

## مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس

امیر کاسی<sup>۱</sup>، جواد فرهودی<sup>۲</sup> و مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۳\*</sup>

### چکیده

در این تحقیق مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در حوضچه مستطیلی با شیب کف معکوس به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی شده است. بدین منظور با بسط مبانی تئوری جهش هیدرولیکی، روابط تئوری برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی استخراج و با آزمایش‌هایی بر روی یک مدل حوضچه آرامش واگرا با شیب کف معکوس، که برای این منظور طراحی و ساخته شده بود، عمق ثانویه، طول و سایر مشخصات جهش بررسی شد. آزمایش‌ها برای ۴ زاویه واگرایی (۳، ۵، ۷ و ۱۰ درجه) به اضافه جهش مستقیم در مقطع مستطیلی و برای ۴ شیب کف معکوس (۲/۲۷، ۴/۱، ۵/۶۱ و ۸ درصد) به همراه شیب صفر و در دامنه اعداد فرود (۹-۲/۵) صورت گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که مطابقت زیادی بین نسبت عمق ثانویه تئوری و تجربی وجود دارد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که بطور متوسط در هر زاویه واگرایی، افزایش شیب کف معکوس از صفر به ۸ درصد باعث می‌شود در مقایسه با جهش کلاسیک، نسبت عمق ثانویه ۴۷ درصد و طول نسبی جهش ۳۵ درصد کاهش و افت نسبی انرژی ۲۰ درصد افزایش یابد.

**واژه‌های کلیدی:** جهش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، مقطع واگرا، شیب معکوس

ارجاع: کاسی ا. فرهودی ج. و اسمعیلی ورکی م. ۱۳۹۰. مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۱۲۱ (۹): ۱۳۰-۱۳۰.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

\* نویسنده مسئول: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir) . [esmaeili.varaki@yahoo.com](mailto:esmaeili.varaki@yahoo.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۰۳

## مقدمه

معمولاً در انتهای سازه‌هایی نظیر سرریز سدها، تنداب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، جریان سرعت زیادی دارد و برای جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین‌دست، احداث سازه‌ای برای استهلاک انرژی جریان و کاهش سرعت آن لازم است. یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی که برای این منظور بکار گرفته می‌شوند، حوضچه‌های آرامش است که در آنها با شکل‌گیری جهش هیدرولیکی و تبدیل رژیم جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی، انرژی آن مستهلک می‌شود.

نخستین بار جهش هیدرولیکی مورد توجه لئوناردو داوینچی قرار گرفت و بعد از او بیدون در سال ۱۸۱۸ این پدیده را بررسی کرد. از آن زمان تاکنون، محققین زیادی شرایط و خصوصیات این پدیده را مطالعه کرده‌اند. با وجود این، علیرغم گذشت نزدیک به دو قرن از شروع مطالعات درباره جهش‌های هیدرولیکی، هنوز مسائل ناشناخته‌ای در مورد آن وجود دارد که محققین را برای ادامه پژوهش در این زمینه ترغیب می‌کند.

در مطالعه جهش هیدرولیکی پارامترهای نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. از این رو، محققین سعی نموده‌اند که در 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، ۱۹۸۳).

یکی از راه‌های کاهش هزینه‌های احداث حوضچه‌های آرامش، تغییر شکل مقطع و پلان حوضچه در جهت هماهنگی با مقاطع بالادست و پایین‌دست، بدون استفاده از سازه‌ی تبدیل است. از طرفی، هرگونه تغییر در هندسه حوضچه، شرایط ایجاد جهش و خصوصیات هیدرولیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مطالعات صورت گرفته در رابطه با اثر واگرایی دیواره‌های حوضچه بر عملکرد پارامترهای مهم جهش هیدرولیکی نشان داده است که واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش افت نسبی انرژی و کاهش طول نسبی جهش،

در مقایسه با جهش کلاسیک، جهش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستطیلی، می‌شود (کلوسیوس و احمد، ۱۹۶۱؛ اربهابهیراما و ابلا، ۱۹۷۱؛ خلیفه و کروکودل، ۱۹۷۹؛ امید و اسمعیلی ورکی، ۱۳۸۴ و امید و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین نتایج تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر توأم شیب جانبی و واگرایی طولی دیواره‌ها بر خصوصیات جهش هیدرولیکی نشان داده است که افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در هر شیب‌جانبی، در مقایسه با حوضچه دوزنقه‌ای مستقیم، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. همچنین نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان داد که در هر زاویه واگرایی با کاهش شیب جانبی، طول نسبی جهش افزایش، نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد (امید و اسمعیلی ورکی، ۱۳۸۴ و امید و همکاران، ۲۰۰۷).

نتایج پژوهش‌های انجام گرفته توسط محققین در خصوص مشخصات جهش هیدرولیکی مستقیم در حوضچه مستطیلی با شیب کف معکوس حاکی از آن است که می‌توان با به کارگیری قوانین بقاء جرم و اندازه حرکت و استفاده از فرضیاتی که مهمترین آنها به کارگیری تابع مناسب برای نیمرخ طولی سطح آب در امتداد جهش (خطی، ربع بیضی و معادله درجه دو) است، رابطه‌ای تئوری-تجربی که تابعی از طول نسبی جهش است، برای برآورد نسبت عمق ثانویه ارائه نمود. همچنین نتایج تحقیقات انجام شده در این رابطه نشان داده است که با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد (ابریشمی و صانعی، ۱۹۹۱؛ مک کورکودال و محمد، ۱۹۹۴؛ پروگینلی و پاگلیارا، ۲۰۰۰؛ بیرامی و چمنی، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰).

## تئوری جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس

برای تحلیل و استخراج روابط مربوط به جهش هیدرولیکی کلاسیک در مقاطع مختلف، از قوانین بقای جرم، کمیت اندازه حرکت و انرژی و نیز فرضیات ساده شونده نظیر ناچیز در نظر گرفتن نیروهای وزن، اصطکاک و مقاومت ناشی از هوا، می‌توان استفاده کرد.

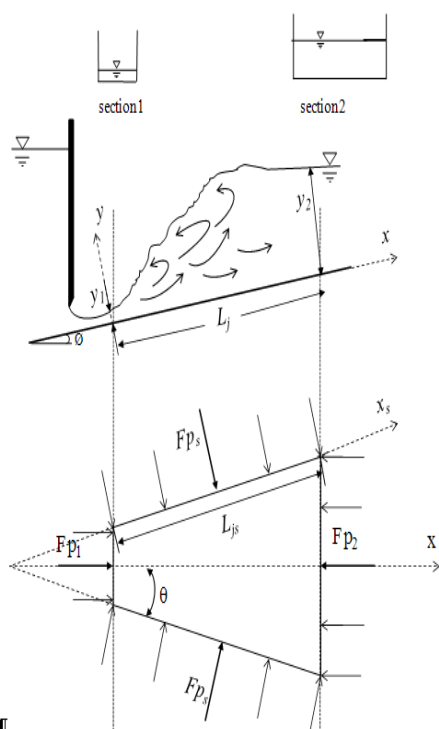
$$F_{p2_x} = \int_0^{y_2} p dA = \int_0^{y_2} \gamma \cos \phi y dy = \frac{1}{2} \gamma y_2^2 b_2 \cos \phi \quad (3)$$

همانطور که در قبل ذکر شد، برای تعیین نیروی‌های جانبی و حجمی وارد بر حجم کنترل، نیاز به تعریف معادله‌ای برای نیمرخ جهش می‌باشد. در این تحقیق منحنی سهموی برای نیمرخ جهش در نظر گرفته شده که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = A \left( \frac{x}{L_j} \right)^2 + B \left( \frac{x}{L_j} \right) \quad (4)$$

از آنجایی که در  $x=L_j$  دو شرط مرزی به صورت  $y=y_2$  و  $dy/dx=0$  داریم، می‌توان ضرایب  $A$  و  $B$  را محاسبه کرد. بنابراین:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = - \left( \frac{x}{L_j} \right)^2 + 2 \left( \frac{x}{L_j} \right) \quad (5)$$



شکل ۱- نمای کلی جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس

با انتگرال‌گیری از حجم کنترل انتخابی در شکل ۱، معادله نیروی حجمی (ثقل) به صورت زیر استخراج می‌گردد.

آنچه که روابط تئوری مربوط به جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس را با جهش کلاسیک متفاوت و پیچیده‌تر می‌کند، وجود نیروهای جانبی در اثر واگرایی دیواره‌ها و نیروی ثقل ناشی از شیب حوضچه می‌باشد، که خود آنها تابعی از نوع منحنی نیمرخ جهش و طول آن خواهند بود. در این تحقیق از فرضیات (۱) سیال غیرقابل تراکم می‌باشد، (۲) توزیع فشار در مقاطع قبل و بعد از جهش هیدرواستاتیک است، (۳) نیروی مقاومت ناشی از هوا و افت اصطکاکی ناشی از تنش برشی کف ناچیز است، (۴) خطوط جریان شعاعی می‌باشد، (۵) نیمرخ سطح آب در طول جهش به صورت سهموی فرض شد، برای استخراج رابطه نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس در کانال مستطیلی استفاده شد.

برای استخراج رابطه نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس، حجم کنترلی مطابق شکل ۱ در نظر می‌گیریم. نیروهای سطحی و حجمی وارد بر حجم کنترل انتخابی عبارتند از:  $F_{p1_x}$  : نیروی هیدرواستاتیک بالادست،  $F_{p2_x}$  : نیروی هیدرواستاتیک پایین‌دست،  $F_{ps_x}$  : نیروی ناشی از واگرایی دیواره‌ها و  $F_{B_x}$  : نیروی ناشی از ثقل، می‌باشند. با اعمال قانون بقا، اندازه حرکت برای حجم کنترل انتخابی و استفاده از فرضیات ساده شونده ذکر شده، روابط زیر برقرار خواهد بود:

$$F_x = F_{S_x} + F_{B_x} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho u dV + \int_{CS} \rho u \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

تنها نیروهای سطحی وارد بر سطوح ورودی و خروجی حجم کنترل شکل ۱، نیروی فشاری بوده که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$F_{p1_x} = \int_0^{y_1} p dA = \int_0^{y_1} \gamma \cos \phi y dy = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 b_1 \cos \phi \quad (2)$$

$$F_{p1_x} - F_{p2_x} + F_{ps_x} - F_{Bx} = \rho Q^2 \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right)$$

$$\frac{1}{2} \gamma y_1^2 b_1 \cos \phi - \frac{1}{2} \gamma y_2^2 b_2 \cos \phi +$$

$$2\gamma L_{js} \left( \frac{1}{10} y_1^2 + \frac{4}{15} y_2^2 + \frac{2}{15} y_1 y_2 \right) \sin \theta -$$

$$\gamma L_j b_1 \left( \frac{1}{3} y_1 + \frac{2}{3} y_2 \right) \sin \phi -$$

$$\gamma (b_2 - b_1) L_j \left( \frac{1}{12} y_1 + \frac{5}{12} y_2 \right) \sin \phi$$

$$= \rho Q^2 \left( \frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = \rho g Fr_1^2 D_1 A_1 \cos \phi \left( \frac{A_1}{A_2} - 1 \right)$$

$$= \rho g Fr_1^2 y_1^2 b_1 \cos \phi \left( \frac{b_1 y_1}{b_2 y_2} - 1 \right) \quad (9)$$

با ساده سازی معادله ۹، معادله نهایی نسبت عمق ثانویه با فرض سهموی بودن نیمرخ جهش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Y^3 K_1 + Y^2 K_2 + Y K_3 - 2 Fr_1^2 = 0 \quad (10)$$

$$K_1 = \left( \frac{16 L_j \tan \theta}{15 b_1 \cos \phi} B - B^2 \right)$$

$$K_2 = \left( \frac{8 L_j \tan \theta}{15 b_1 \cos \phi} B - \frac{L_j \tan \phi}{y_1} \left( \frac{5}{6} B^2 + \frac{1}{2} B \right) \right)$$

$$K_3 = \left( B + \frac{2 L_j \tan \theta}{5 b_1 \cos \phi} B - \frac{L_j \tan \phi}{y_1} \left( \frac{1}{6} B^2 + \frac{1}{2} B \right) + 2 B Fr_1^2 \right)$$

عدد، Fr، طول جهش،  $L_j$ ،  $Y = y_2 / y_1$ ،  $B = b_2 / b_1$  فرود،  $D = A/T$ : عمق هیدرولیکی،  $\theta$ : زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه،  $\phi$ : زاویه شیب کف و نمایه‌های ۱ و ۲ معرف مقطع اولیه و ثانویه جهش است.

برای محاسبه افت انرژی در طول جهش می‌توان از معادله انرژی مخصوص استفاده کرد. با در نظر گرفتن شکل ۱ و نوشتن رابطه انرژی مخصوص برای مقاطع قبل و بعد از جهش، خواهیم داشت:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (11)$$

$$F_{B_x} = \left[ 2\gamma \int_0^{L_j} \int_0^{(b_2-b_1)x/2L_j} \int_0^y dx dz dy + \gamma b_1 \int_0^{L_j} \int_0^y dy dx \right] \sin \phi \quad (6)$$

$$F_{B_x} = \gamma L_j b_1 \left( \frac{1}{3} y_1 + \frac{2}{3} y_2 \right) \sin \phi \quad (7)$$

$$+ \gamma (b_2 - b_1) L_j \left( \frac{1}{12} y_1 + \frac{5}{12} y_2 \right) \sin \phi$$

مطابق شکل ۲ نیروی فشاری وارد بر دیواره‌های حوضچه آرامش به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

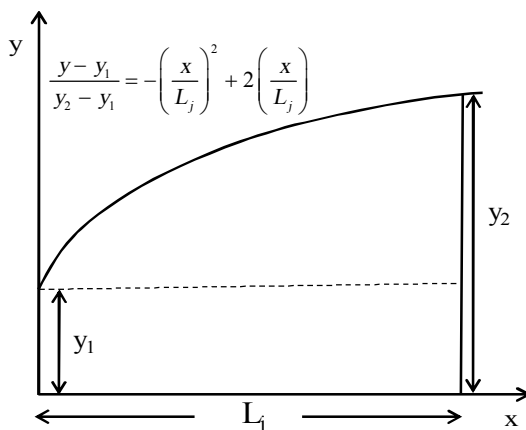
$$F_{ps_x} = 2 F_{ps} \sin \theta$$

$$F_{ps} = \gamma \int_0^{L_{js}} \frac{y^2}{2} dx = \frac{\gamma}{2}$$

$$\int_0^{L_{js}} \left[ \left[ 2 \left( \frac{x}{L_{js}} \right) - \left( \frac{x}{L_{js}} \right)^2 \right] (y_2 - y_1) + y_1 \right]^2 dx$$

$$F_{ps} = \gamma L_{js} \left( \frac{1}{2} y_1^2 + \frac{4}{15} (y_2 - y_1)^2 + \frac{2}{3} y_1 (y_2 - y_1) \right)$$

$$= \gamma L_{js} \left( \frac{1}{10} y_1^2 + \frac{4}{15} y_2^2 + \frac{2}{15} y_1 y_2 \right) \quad (8)$$



شکل ۲- نیمرخ جهش با فرض سهموی بودن تغییرات عمق اولیه تا ثانویه

که در آن  $L_{js} = L_j / \cos \theta$  می‌باشد.

با قرار دادن معادلات ۲، ۳، ۷، ۸ و ۱۱ در معادله ۱ داریم:

یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌هایی از جنس شیشه به عرض و ارتفاع ۱ متر و طول ۶ متر و یک مخزن با سرریز مثلثی واسنجی شده در پایین دست می‌باشد. طرح کلی مدل آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل حوضچه آرامش دارای طولی به اندازه ۱/۴ متر بوده که بلافاصله بعد از دریچه کشویی مستقر گردید. این مدل به گونه‌ای طراحی شد که امکان ایجاد شیب‌ها و زوایای واگرایی متفاوت وجود داشته باشد.

مخزن تأمین بار آبی بالادست امکان ایجاد جریان فوق بحرانی تا عدد فرود ۹ را در داخل حوضچه فراهم می‌نمود. جهت اندازه‌گیری عمق آب در طول جهش، پیزومترهایی به فواصل ۵ سانتی‌متر در طول خط مرکزی جریان و بر کف حوضچه نصب شدند. برای ایجاد عمق پایاب لازم، جهت تشکیل جهش در داخل حوضچه و تثبیت آن، دریچه پروانه‌ای در انتهای قسمت افقی حوضچه نصب گردید.

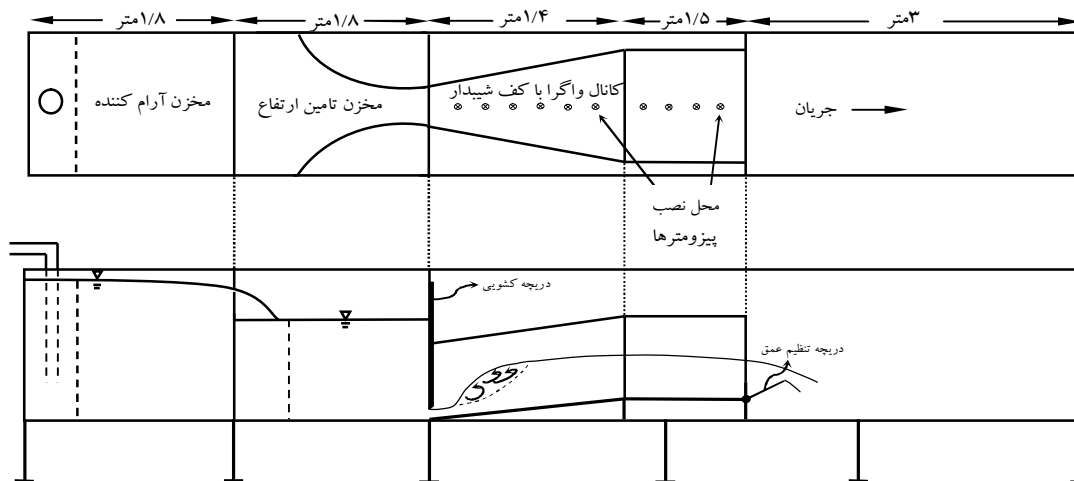
$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{(y_1 + \frac{V_1^2}{2g}) - (y_2 + \frac{V_2^2}{2g})}{(y_1 + \frac{V_1^2}{2g})} \quad (12)$$

که در معادلات فوق  $\Delta E$  افت انرژی و  $\frac{\Delta E}{E_1}$  افت نسبی انرژی است. با توجه به اثر مطلوب تغییر شیب کف معکوس و زاویه واگرایی دیواره‌ها بر عملکرد جهش هیدرولیکی، در مقاله حاضر اثر توأم شیب کف معکوس و واگرایی دیواره‌ها بر پارامترهای مهم جهش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی به صورت تئوری-آزمایشگاهی بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

#### تجهیزات آزمایشگاهی

برای مطالعه آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا بر روی شیب معکوس، مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. این مدل شامل یک مخزن آرام کننده به همراه سرریز مثلثی لبه تیز برای اندازه‌گیری دبی و مخزن تأمین هد در بالادست، دریچه کشویی لبه تیز،



شکل ۳- طرح کلی کانال آزمایشگاهی

تصویربرداری از پیزومترها) در طول جهش و همچنین طول جهش اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه معیارهای متفاوتی برای تعریف طول جهش وجود دارد، در این تحقیق طول جهش از شروع، تا جایی که غلظاب‌ها و نوسان‌های سطح آب در آن حداقل بود و تغییرات عمق ناچیز می‌شد، در نظر گرفته شد.

#### نحوه انجام آزمایش‌ها

برای آزمایش‌ها، بعد از تنظیم شیب کف و زاویه واگرایی مورد نظر، ابتدا دبی ورودی برای عدد فرود مورد نظر برقرار و سپس با تنظیم دریچه پروانه‌ای انتهای حوضچه، موقعیت جهش در فاصله‌ای کمی بعد از دریچه (تقریباً ۱۰ سانتی‌متر) تثبیت می‌گردید. پس از پایدار شدن جهش، عمق جریان (به کمک

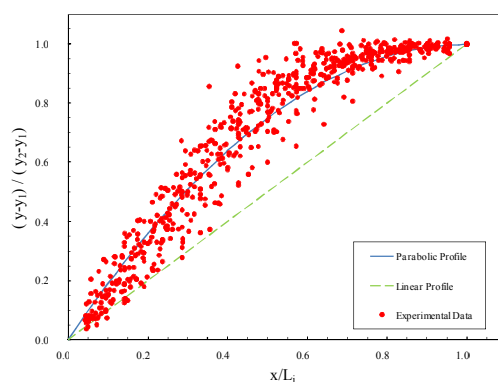
## نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر توأم زاویه واگرایی و شیب معکوس کف بر خصوصیات جهش هیدرولیکی، مجموعاً ۱۵۸ آزمایش در دامنه اعداد فرود اولیه ۹-۲/۵ و برای زوایای واگرایی ( $\theta$ )، صفر، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درجه و در ۵ شیب کف معکوس (S)، صفر، ۲/۳، ۴/۱، ۵/۶ و ۸ درصد انجام شد. دامنه قرائت‌های صورت گرفته برای مجموعه آزمایش‌های اجرا شده در این پژوهش، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- دامنه قرائت‌های صورت گرفته برای پارامترهای اندازه‌گیری شده

پارامترهای قرائت شده	واحد	حداقل	حداکثر
$y_1$	cm	۱/۸	۲/۲
$y_2$	cm	۴/۴	۲۱
$Fr_1$	بدون بعد	۲/۶۵	۸/۷۵
$L_j$	cm	۱۱	۱۲۱
Q	Lit/s	۵/۲۱	۲۱/۰۵
S	بدون بعد	صفر	۰/۰۸
$\theta$	درجه	صفر	۱۰

آن به عنوان عمق جریان در نظر گرفته شد) در کنار منحنی تئوری یاد شده در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین به منظور ارزیابی سایر منحنی‌های تئوری پیشنهادی توسط سایر محققین، نیمرخ خطی جهش که توسط لاوسون و فیلیپس (۱۹۸۳)، برای استخراج روابط تئوری جهش واگرا در نظر گرفته شده نیز در کنار منحنی تئوری پیشنهادی در این پژوهش و داده‌های آزمایشگاهی آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، بین داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نیمرخ‌های جهش و نیمرخ تئوری مربوطه، مطابقت خوبی دیده می‌شود، به گونه‌ای که صحت فرضیه به کار رفته در مورد منحنی نیمرخ جهش را تأیید می‌کند.



شکل ۴- مقایسه نیمرخ‌های تئوری و نتایج آزمایشگاهی جهش واگرا

برای مقایسه و ارزیابی نتایج تئوری و داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی مقادیر تئوری مربوط به پارامترهای فوق از روابط ۹ و ۱۱ محاسبه و تغییرات نسبت مقادیر آزمایشگاهی به تئوری در مقابل عدد فرود اولیه مربوط به کلیه داده‌های آزمایشگاهی و تئوری و نیز جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه و در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شد. در این شکل‌ها S شیب کف معکوس،  $\theta$  زاویه واگرایی بر حسب درجه و  $Fr_1$  عدد فرود در مقطع اولیه جهش می‌باشد.

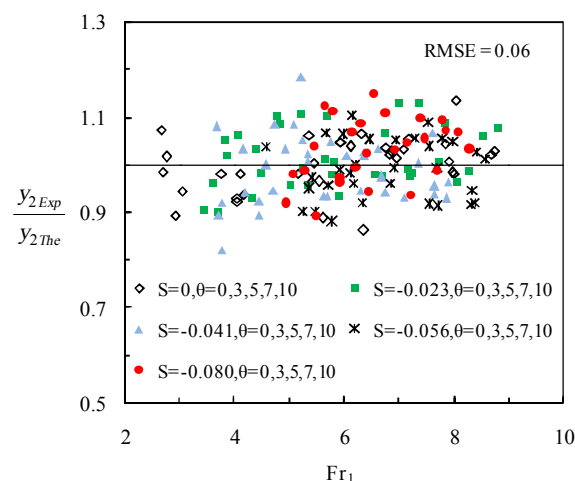
#### ارزیابی فرضیه نیمرخ تئوری جهش و رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه

از آنجایی که در این پژوهش برای محاسبه نیروی جانبی در طول جهش از معادله سهموی به عنوان معادله نیمرخ جهش استفاده شده است، بنابراین برای ارزیابی صحت این فرضیه، برای وضعیت‌های مختلف از زاویه واگرایی و شیب کف معکوس، منحنی تئوری نیمرخ جهش و داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. برای مقایسه کلی نیمرخ‌های جهش با منحنی تئوری پیشنهادی، کلیه داده‌های آزمایشگاهی نیمرخ‌های جهش (در قرائت نیمرخ سطح آب، حداقل و حداکثر عمق جریان در هر فاصله از طول جهش با استفاده از تصاویر گرفته شده از صفحه پیزومترها اندازه‌گیری شد و متوسط

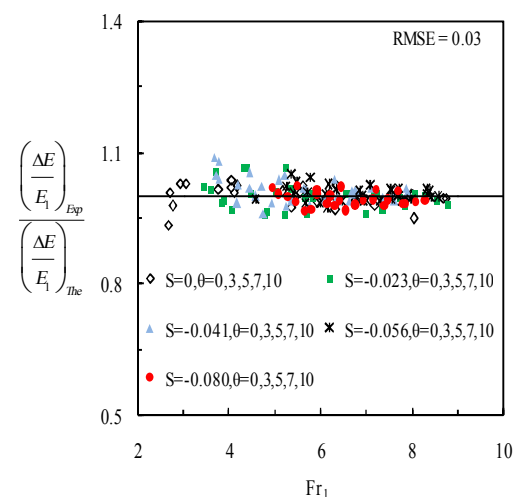
قرار دارند که نشان‌دهنده مطابقت خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر تئوری است. برای تشریح عملکرد جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس سه پارامتر نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی با توجه به تقسیم بندی‌های زیر ارزیابی می‌شود.

**تأثیر شیب کف معکوس بر روند تغییرات نسبت عمق ثانویه، طول جهش و افت نسبی انرژی**

در این تقسیم‌بندی، در هر زاویه واگرایی تغییرات پارامترهای اصلی جهش در مقابل عدد فرود اولیه ( $Fr_1$ ) با افزایش شیب کف معکوس بررسی شده است. بررسی نتایج حاصله نشان داد که روند این تغییرات در هر یک از زوایای واگرایی مشابه است. بدین معنی که در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش در مقایسه با جهش کلاسیک کاهش یافته و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، در شکل ۷ تغییرات نسبت عمق ثانویه، طول و افت نسبی انرژی در زاویه واگرایی ۵ درجه نشان داده شده است. از آنجا که با افزایش شیب کف نیروی ناشی از وزن آب به عنوان نیروی حجمی وارد بر توده جهش هیدرولیکی افزایش می‌یابد، بنابراین سهم عمق ثانویه برای ایجاد نیروی فشاری و هیدرودینامیک جهت برابری با نیروهای ناشی از عمق اولیه جهش کاهش خواهد یافت. لذا منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه در مقایسه با جهش هیدرولیکی کلاسیک کاهش یابد. از سوی دیگر با کاهش عمق ثانویه مورد نیاز برای تشکیل و تثبیت جهش، طول نیمرخ جهش برای رسیدن به آن و متعاقب آن طول جهش کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به این موضوع که در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیشتر است، لذا با کاهش عمق ثانویه، افت نسبی انرژی کاهش محسوسی می‌یابد.



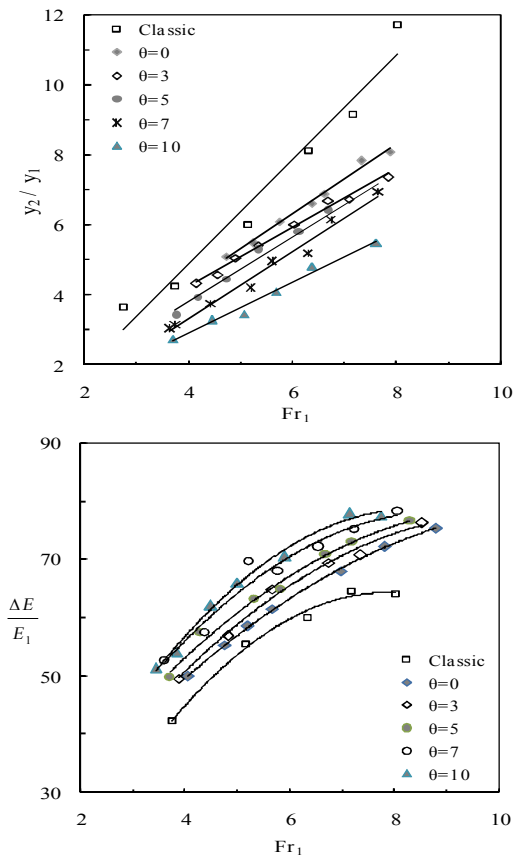
شکل ۵- مقایسه نتایج تئوری و نتایج آزمایشگاهی نسبت عمق ثانویه



شکل ۶- مقایسه نتایج تئوری و آزمایشگاهی افت نسبی انرژی

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ نسبت داده‌های آزمایشگاهی به مقادیر تئوری نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در محدوده ۰/۹-۱/۱ قرار دارند که نشان‌دهنده مطابقت خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر تئوری می‌باشد. برای تشریح عملکرد جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس سه پارامتر نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی را با توجه به تقسیم بندی‌های زیر مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ نسبت داده‌های آزمایشگاهی به مقادیر تئوری نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در محدوده ۰/۹-۱/۱

در مقابل اعداد فرود اولیه در شکل ۸ نشان داده شده است.

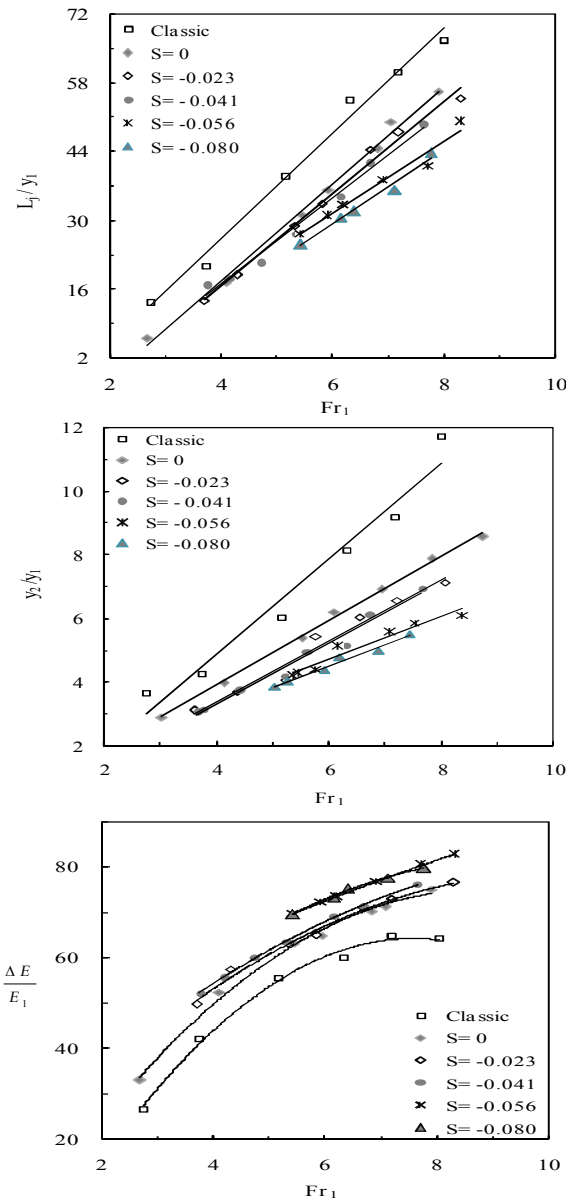


شکل ۸- تغییرات نسبت عمق ثانویه، طول و افت نسبی جهش با افزایش زاویه واگرایی در شیب معکوس ۴/۱ درصد

از آنجایی که با افزایش زاویه واگرایی، عرض مقطع جریان در عمق ثانویه افزایش یافته لذا عمق جریان برای تأمین نیروهای هیدرواستاتیک و دینامیک لازم جهت برابری با نیروهای مربوط به عمق اولیه جهش کاهش می‌یابد. لذا منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش زاویه واگرایی، عمق جریان و به تبع آن طول نسبی جهش کاهش یافته و افت نسبی انرژی افزایش یابد.

### نتیجه گیری

در این تحقیق، تأثیر توأم زاویه واگرایی دیواره‌ها و شیب کف معکوس بر عملکرد و خصوصیات جهش هیدرولیکی، به طور تئوری و عملی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی مشخصات جهش هیدرولیکی شامل: نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی، طول نسبی جهش



شکل ۷- تغییرات نسبت طول جهش، عمق ثانویه و افت نسبی انرژی با افزایش شیب کف معکوس در زاویه واگرایی ۵ درجه

تأثیر زاویه واگرایی بر روند تغییرات نسبت عمق ثانویه، طول و افت نسبی انرژی جهش هیدرولیکی

در این تقسیم بندی، تأثیر زاویه واگرایی بر مشخصات جهش در هر شیب کف بررسی شد. نتایج این تقسیم بندی نشان می‌دهد که با افزایش زاویه واگرایی در هر شیب نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش، نسبت به جهش کلاسیک، کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. نمودارهای مربوط به روند تغییرات پارامترهای فوق



کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان.

(۹) ۲: ۱۷-۳۰.

- 2- Arabhabhrama A. and Abela A. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *J. Hydraul. Eng.* 97(1): 31-42.
- 3- Abrishami J. and Saneie M. 1994. Hydraulic Jump in adverse basin slopes. *International journal of water resource engineering.* 2(1): 51-63.
- 4- Beirami M.K. and Chamani M.R. 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio *J. Hydraul. Eng.* 132(10):1061-1068
- 5- Beirami M.K. and Chamani M.R. 2010. Hydraulic jumps in sloping channels: roller length and energy loss. *Can. J. Civ. Eng.* 37(9): 535-543
- 6- Lawson J. D. and Phillips B. C. 1983. Circular hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 109 (4): 505-518.
- 7- Khlifa A. M. and McCorquodale A. M. 1979. Radial hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 105(9): 1065-1078.
- 8- Kouluseus H.J. and Ahmad D. 1961. Circular hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 95(1): 409-422.
- 9- McCorquodale J. and Mohamed A.M.S. 1994. Hydraulic jump on adverse slopes. *J. Hydraulic. Res.* 31(1): 119-130.
- 10- Omid M.H. Esmacili Varaki M. and Narayanan R. 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *J. Hydraulic. Res.* (4): 512-518.
- 11- Peruginelli A. and Pagliara S. 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 126(11): 847-851.
- 12- Peterka A.J. 1983. Hydraulic design of stilling basin and energy dissipaters. *Engineering monograph.* No. 25, U. S. bureau of reclamation.

و نیمرخ طولی جهش و مقایسه نتایج مربوط به زوایای واگرایی و شیب‌های معکوس مختلف، مشخص شد که حوضچه‌های آرامش واگرا با شیب کف معکوس علاوه بر مزیت عدم نیاز به استفاده از سازه تبدیل در ابتدا و انتها، از نظر مشخصات و عملکرد جهش نیز به دلیل کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی، وضع مطلوب‌تری نسبت به جهش در حوضچه‌های کلاسیک داشته و می‌توانند گزینه خوبی برای جایگزینی حوضچه‌های معمولی باشند. علاوه بر نتیجه گیری کلی فوق، نتایج زیر از پژوهش حاضر به دست آمده است:

۱. مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی نیمرخ‌های طولی جهش و منحنی‌های تئوری دیده شد که صحت فرضیه پیشنهادی در استفاده از معادله سهمی برای نیمرخ تئوری جهش را تایید می‌کند.
۲. در کلیه آزمایش‌ها بین مقادیر تئوری و نتایج آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی، مطابقت خوبی وجود دارد.
۳. در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که بطور متوسط افزایش شیب کف معکوس از صفر به ۸ درصد باعث می‌گردد که در مقایسه با جهش کلاسیک، نسبت عمق ثانویه ۴۷ درصد و طول نسبی جهش ۳۵ درصد کاهش و افت نسبی انرژی ۲۰ درصد افزایش یابد.
۴. در شیب‌های کف معکوس، افزایش زاویه واگرایی از صفر به ۱۰ درجه، به طور متوسط منجر به کاهش در نسبت عمق ثانویه به میزان ۵۱ درصد، کاهش طول نسبی جهش به مقدار ۳۸ و افزایش افت نسبی انرژی به میزان ۲۳ در مقایسه با مشخصات جهش کلاسیک می‌شود.

#### منابع

۱- امید م.ح. و اسمعیلی‌ورکی م. ۱۳۸۴. مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای شکل. *مجله علوم و فنون*

