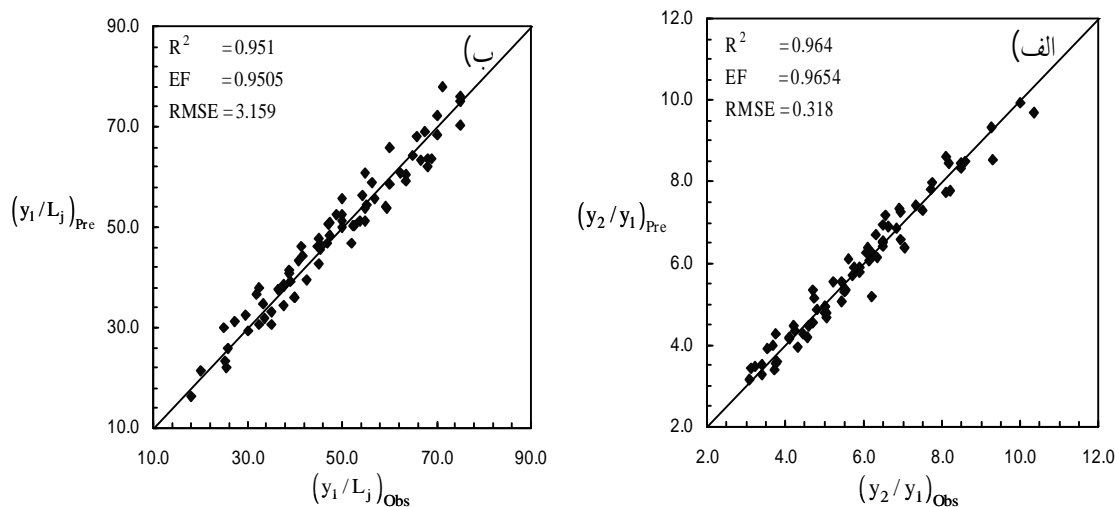
| شماره مدل | مدل‌های استخراج شده برای برآورد نسبت عمق ثانویه جهش واگرا در مقطع دوزنقه‌ای | R^2 | EF | RSME |
|-----------|---|-------|--------|--------|
| 1 | $y_2 / y_1 = -0.03392(L_j / y_1) + 1.02809(Fr_1 / \theta)^{1.4196} + 0.20857(Fr_1 L_j / y_1)^{0.61976} - 0.000087(Fr_1 \theta L_j / y_1 Z) - 0.10868(L_j / y_1 \theta) - 0.00325(Fr_1 Z L_j / y_1) + 0.61976$ | 0/964 | 0/9654 | 0/3180 |
| 2 | $y_2 / y_1 = -0.07969(L_j / y_1) - 0.14214(Fr_1 Z) + 0.46772(Fr_1 / \theta)^{1.67562} + 0.57567(Fr_1 L_j / y_1)^{0.49237} + 0.55181$ | 0/960 | 0/9612 | 0/3371 |
| 3 | $y_2 / y_1 = 0.67756(Fr_1 / \theta)^{1.51715} + 0.10852(Fr_1 L_j / y_1)^{0.66212} - 0.00332(Fr_1 Z L_j / y_1) + 1.2652$ | 0/959 | 0/9609 | 0/3385 |
| 4 | $y_2 / y_1 = -0.19613(Fr_1 Z) + 0.79127(Fr_1 / \theta)^{1.44489} + 0.25059(Fr_1 L_j / y_1)^{0.52727} + 0.97383$ | 0/955 | 0/957 | 0/3584 |
| 5 | $y_2 / y_1 = -0.01675(L_j Z / y_1) - 0.04239(L_j / y_1) + 0.99175(Fr_1 / \theta) + 0.49916(Fr_1 L_j / y_1)^{0.48095} + 0.02703$ | 0/954 | 0/9557 | 0/3601 |

جدول 5- مدل‌های رگرسیونی برآورد طول نسبی جهش در جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع دوزنقه‌ای

| شماره مدل | مدل استخراج شده برای برآورد طول نسبی جهش هیدرولیکی واگرا در مقطع دوزنقه‌ای | R ² | EF | RSME |
|-----------|---|----------------|--------|-------|
| 1 | $L_j / y_1 = -10.92528 (y_2 / y_1 \theta) + 15.72034 (Fr_1 z y_2 / y_1)^{0.39195} + 1.77281 (y_2 / y_1 z) - 12.26545$ | 0/951 | 0/9505 | 3/159 |
| 2 | $L_j / y_1 = 8.54707 (Fr_1 y_2 / y_1)^{0.53536} + 1.81698 (Fr_1 z) - 1.54892 (Fr_1 y_2 / y_1 \theta) - 7.2605$ | 0/949 | 0/9501 | 3/174 |
| 3 | $L_j / y_1 = 21.38947 (y_2 / y_1)^{0.69705} - 17.7083 (y_2 / y_1 \theta) + 1.96673 (Fr_1 z) + 6.36756 (Fr_1 / \theta) - 21.88603$ | 0/946 | 0/9485 | 3/275 |
| 4 | $L_j / y_1 = 8.58139 (y_2 / y_1) - 12.88955 (y_2 / y_1 \theta) + 2.45805 (Fr_1 z) - 0.79838$ | 0/940 | 0/9420 | 3/534 |
| 5 | $L_j / y_1 = 11.32218 (y_2 / y_1) + 1.20793 (Fr_1 z)^{1.26642} - 2.19189 (Fr_1 y_2 / y_1 \theta) - 12.83909$ | 0/924 | 0/9272 | 3/893 |

مقطع دوزنقه‌ای، نتایج خروجی مدل‌های منتخب در مقابل داده‌های آزمایشگاهی در شکل 4 نشان داده شده است.

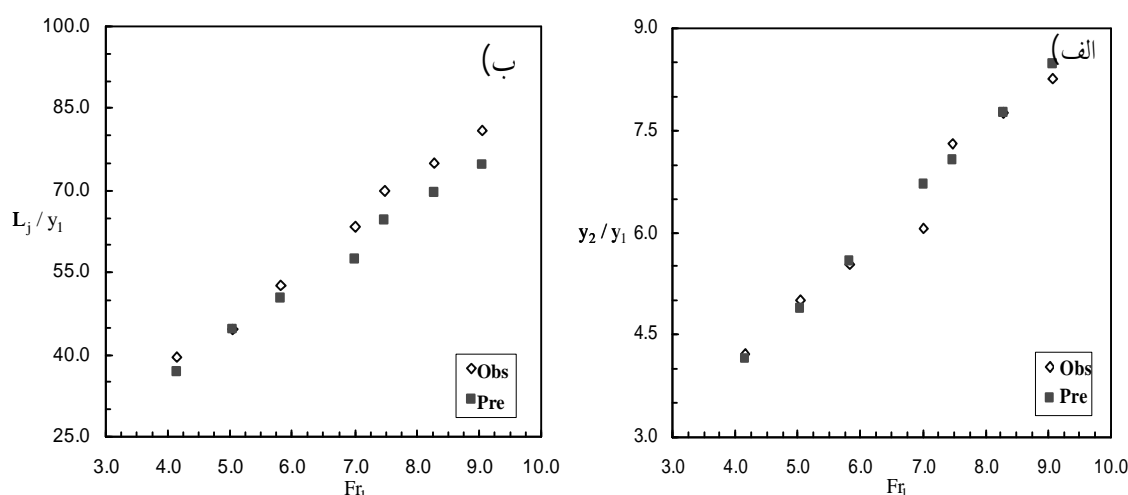
برای تعیین دقت مدل‌های رگرسیونی در برآورد پارامترهای نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در



شکل 4- ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی در برآورد پارامترهای جهش واگرا در مقطع دوزنقه‌ای در مقابل نتایج آزمایشگاهی، الف) نسبت عمق ثانویه و ب) طول نسبی جهش

بود، بررسی شد. همانگونه که در شکل 5 مشاهده می‌شود، با استفاده از مدل‌های رگرسیونی پارامترهای مورد نظر با دقت خوبی برآورد شد.

برای ارزیابی مدل‌های انتخابی، عملکرد آنها با 45 داده آزمایشگاهی مربوط به زاویه واگرایی 7 درجه و شیب‌جانبی 1:1 که در مرحله انتخاب مدل‌ها مورد استفاده قرار نگرفته



شکل 5- مقایسه عملکرد مدل‌ها در برآورد پارامترهای جهش واگرا در مقطع دوزنقه‌ای با زاویه واگرایی 7 درجه و شیب جانبی 1:1، الف نسب عمق ثانویه و ب) طول نسبی جهش

نتیجه‌گیری $RMSE=0/001949$ بدست آمد. همچنین برای مقطع

دوزنقه‌ای، مناسب‌ترین مدل برای برآورد نسبت عمق ثانویه مدلی با $R^2=0/964$ ، $EF=0/9654$ و $RMSE=0/318$ و برای برآورد طول نسبی جهش مدلی با $R^2=0/951$ ، $EF=0/9505$ و $RMSE=3/159$ استخراج شد.

با توجه به اینکه معادلات تجربی تنها در دامنه پارامترهای بکار گرفته شده در استخراج آنها صادق است لذا، معادلات تجربی ارائه شده در پژوهش حاضر برای نسبت عمق ثانویه 3/63-11/35، اعداد فرود 3-9/3، شیب جانبی قائم و 0/5:1 تا 1/5:1 و زوایای واگرایی 3 تا 9 درجه کاربرد خواهد داشت.

منابع

1. اسمعیلی ورکی م. 1382. مطالعه خصوصیات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای شکل. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران.
2. امید م. ح. 1376. جهش هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه‌ای. مجله علوم کشاورزی ایران. 3: 121-113.
3. امید م. ح. و اسمعیلی ورکی م. 1384. مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای شکل، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان. 9(2): 30-17.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان استفاده از مدل‌های تجربی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور با استفاده از تحلیل ابعادی، پارامترهای بی‌بعد اصلی موثر بر نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش استخراج گردید، سپس ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای بی‌بعد به عنوان متغیرهای ورودی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش واگرا انتخاب شد و ضرایب و توان‌های آنها با استفاده از نرم افزار SAS بدست آمد. مدل‌های استخراج شده به کمک آماره‌های R^2 ، EF و $RMSE$ ارزیابی شد و بهترین مدل برای برآورد مشخصات جهش در هر مورد انتخاب گردید.

در تمام مدل‌های رگرسیونی، معادلات به‌گونه‌ای تنظیم شده است که نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش به عنوان پارامترهای ورودی و خروجی در دو طرف معادلات حضور داشته باشد. به این ترتیب با ایجاد دو معادله برای دو مجهول یادشده، پارامترهای مورد نظر به سادگی برآورد می‌شوند.

در نهایت مناسب‌ترین مدل رگرسیونی برای برآورد نسبت عمق ثانویه در مقطع مستطیلی مدلی با $R^2=0/989$ ، $EF=0/9895$ و $RMSE=0/21264$ و برای طول نسبی جهش مدلی با $R^2=0/951$ ، $EF=0/9528$ و

4. Arabhabhira A. and Abela A. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. Journal of Hydraulic Division. ASCE. 97(1):31-42.
5. Diksin M.H. 1961. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Water Power. 13:167-172.
6. Khelifa A.M. and McCorquodale. A.M. 1979. Radial Hydraulic jump. Journal of Hydraulic Division. ASCE. 105(9):1065-1078.
7. Kouluseus H.j. and Ahmad D. 1961. Circular hydraulic jump. Journal of Hydraulic Division. ASCE. 95(1): 409-422.
8. Lawson J.D. and B.C. Phillips. 1983. Circular hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering. 109(4):505-518.
9. Massey B.S. 1966. Hydraulic jump in trapezoidal channel An Improved Method. Water Power. 13:232.
10. Omid M.H. Esmaeeli Varaki M. and Narayaa R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. Journal of Hydraulic Research (IAHR). 45(4):512-518.
11. Peterka A.J. 1983. Hydraulic design of stilling basin and energy dissipaters. Engineering monograph. No. 25. U. S. bureau of reclamation.
12. Posey C.J. and Hsing P.S. 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Engineering News-Record. p.797.
13. Wanoschek R. and Hager W.H. 1989. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Journal of Hydraulic Research. 27(3):429-445.

