مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع ذوزنقه‌ای شکل

محمد حسین امید و مهدی اسمعیلی ورکی[۱]

چکیده

از جمله روش‌های کاهش هزینه احداث حوضچه‌های آرامش از نوع جهش هیدرولیکی، تغییر شکل مقطع و پلان حوضچه در جهت هم‌آهنگی با مقاطع بالادست و پایین‌دست، بدون استفاده از سازه‌های تبدیل می‌باشد. از طرفی، هرگونه تغییر در هندسه حوضچه، شرایط ایجاد جهش و خصوصیات هیدرولیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش حاضر، تأثیر تغییرات توام شیب جانبی و واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش بر وضعیت و مشخصات جهش هیدرولیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، با تعمیم مبانی تئوری جهش هیدرولیکی برای مقاطع ذوزنقه‌ای، روابط تئوری برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی استخراج و با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک مدل حوضچه آرامش، که برای این منظور طراحی و ساخته شده بود، طول و سایر مشخصات جهش مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای ۳ شیب‌جانبی مختلف (۱/۵:۱، ۱:۱ و ۰/۵:۱) و ۴ زاویه واگرایی (۳, ۵, ۷ و ۹ درجه)، به اضافه جهش مستقیم در مقطع مستطیلی، در دامنه وسیعی از اعداد فرود (از ۳ تا ۹) صورت گرفت.

نتایج به‌دست آمده از مقایسه‌های صورت گرفته بر روی پارامترهای مهم جهش نشان می‌دهد که کاهش شیب جانبی در هر زاویه واگرایی موجب کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش طول جهش و افت انرژی در مقایسه با مقطع مستطیلی در همان زاویه واگرایی می‌شود. هم‌چنین افزایش زاویه واگرایی موجب کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول جهش و افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای مستقیم خواهد شد. میزان این تغییرات، با افزایش زاویه واگرایی، در مقطع مستطیلی افزایش و در مقاطع ذوزنقه‌ای برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی افزایش و برای طول جهش کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ***جهش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، جهش هیدرولیکی واگرا، حوضچه آرامش ذوزنقه‌ای***

مقدمه

معمولاً در انتهای سازه‌هایی مانند سرریز سدها، تندابها، آبشارها و دریچه‌ها، به‌دلیل سرعت زیاد جریان، نیاز به سازه‌ای برای استهلاک انرژی جریان و کاهش سرعت آن به منظور جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین‌دست می‌باشد. یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی، حوضچه‌های آرامش از نوع جهش هیدرولیکی می‌باشند، که در آنها با شکل‌گیری جهش هیدرولیکی و عبور جریان از رژیم فوق

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی دکتری آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]

بحرانی به رژیم زیربحرانی، انرژی جریان مستهلک می‌شود. به دلیل گستردگی کاربرد حوضچه‌های آرامش با مقطع مستطیلی، تحقیقات زیادی درمورد این گونه مقاطع صورت گرفته ولی در مورد انواع دیگر حوضچه‌ها که استفاده از آنها در بعضی از مواقع الزامی و یا مقرون به صرفه است، اطلاعات کمی موجود می‌باشد. حوضچه‌های آرامش واگرا با مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای، دو نوع از حوضچه‌های آرامش می‌باشند که به دلیل عدم نیاز به استفاده از سازه تبدیل در ابتدا و انتهای آنها، در صورتی که از نظر نسبت عمق ثانویه، طول جهش و افت نسبی انرژی، قابل رقابت با حوضچه‌های کلاسیک (معمولی) باشند، جایگزین مناسبی برای این گونه حوضچه‌ها خواهند بود.

در مورد حوضچه‌های آرامش مستقیم با مقطع ذوزنقه‌ای و نیز حوضچه‌های آرامش واگرا با مقطع مستطیلی، تحقیقاتی صورت گرفته و نکات مورد نیاز در طراحی آنها ارائه گردیده است که به برخی از آنها در ادامه اشاره می‌شود.

پوزی و هسینگ (۹)، تأثیر شیب جانبی را بر طول جهش در حوضچه ذوزنقه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی که بر روی یک مدل آزمایشگاهی با شیب‌های جانبی ۰/۵:۱ تا ۲:۱ صورت گرفت، مشخص شد که کاهش شیب جانبی باعث افزایش طول جهش نسبت به جهش کلاسیک می‌شود. دیکسین (۳)، رابطه‌ای تئوری برای نسبت عمق ثانویه در مقطع ذوزنقه‌ای ارائه کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش شیب جانبی، نسبت عمق ثانویه در مقطع ذوزنقه‌ای در مقایسه با مقطع مستطیلی کاهش می‌یابد. ماسی (۷)، رابطه تئوری برای نسبت عمق ثانویه در مقطع ذوزنقه‌ای ارائه کرد. او هم‌چنین نتایج کار خود را به صورت نموداری که با داشتن مقادیر دبی، عمق اولیه، عرض کف و شیب جانبی، می‌توان نسبت عمق ثانویه را برآورد کرد، ارائه نمود. وانوسچک و هگر (۱۰)، ضمن ارائه رابطه تئوری مبتنی بر اصول پیوستگی و مومنتوم برای نسبت عمق ثانویه در مقاطع ذوزنقه‌ای، خصوصیات جهش هیدرولیکی در این گونه مقاطع را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. از مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این تحقیق که برای کانال ذوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ صورت گرفت، می‌توان به کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش طول جهش در مقایسه با جهش کلاسیک، نامتقارن بودن پیشانی جهش و وجود گردابه‌های طولی در امتداد دیواره‌های جانبی حوضچه آرامش اشاره کرد. امید (۱)، خصوصیات و عملکرد جهش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش ذوزنقه‌ای را به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، روابط تئوری برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه شده و با استفاد از نتایج حاصل از آزمایش‌هایی که بر روی یک مدل آزمایشگاهی با مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی مختلف و اعداد فرود ۲ تا ۹ انجام شد، پارامترهای مهم جهش، از جمله طول آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش شیب جانبی باعث افزایش افت نسبی انرژی، کاهش نسبت عمق ثانویه و افزایش طول نسبی جهش در مقایسه با جهش کلاسیک می‌شود.

کلوسیوس و احمد (۵)، خصوصیات جهش هیدرولیکی دایره‌ای را بررسی کردند. در این پژوهش با فرض تغییرات خطی بین عمق اولیه تا ثانویه جهش و به کارگیری اصول پیوستگی، انرژی و مومنتوم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه گردید. هم‌چنین، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل آزمایشگاهی صورت گرفت که ضمن تأیید فرضیات انجام گرفته، این نتیجه به دست آمد که نسبت عمق ثانویه و طول جهش در این حالت در مقایسه با جهش در کانال مستطیلی کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد. اربهابهیراما و ابلا (۲)، خصوصیات جهش هیدرولیکی در کانال مستطیلی واگرا را بررسی کردند. در این تحقیق با فرض شکل ربع بیضی برای نیم‌رخ جهش و به کارگیری اصول پیوستگی، انرژی و مومنتوم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی ارائه گردید. هم‌چنین با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی که در یک کانال آزمایشگاهی واگرا با مقطع مستطیلی و با زوایای واگرایی ۰ تا ۱۳ درجه انجام گرفت،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]

صحت روابط تئوری ارزیابی شد. نتایج هم‌چنین نشـان داد کـه، واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویـه، افـزایش افـت نسـبی انرژی و کاهش طـول جهـش، در مقایسـه بـا جهـش کلاسـیک می‌شود. خلیفه و کروکودل (۴)، خصوصیات جهش هیدرولیکی شعاعی را بررسی کردنـد. در ایـن تحقیـق بـا شـعاعی در نظـر گرفتن خطوط جریان و نسبت دادن یک معادله درجه دوم برای نیم‌رخ سطح آب و با به کـارگیری اصـول پیوسـتگی، انـرژی و مومنتوم، روابطی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در کانال مستطیلی واگرا ارائه گردید. هم‌چنین بـا اسـتفاده از نتـایج حاصل از آزمایش‌هـایی کـه بـر روی یـک کانـال آزمایشـگاهی مستطیلی واگـرا انجـام گرفـت، مشـخص گردیـد کـه واگرایـی دیواره‌ها موجب کاهش طـول جهـش تـا ۷۰٪ و افـزایش افـت انرژی تا ۱۵٪ نسبت به جهـش کلاسـیک شـده و نسـبت عمـق ثانویه نیز برای اعداد فرود بزرگ‌تر از ۳ کاهش می‌یابد.

تأثیر تـوأم شـیب جـانبی و واگرایـی طـولی دیـواره‌هـا بـر خصوصـیات جهـش هیـدرولیکی، تـاکنون مـورد مطالعـه قـرار نگرفته است. بنابراین، هدف از این پـژوهش بررسـی شـرایط و خصوصـیات جهـش هیـدرولیکی واگـرا در مقـاطع ذوزنقـه‌ای که تلفیقی از دو حالت بررسـی شـده در تحقیقـات فـوق بـود، می‌باشد.

تئوری جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع ذوزنقه‌ای

بـرای تحلیـل و تعیـین روابـط مربـوط بـه جهـش هیـدرولیکی کلاسـیک در مقـاطع مختلـف، از اصـول پیوسـتگی، انـرژی و مومنتوم، با بکاربردن فرضیات ساده شونده مانند نـاچیز در نظـر گرفتن نیروهای وزن، اصطکاک و مقاومت ناشی از هوا، استفاده می‌شود. آنچه که روابط مربوط به جهش هیدرولیکی در مقـاطع واگرا را با جهش کلاسیک متفاوت و پیچیده‌تر می‌سازد، وجـود نیروهای جانبی در اثر واگرایی دیواره‌ها که خود تابعی از طـول جهش است، می‌باشد. بنابراین، شناخت نیم‌رخ طولی سـطح آب در جهش، برای محاسبه این جزء نیرو ضروری می‌باشد. در این پژوهش از فرضیات زیر به منظور استخراج رابطه نسـبت عمـق ثانویه برای جهش هیدرولیکی در کانال ذوزنقه‌ای واگرا اسـتفاده شده است.

- سیال غیرقابل تراکم می‌باشد.
- نیروی وزن، مقاومت ناشی از هوا و و افت اصطکاکی ناشی از تنش برشی کف ناچیز است.
- خطوط جریان شعاعی می‌باشد.
- نیم‌رخ سطح آب در طول جهش به صورت ربعی از بیضـی می‌باشد.

با توجه به شکل ۱، نیروهـای مـؤثر بـر حجـم کنتـرل انتخـابی، عبارت‌اند از F_1، F_2، F_{rs} و F_{ls}:

این نیروها را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$F_1 = \gamma \bar{y}_1 A_1 = \frac{1}{2}\gamma\left(b_1 y_1^2 + \frac{2}{3} z y_1^3\right) \qquad [1]$$

$$F_2 = \gamma \bar{y}_2 A_2 = \frac{1}{2}\gamma\left(b_2 y_2^2 + \frac{2}{3} z y_2^3\right) \qquad [2]$$

$$F_{rs} = F_{ls} = \frac{\gamma \bar{y} A}{\sin(\cot g^{-1} z)} \qquad [3]$$

در معادلات فوق، F_1، نیـروی هیدرواسـتاتیک در بالادسـت جهش، F_2 نیـروی هیدرواسـتاتیک در پـایین‌دسـت جهـش، F_{rs} نیـروی هیدرواسـتاتیک جـانبی در سـمت راسـت، F_{ls} نیـروی هیدرواستاتیک جانبی در سمت چپ، y_1 عمق اولیه جهش، y_2 عمـق ثانویه، $\bar{y}$ فاصله مرکز ثقل تـوده جهـش تـا سـطح آب، A مسـاحت سطح زیر جهش، z شیب جانبی و γ وزن مخصوص سیال می‌باشد.

برای محاسبه مرکز ثقل توده جهش جهت محاسبه نیروهـای جانبی F_{rs} و F_{ls} با توجه به شکل ۲ و فرض بیضی بودن نـیم‌رخ جهش داریم:

$$\bar{y}A = \bar{y}_1 A_1 + \bar{y}_2 A_2 \qquad [4]$$

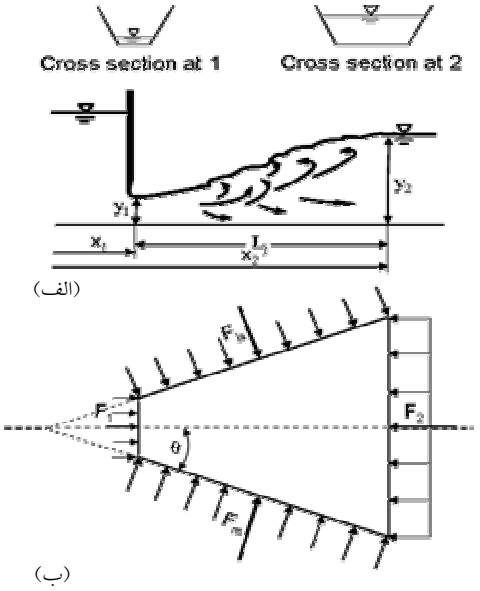
$$\bar{y}_1 A_1 = \frac{y_1^2}{2} \qquad [5]$$

$$\left(\frac{x - L_j}{L_j}\right)^2 + \left(\frac{y - y_1}{y_2 - y_1}\right)^2 = 1 \qquad [6]$$

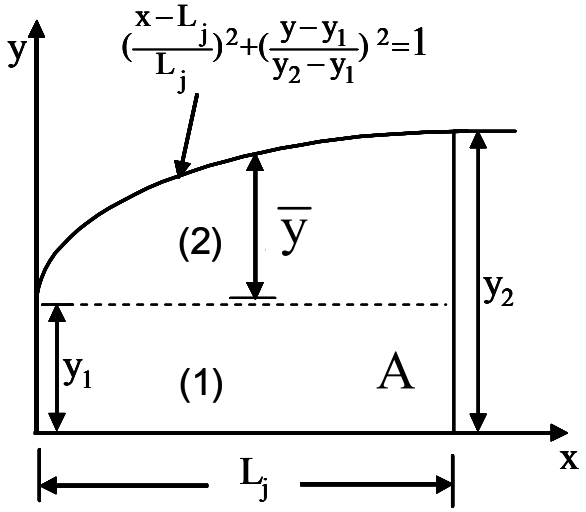
$$\bar{y}_2 A_2 = \frac{1}{2}\int_0^1 (f(x))^2 dx = \frac{1}{2}\int_0^1 (y_2 - y_1)^2 \left(L_j - \left(\frac{x - L_j}{L_j}\right)\right)^2 dx$$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]



شکل ۱. نمای کلی جهش هیدرولیکی در حوضچه ذوزنقه‌ای واگرا



شکل ۲. نیم رخ جهش با فرض بیضی بودن تغییرات عمق اولیه تا ثانویه

$$=\frac{1}{2}(y_2-y_1)^2\left[xL_j-\frac{(x-L_j)^3}{3L_j^2}\right]_0^{L}=\frac{(y_2-y_1)^2L_j}{3} \qquad [7]$$

در نهایت با قرار دادن معادلات ۵ و ۷ در معادله ۴ و انجام برخی عملیات جبری داریم :

$$\overline{yA}=L_{jS}\left[\frac{y_2^2}{3}+0/048y_1^2+0/118y_1y_2\right] \qquad [8]$$

در معادله۸ $L_{jS}=L_{j/\cos\theta}$ می‌باشد.

با جایگزین کردن معادله ۸ در معادله ۳ داریم :

$$F_{rs}=F_{ls}=\frac{\gamma L_{jS}\left[\frac{y_2^2}{3}+0/048\,y_1^2+0/118\,y_1y_2\right]}{\sin(\cot g^{-1}z)} \qquad [9]$$

مقدار خالص نیروی جانبی وارده بر حجم مشخص انتخابی برابر خواهد بود با:

$$F_{sx}(Net)=F_{ls}\sin\theta+F_{rs}\sin\theta=2F_s\sin\theta \qquad [10]$$

با جای‌گذاری معادله ۹ در معادله ۱۰ خواهیم داشت:

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]

$$F_{sx(Net)} = \frac{۲\gamma L_{js}\left[\frac{y_۲^۲}{۳} + ۰/۰۴۸\, y_۱^۲ + ۰/۱۱۸\, y_۱ y_۲\right]}{\sin(\cot g^{-۱} z)} \sin\theta \quad [۱۱]$$

در رابطه فوق θ زاویه محور جهش در امتداد xها و راستای خط مرکزی جریان که در شکل ۱(ب) نشان داده شده می‌باشد. اکنون با مشخص شدن اجزای نیروهای وارده بر حجم مشخص انتخابی و جای‌گذاری آنها در معادله اندازه حرکت، خواهیم داشت:

$$\sum F_x = F_{۱x} - F_{۲x} + F_{sx(Net)} = \rho Q\,(V_۲ - V_۱)_x \quad [۱۲]$$

با جایگزینی معادلات ۱، ۲ و ۱۱ درمعادله ۱۲ خواهیم داشت :

$$\left(b_۱ y_۱^۲ + \tfrac{۲}{۳} z y_۱^۳\right) + \frac{Q^۲}{g A_۱} + \frac{۴L_{jS}\left(\frac{y_۲^۲}{۳} + ۰/۰۴۸\, y_۱^۲ + ۰/۱۱۸\, y_۱ y_۲\right)\sin\theta}{\sin(\cot g^{-۱} z)} = \left(b_۲ y_۲^۲ + \tfrac{۲}{۳} z y_۲^۳\right) + \frac{Q^۲}{g A_۲} \quad [۱۳]$$

در نهایت با انجام برخی عملیات جبری، معادله عمومی برای نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی واگرا به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{y_۲}{y_۱} = \left[Fr_۱^۲ \frac{D_۱}{y_۱}\left(۱ - \frac{A_۱}{A_۲}\right) + K_۱\right]\frac{A_۱}{A_۲ K_۲} + \frac{۲L_{jS}\left(\frac{y_۲^۲}{۳} + ۰/۰۴۸\, y_۱^۲ + ۰/۱۱۸\, y_۱ y_۲\right)\sin\theta}{A_۲ K_۲ y_۱ \sin(\cot g^{-۱} z)} \quad [۱۴]$$

در معادله ۱۴ پارامترهای ساده شده عبارت‌اند از، $K = \frac{۱}{۳} + \frac{b}{۶b'}$، $b' = b + yz$ و $D = \frac{by + y^۲ z}{b + ۲yz}$.

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

$$E_L = E_۱ - E_۲ = \left(y_۱ + \frac{V_۱^۲}{۲g}\right) - \left(y_۲ + \frac{V_۲^۲}{۲g}\right) \quad [۱۵]$$

$$E_L = y_۱ - y_۲ + \frac{Fr_۱^۲ D_۱}{۲}\left[۱ - \left(\frac{A_۱}{A_۲}\right)^۲\right] \quad [۱۶]$$

$$R_L = \frac{y_۱ - y_۲ + \frac{Fr_۱^۲ D_۱}{۲}\left[۱ - \left(\frac{A_۱}{A_۲}\right)^۲\right]}{y_۱ + \frac{Fr_۱^۲ D_۱}{۲}} \quad [۱۷]$$

در معادلات فوق E_L افت انرژی و R_L افت نسبی انرژی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور بررسی شرایط و مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای، یک مدل فیزیکی طراحی و ساخته شد. این مدل شامل یک مخزن آرام کننده با سرریز مستطیلی لبه تیز و مخزن ایجاد ارتفاع در بالادست، دریچهٔ کشویی لبه تیز، یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌های شیشه‌ای به عرض ۰/۵ متر، عمق ۰/۶ متر و طول ۹ متر و یک مخزن اندازه‌گیری حجمی در پایین دست می‌باشد. طرح کلی دستگاه مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. بخشی از کانال مدل به طول ۳ متر که بلافاصله بعد از دریچه مخزن قرار داشت، به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که به عنوان حوضچه آرامش، امکان ایجاد هم‌زمان شیب‌های جانبی مختلف و واگرایی با زوایای متفاوت در دامنه وسیعی فراهم بود. هم‌چنین، با استفاده از مخزن بالادست و دریچه کشویی، ایجاد جریان‌های ورودی به حوضچه آرامش با عمق و سرعت‌های مختلف برای به دست آوردن اعداد فرود اولیه تا ۹ امکان‌پذیر بود.

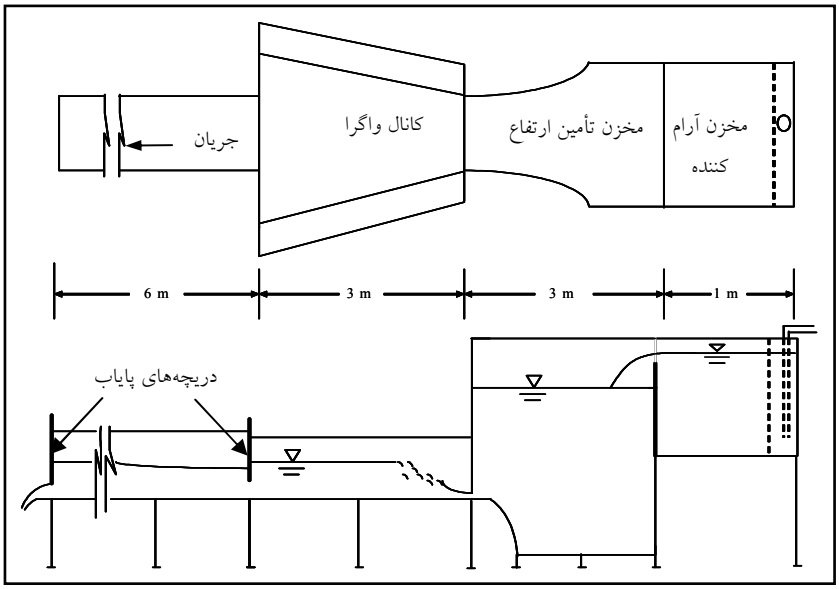
بر روی حوضچه آرامش و کانال انتهایی، یک سیستم ریلی نصب گردید تا امکان جابه‌جایی عمق سنج در طول آن به راحتی فراهم باشد. برای اندازه‌گیری عمق، از یک عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. برای ایجاد پایاب لازم، جهت تشکیل کامل جهش، از یک دریچهٔ کشویی در انتهای حوضچه و نیز یک دریچه کشویی در انتهای کانال پایین‌دست استفاده گردید. دبی جریان با دو روش حجمی، با استفاده از مخزن واسنجی شده در پایین‌دست و سرریز مستطیلی بالادست اندازه‌گیری شد.

انجام آزمایش‌ها

برای انجام هر آزمایش، بعد از تنظیم شیب جانبی و زاویه واگرایی موردنظر، ابتدا جریان ورودی به میزان مورد نظر برقرار

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]



شکل ۳. طرح کلی کانال آزمایشگاهی

و بعد از تثبیت ارتفاع آب در پشت سریز و دریچهٔ مخزن، موقعیت جهش توسط دریچه‌های کشویی انتهایی به گونه‌ای تثبیت می‌گردید که شروع جهش بلافاصله پس از دریچه، در ابتدای حوضچه واگرا باشد. در تمام آزمایش‌ها، کف حوضچه افقی بوده و از آستانه انتهایی و بلوک استفاده نگردید. پس از پایدار شدن جهش، عمق جریان در امتداد جهش و طول جهش اندازه‌گیری شد. با توجه به این‌که معیارهای متفاوتی برای تعریف طول جهش وجود دارد، در این تحقیق طول جهش از شروع، تا جایی‌که غلطاب‌ها و نوسان‌های سطح آب درآن حداقل بوده و تغییرات عمق ناچیز می‌گردید، در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر توام زاویه واگرایی و شیب جانبی بر خصوصیات جهش هیدرولیکی، در مجموع ۱۱۴ آزمایش برای مقطع مستطیلی و مقاطع ذوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی ۰/۵:۱، ۱:۱ و ۱/۵:۱ و زوایای واگرایی ۳، ۵، ۷ و ۹ درجه، در دامنه اعداد فرود ۳ تا ۹ انجام گرفت. دامنه قرائت‌های صورت گرفته برای مجموعه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، در جدول ۱ آورده شده است

از آنجایی که در این پژوهش به منظور محاسبه نیروی جانبی در طول جهش از معادله بیضی به عنوان معادله نیم‌رخ جهش استفاده شده است، بنابراین به منظور ارزیابی صحت این فرضیه، برای وضعیت‌های مختلف از شیب جانبی و زاویه واگرایی، منحنی تئوری نیم‌رخ جهش و داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. به منظور 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 قرائت و متوسط آن به عنوان عمق جریان در نظر گرفته شد) در کنار منحنی‌تئوری یادشده 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(۶). در این شکل W_k-Z_n-Fr_m معرف زاویه واگرایی، شیب جانبی و عدد فرود می‌باشد.

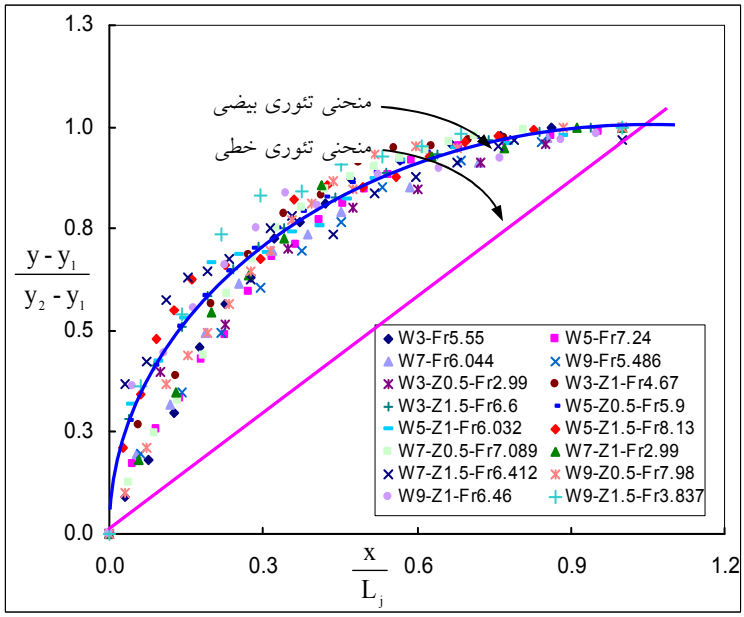
همان‌گونه که دیده می‌شود، بین داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نیم‌رخ‌های جهش و نیم‌رخ‌های تئوری مربوطه،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]

جدول ۱. دامنه قرائت‌های صورت گرفته برای پارامترهای اندازه‌گیری شده

پارامترهای قرائت شده	واحد	حداقل	حداکثر
y_1	cm	۱/۹	۲/۳
y_2	cm	۶/۹	۲۶/۱
Fr_1	بدون بعد	۲/۹۹	۹/۳۸
L_j	cm	۱۵	۱۷۰
Q	Lit/s	۱۵/۹	۴۴/۹
Z	بدون بعد	۰/۵:۱	۱/۵:۱
θ	درجه	۳	۹



شکل ۴. مقایسه نیم رخ‌های تئوری و نتایج آزمایشگاهی جهش واگرا

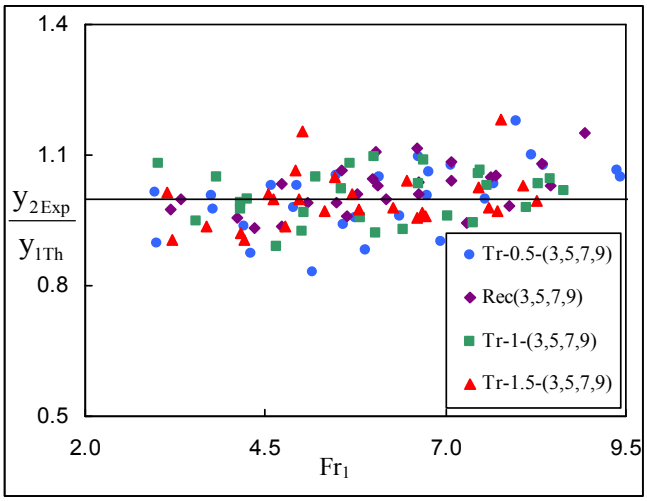
مطابقت خوبی دیده می‌شود، به گونه‌ای که صحت فرضیه به کار رفته در مورد منحنی نیم‌رخ جهش را تأیید می‌کند.

به منظور مقایسه و ارزیابی نتایج تئوری و آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی، مقادیر تئوری مربوط به پارامترهای فوق از روابط ۱۴ و ۱۷ محاسبه و تغییرات نسبت مقادیر آزمایشگاهی به تئوری آنها در مقابل اعداد فرود اولیه مربوطه برای کلیه داده‌های آزمایشگاهی و تئوری در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، $Tr-z-(\theta_i=۳,۵,۷,۹)$ معرف مقطع ذوزنقه‌ای با شیب جانبی z و زوایای واگرای ۳ تا ۹ درجه و $Rec\ (\theta_i=۳,۵,۷,۹)$ معرف مقطع مستطیلی با زوایای واگرایی ۳ تا ۹ درجه نشان داده شده است.

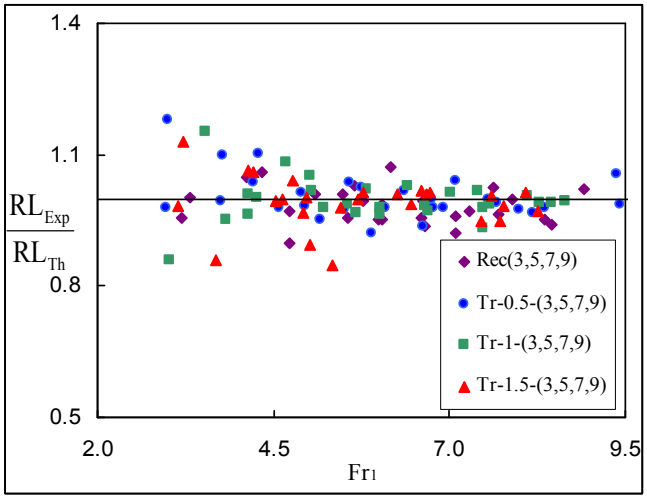
در شکل‌های ۵ و۶ دیده می‌شود که نسبت‌های عمق ثانویه و افت انرژی اندازه‌گیری شده به تئوری در محدوده ۰/۹ تا ۱/۱ قرار دارند،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]



شکل ۵. مقایسه دادهای تئوری و نتایج آزمایشگاهی نسبت عمق ثانویه



شکل ۶. مقایسه داده های تئوری و نتایج آزمایشگاهی افت نسبی انرژی

که نشان دهنده مطابقت خوب بین مقادیر تئوری و آزمایشگاهی می‌باشد.

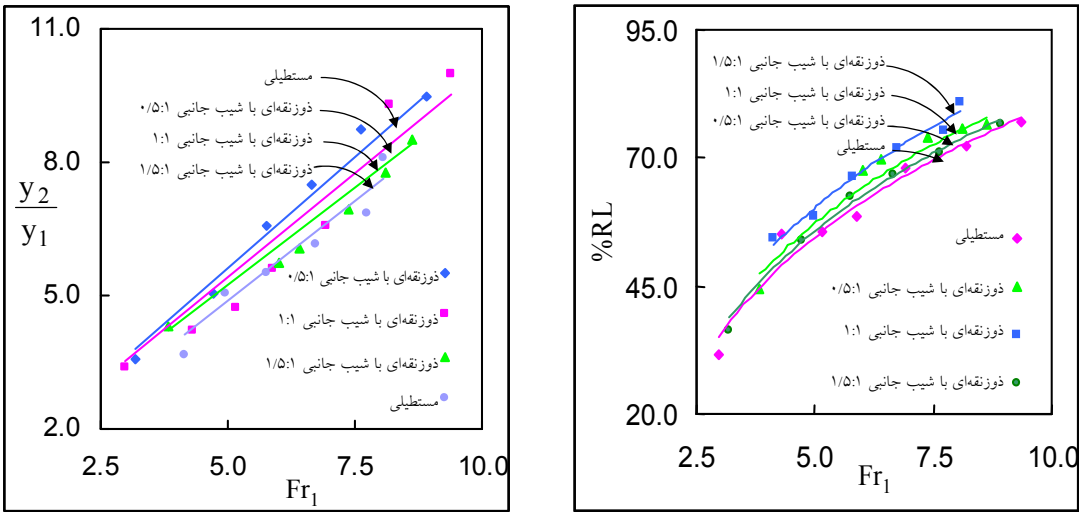
برای تشریح عملکرد جهش واگرا در مقاطع ذوزنقه‌ای و مقایسه آن با سایر انواع جهش، سه پارامتر مهم نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی را با توجه به تقسیم‌بندی زیر مورد ارزیابی قرارمی‌دهیم.

تأثیر تغییر شیب جانبی بر روند تغییرات نسبت عمق ثانویه، طول و افت نسبی انرژی جهش

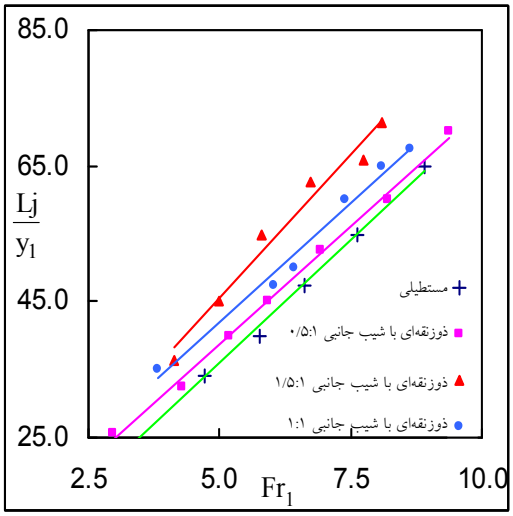
در این تقسیم‌بندی، در هر زاویه واگرایی تغییرات پارامترهای فوق در مقابل اعداد فرود اولیه (Fr_1) مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که روند تغییرات پارامترهای یاد شده در هر زاویه واگرایی مشابه می‌باشد. یعنی با کاهش شیب جانبی (افزایش z)، طول نسبی جهش افزایش، نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد. نمونه‌هایی از نمودارهای به دست آمده در این تقسیم‌بندی، در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده است. در شکل ۷ خطوط ممتد مربوط به معادلات تئوری و نقاط مربوط به دادهای آزمایشگاهی می‌باشند که با خطوط تئوری مطابقت خوبی دارند. در شکل ۸، تغییرات طول نسبی جهش در مقابل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]



شکل ۷ . تغییرات نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی جهش در زاویه واگرایی ۵ درجه



شکل ۸ . تغییرات طول نسبی جهش برای مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای در زاویه واگرایی ۵ درجه

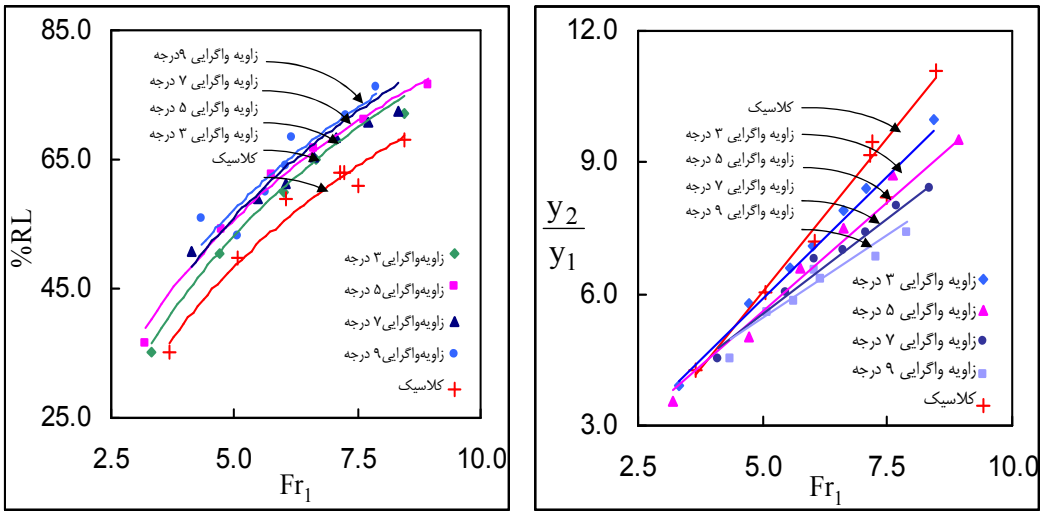
اعداد فرود اولیه برای مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی مختلف در زاویه واگرایی ۵ درجه نشان داده شده است. در این شکل، خطوط از برازش بهترین خط بر داده‌های آزمایشگاهی حاصل گردیده‌اند.

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

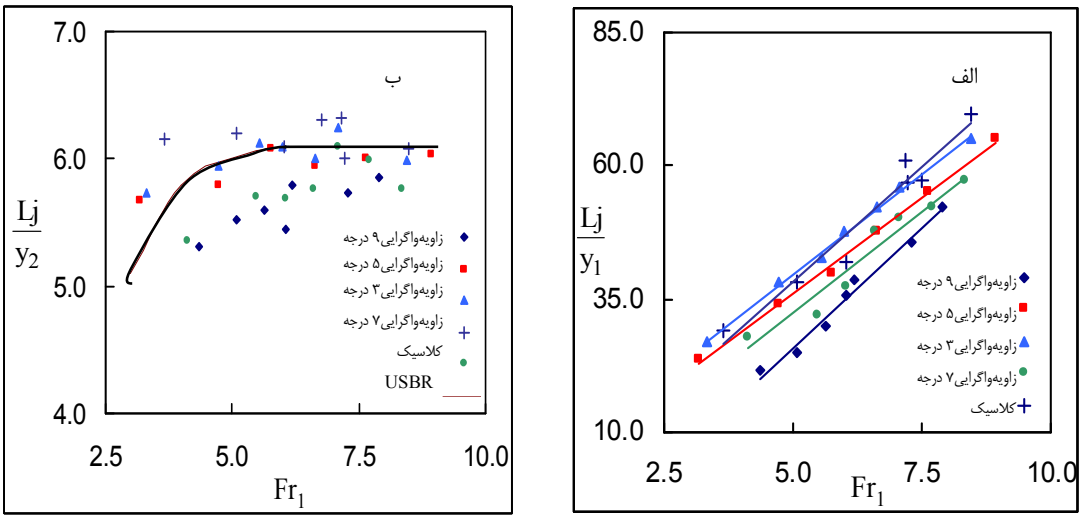
در این تقسیم‌بندی، تأثیر واگرایی مشخصات جهش در مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای را می‌توان این گونه بیان کرد که در مقطع مستطیلی، افزایش زاویه واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با جهش کلاسیک می‌گردد. نمودارهای مربوط به روند تغییرات پارامترهای فوق در مقابل اعداد فرود اولیه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۹، خطوط ممتد مربوط به معادلات تئوری و نقاط، مربوط به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند که مطابقت خوبی را با خطوط تئوری نشان می‌دهند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]



شکل ۹. تغییرات نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی جهش در مقطع مستطیلی با زوایای واگرایی مختلف



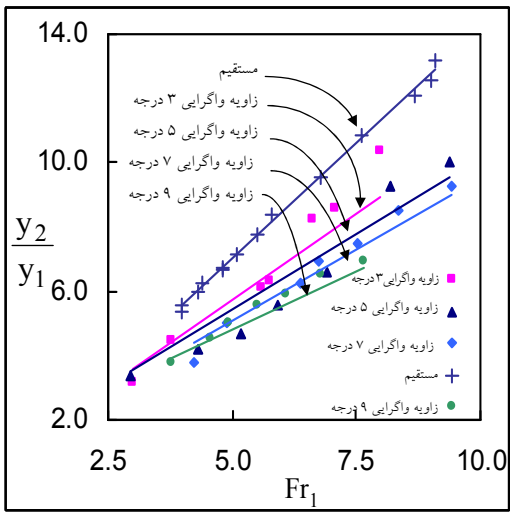
شکل ۱۰. تغییرات طول نسبی جهش برای مقاطع مستطیلی با زوایای واگرایی مختلف

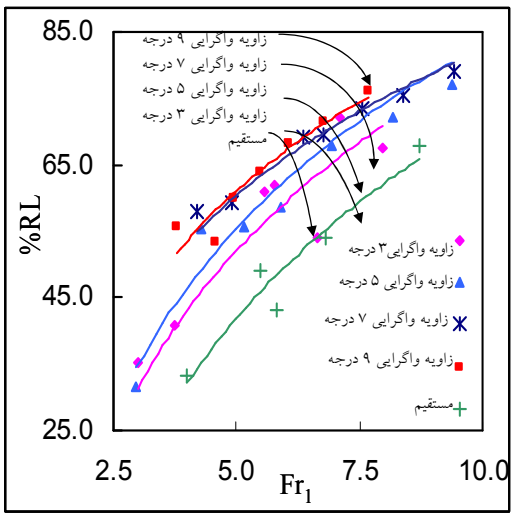
همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، میزان این تغییرات با افزایش زاویه واگرایی افزایش می‌یابد. خطوط ممتد در شکل ۱۰ (الف) از برازش بهترین خطوط بر داده‌های آزمایشگاهی حاصل گردیده‌اند. در شکل ۱۰ (ب)، نتایج آزمایشگاهی در کنار خط پیشنهادی USBR (۸) مربوط به $\frac{Lj}{y_2}$ نیز نشان داده شده است.

در مقاطع ذوزنقه‌ای، تأثیر زاویه واگرایی بر روند تغییرات نسبت عمق ثانویه، طول و افت نسبی انرژی در جهش برای هر شیب جانبی مشابه می‌باشد. در هر شیب جانبی، افزایش زاویه واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با مقطع ذوزنقه‌ای مستقیم می‌گردد. با توجه به مشاهدات صورت گرفته در آزمایش‌ها، می‌توان علت این عملکرد را این گونه بیان کرد که در مقاطع ذوزنقه‌ای، بخشی از سطح مقطع جریان به صورت دو

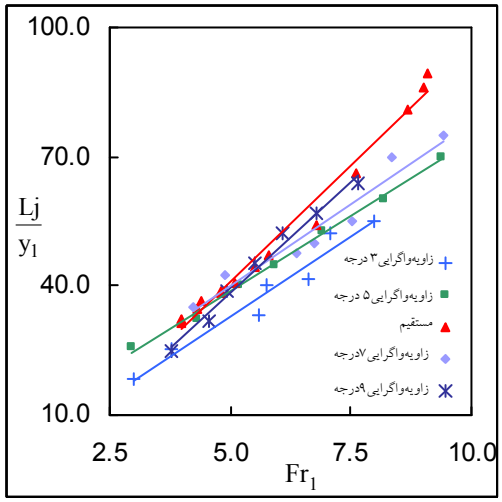
[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]





شکل ۱۱. تغییرات نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی جهش برای مقاطع ذوزنقه‌ای با شیب جانبی ۰/۵:۱



شکل ۱۲. تغییرات طول نسبی جهش برای مقاطع ذوزنقه‌ای با زوایای واگرایی مختلف در شیب جانبی ۰/۵:۱

مثلث قائم الزاویه در دو طرف مسیر جریان قرار گرفته و در مقابل جت ورودی آب قرار نمی‌گیرند. بنابراین همواره بخشی از سطح مقطع جریان که می‌بایست به عنوان نیرویی در مقابل فرار جت آب عمل نماید، در حاشیه قرار گرفته و در این رابطه نقشی ایفا نمی‌کند. از طرفی با افزایش زاویه واگرایی، بر شدت گردابه‌های طولی که در امتداد دیواره‌ها ایجاد می‌شوند افزوده شده و موجب انتقال تلاطم و ناپایداری در جهش و کمک به افزایش طول آن می‌گردد. نمودارهای مربوط به روند تغییرات پارامترهای یادشده برای شیب جانبی ۰/۵:۱ در مقابل اعداد فرود اولیه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ خطوط ممتد مربوط به معادلات تئوری و نقاط مربوط به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند که مطابقت خوبی را با خطوط تئوری نشان می‌دهند. خطوط ممتد در شکل ۱۲ از برازش بهترین خط بر داده‌های آزمایشگاهی حاصل شده‌اند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر تغییرات توام زاویه واگرایی و شیب‌های جانبی دیواره‌های حوضچه آرامش، بر عملکرد و خصوصیات جهش هیدرولیکی، به طور نظری و عملی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا معادلات تئوری مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در مقاطع ذوزنقه‌ای با بسط مبانی تئوری مربوط به جهش هیدرولیکی در مقاطع واگرا، استخراج گردیدند. سپس به منظور بررسی صحت فرضیات به کار گرفته شده در استخراج روابط تئوری و مطالعه عملی خصوصیات جهش هیدورلیکی واگرا در مقاطع مختلف، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل آزمایشگاهی که برای همین منظور طراحی و ساخته شده بود، انجام گردید. با بررسی مشخصات جهش هیدرولیکی شامل: نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی، طول نسبی و نیم‌رخ طولی جهش و مقایسه نتایج مربوط به زوایای واگرایی و مقاطع مختلف، مشخص شد که حوضچه‌های آرامش واگرا علاوه بر مزیت عدم نیاز به سازه تبدیل در ابتدا و انتها، از نظر مشخصات و عملکرد جهش نیز به دلیل کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول نسبی و افزایش افت انرژی، وضع مطلوب‌تری نسبت به جهش در حوضچه‌های کلاسیک داشته و می‌توانند گزینه خوبی برای جایگزینی حوضچه‌های معمولی باشند. علاوه بر نتیجه‌گیری کلی فوق، نتایج زیر نیز 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 بیضی برای نیم‌رخ طولی در معادله تئوری جهش را تأیید می‌کند.

۲. در کلیه آزمایش‌ها، بین مقادیر تئوری و نتایج آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی، هم‌بستگی خوبی وجود دارد.

۳. در هر زاویه واگرایی، با کاهش شیب جانبی، طول نسبی جهش افزایش، نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد.

۴. در مقاطع مستطیلی، افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در مقایسه با مقطع جهش کلاسیک، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش وافزایش افت نسبی انرژی می‌شود. این اختلاف با افزایش زاویه واگرایی دیواره‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که در زاویه واگرایی ۹ درجه، نسبت عمق ثانویه وطول نسبی جهش به ترتیب ۲۲/۵ و ۳۰ درصد کاهش و افت نسبی انرژی ۲۴/۵ درصد افزایش داشت.

۵. در مقاطع ذوزنقه‌ای، افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در هر شیب‌جانبی، در مقایسه با مقطع ذوزنقه‌ای مستقیم، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی می‌شود. روند این تغییرات، با افزایش زاویه واگرایی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی افزایش و برای طول نسبی جهش کاهش می‌یابد.

۶. واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش در کلیه مقاطع، در تثبیت موقعیت جهش و کاهش طول آن مؤثر می‌باشد.

منابع مورد استفاده

۱. امید، م. ح. ۱۳۷٦. جهش هیدرولیکی در مقاطع ذوزنقه‌ای. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۸ (۳): ۱۱۳-۱۲۱.

2. Arabhabhirama, A. and A. Abela. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. J. Hydraul. Div. ASCE 97 (1): 31-42.
3. Ead, S. A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. J. Hydraul. Eng 128(7): 656-663.
4. Khlifa, A. M. and A. M. McCorquodale. 1979. Radial hydraulic jump. J. hydraul. Div. ASCE 105(9): 1065-1078.
5. Kouluseus, H. j. and D. Ahmad. 1961. Circular hydraulic jump. J. Hydraul. Div. ASCE 95(1): 409-422.
6. Lawson, J. D. and B. C. Phillips. 1983. Circular hydraulic jump. J. Hydraul. Eng. 109(4): 505-518.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]

7. Massey, B. S. 1966. Hydraulic jump in trapezoidal channel an improved method. Water Power 13: 232.
8. Peterka, A. J. 1983. Hydraulic design of stilling basin and energy dissipaters. Engineering monograph. No. 25, U. S. bureau of reclamation.
9. Posey, C. J. and P. S. Hsing. 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Eng. News – Record. p. 797 .
10. Wanoschek, R. and W. H. Hager. 1989. Hydraulic jump in trapezoidal channel. J. Hydraul. Res. 27(3): 429-445.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1384.9.2.2.7]