

بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های، پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش همگرا

محمد رضا نیک‌پور^{*}

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

^{*}m_nikpour@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۰/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۶/۲۷]

چکیده

همگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش یکی از راهکارهای بهبود پرش هیدرولیکی از نظر افزایش عمق پایاب و استهلاك انرژی در پایین‌دست سرریزهای سدهای بزرگ است. در این پژوهش تشکیل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش همگرا به ازای سه هندسه متفاوت و اعداد فرود اولیه $3/17$ و $4/46$ مطالعه آزمایشگاهی شد. عمق‌های مزدوج و سرعت پرش در محور مرکزی حوضچه‌های آرامش همگرا اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن، بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای تولید شده در مقاطع همگرا اندازه‌گیری شد. مقادیر اندازه‌گیری شده عمق‌های مزدوج نسبی و استهلاك انرژی پرش با نتایج حاصل از روابط تحلیلی ارائه شده به وسیله سایر پژوهشگران مقایسه شد. میانگین خطای نسبی محاسبه پارامترهای مذکور به ترتیب $9/75$ و $17/15$ درصد بدست آمد. نتایج نشان داد که به‌ازای عدد فرود یکسان، افزایش زاویه همگرایی باعث کاهش عمق‌های مزدوج نسبی و طول پرش و افزایش استهلاك انرژی می‌شود. اما از سوی دیگر افزایش زاویه همگرایی با تشدید امواج ضربه‌ای و در نتیجه اختلال در ایجاد پرش پایدار همراه بود. به‌ازای زاویه همگرایی یکسان، اثر انحنای دیواره حوضچه نیز بررسی شد و با توجه به تأثیر ناچیز آن بر بهبود خصوصیات هیدرولیکی پرش، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. نتایج این پژوهش برای مهندسین طراح می‌تواند بسیار مفید باشد.

واژگان کلیدی: استهلاك انرژی، پرش هیدرولیکی، حوضچه آرامش همگرا، طول پرش، عمق‌های مزدوج.

۱- مقدمه

نیازمند عمق آب مناسب در پایین‌دست آن است. اگر به هر دلیلی نتوان عمق پایاب مناسب برای تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه آرامش را تأمین کرد، همگرایی و واگرایی تدریجی در مقطع جریان می‌تواند یک راه حل مناسب برای کاهش عمق مورد نیاز برای وقوع پرش باشد که در عین حال باعث کاهش هزینه احداث حوضچه آرامش می‌شود [2]. مطالعات آزمایشگاهی اربهابیراما و ابلا، خلیفه و مک‌رودال، موسوی خندان و همکاران، امید و اسمعیلی ورکی، بختیاری و کاشفی‌پور، شجاعیان و همکاران، کاسی و اسمعیلی ورکی، بختیاری و همکاران، امید و همکاران نشان

پرش هیدرولیکی پدیده‌ای است که در آن، جریان در فاصله کوتاهی از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل می‌شود. در این پدیده عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و در نتیجه ضمن ایجاد افت محسوس انرژی، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می‌شود [1]. ایجاد پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه‌های آرامش یکی از اساسی‌ترین روش‌های کنترل پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی است. عملکرد بهینه و مؤثر حوضچه آرامش کلاسیک

شکل ۱. حرکت دماغه موج در جریان فوق بحرانی [16]

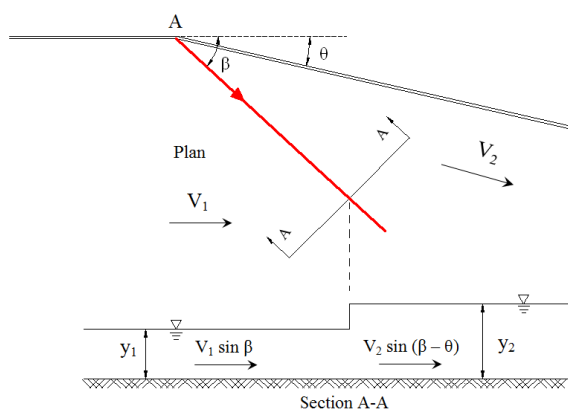


Fig. 1. Movement of wave head in supercritical flow [16]

عدد فرود نرمال قبل از پرش در مقاطع همگرا با استفاده از

رابطه (۱) محاسبه می‌شود [13].

$$Fr_{n1} = \frac{V_{n1}}{\sqrt{gy_1}} = \frac{V_1 \sin \beta}{\sqrt{gy_1}} = Fr_1 \sin \beta \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V_{n1} سرعت نرمال پیشانی موج، V_1 و y_1 مقادیر سرعت و عمق در مقطع اولیه پرش است. طبق توصیه مونتز و چانسون در شرایط عبور جریان فوق بحرانی از مقاطع همگرا، برای جلوگیری از بروز پدیده انسداد باید عدد فرود اولیه جریان بزرگتر از ۱/۷ انتخاب شود. استورم بر اساس حل تحلیلی معادلات پیوستگی و مومتم، روابط (۲ و ۳) را برای محاسبه زاویه تشکیل امواج ضربه‌ای و عمق‌های مزدوج نسبی پرش در مقاطع همگرا ارائه داد [17]. در روابط مذکور، y_1 و y_2 عمق‌های اولیه و ثانویه پرش است. ضمناً زوایای β و θ بر حسب رادیان است. مونتز و چانسون نیز برای محاسبه استهلاك انرژی نسبی در محور مرکزی پرش در مقاطع همگرا رابطه (۴) را ارائه دادند [14]. در رابطه (۴)، ΔE_{CL} افت انرژی در محور مرکزی پرش و y_c عمق بحرانی در کانال بالادست مقطع همگرا است.

$$\sin \beta = \frac{1}{Fr_{n1}} \left[\frac{1}{2} \frac{y_2}{y_1} \left(\frac{y_2}{y_1} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \theta)} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta E_{CL}}{y_c} = \frac{\left[\sqrt{1 + 8Fr_{n1}^2} - 3 \right]^3}{16Fr_{n1}^{\frac{2}{3}} \left(\sqrt{1 + 8Fr_{n1}^2} - 1 \right)} \quad (4)$$

به منظور محاسبه میزان استهلاك انرژی نسبی ($\Delta E_{CL}/y_c$) با

استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده و مقایسه آن با رابطه تحلیلی (۴)،

از رابطه (۵) استفاده شد.

$$\frac{\Delta E_{CL}}{y_c} = \frac{E_1 - E_2}{\sqrt[3]{q^2/g}} \quad (5)$$

داد که واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش باعث کاهش نسبت عمق‌های مزدوج و طول پرش و همچنین افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با پرش تشکیل یافته در حوضچه‌های آرامش کلاسیک می‌شود [3-11]. همچنین در پژوهش‌های انجام گرفته در خصوص تشکیل پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا به وسیله رزمخواه و همکاران، هنر و پورحمزه و مونتز و چانسون تأثیر مشابه مقاطع واگرا مشاهده شد به گونه‌ای که به ازای دبی ثابت، افزایش زاویه همگرایی باعث کاهش عمق مزدوج نسبی و طول پرش و افزایش افت انرژی می‌شود [12-14]. لازم به ذکر است که استهلاك انرژی در پایین‌دست سرریزهای سدهای بزرگ منجر به طرح حوضچه آرامش با طول زیاد و عمیق خواهد شد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. بنابراین یکی از روش‌های افزایش استهلاك انرژی در چنین شرایطی، افزایش عمق پایاب موجود با همگرا نمودن دیواره‌های حوضچه آرامش است [12]. با توجه به شرایط پیچیده جریان در حالت وقوع پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش همگرا، طراحی چنین حوضچه‌هایی نیازمند مطالعات آزمایشگاهی است. در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا به دلیل دشواری آزمایش‌ها پژوهش‌اندکی صورت گرفته است. در این پژوهش وقوع پرش هیدرولیکی در سه هندسه متفاوت از حوضچه‌های آرامش با مقطع همگرا و به‌ازای دبی‌های مختلف با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی شد. تأثیر زاویه همگرایی و انحنای دیواره روی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی و همچنین تشکیل امواج ضربه‌ای^۱ مخرب در مقاطع همگرا مورد مطالعه قرار گرفت.

۱-۱- تحلیل پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا

وقوع پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا با تشکیل امواج عرضی^۲ یا امواج ضربه‌ای همراه است [15]. چنانچه در مسیر عبور جریان فوق بحرانی، دیواره کانال مطابق شکل (۱) با زاویه θ به سمت داخل منحرف شده باشد، از گوشه مقعر A موج ضربه‌ای مورب با زاویه β تشکیل می‌شود. امواج ضربه‌ای آثار مخربی برای بدنه کانال به همراه دارد [16].

¹ Shock waves

² Cross waves

± 0.5 سانتی متر بر ثانیه استفاده شد.

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (6)$$

در روابط (۵ و ۶) پارامترهای E ، A ، Q و q به ترتیب انرژی مخصوص، سطح مقطع جریان، دبی واحد عرض جریان و دبی جریان است. ضمناً اندیس های ۱ و ۲ مربوط به مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش است [18].

۲- مواد و روش ها

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

۲-۲- روش اندازه گیری

به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در کلیه آزمایش ها میزان بازشدگی دریچه، ۲ سانتی متر بود. آزمایش ها به ازای دو دبی ۱۹/۲ و ۲۷/۰ لیتر در ثانیه انجام گرفت. پس از تنظیم و تثبیت ارتفاع آب در مخزن ورودی (با استفاده از اشل دیواره مخزن) به ازای دبی های مذکور، با عبور آب از زیر دریچه کشویی جریان فوق بحرانی در کانال برقرار شد. از دریچه کشویی واقع در انتهای فلوم برای ایجاد پرش پایدار در مقاطع همگرا استفاده شد. پس از پایدار شدن پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش، مقادیر عمق های اولیه و ثانویه پرش و همچنین ارتفاع امواج ضربه ای توسط عمق سنج اندازه گیری شد. با توجه به شدت بالای آشفتگی جریان احتمال بروز خطا در هنگام قرائت پروفیل سطح آب وجود داشت. به منظور کمینه کردن خطای مذکور در هر نقطه چندین بار مقدار عمق اندازه گیری و میانگین آن ثبت شد. مقادیر سرعت لحظه ای در محور مرکزی حوضچه آرامش از فاصله ۱۰ سانتی متری ابتدای حوضچه در ده مقطع، به وسیله سرعت سنج اندازه گیری و ثبت شد. فواصل طولی برای مقاطع اندازه گیری سرعت به ازای مدل های ۱ و ۲ برابر ۱۰ سانتی متر و برای مدل ۳ برابر ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. همچنین در هر مقطع، اندازه گیری سرعت از ۵ میلی متری بستر تا حدوداً ۲ سانتی متر زیر سطح آب در فواصل قائم ۱ سانتی متر انجام گرفت. شکل (۲) پلان مدل های آزمایشگاهی و مقاطع اندازه گیری سرعت را نشان می دهد. لازم به ذکر است که مدت زمان برداشت داده های سرعت در هر نقطه، ۵ ثانیه در نظر گرفته شده بود که در زمان مذکور ۱۰۰ مؤلفه لحظه ای سرعت در جهت های طولی و عرضی جریان (u و v) اندازه گیری شده و میانگین آنها ($\bar{u}$ و $\bar{v}$) به عنوان مؤلفه های سرعت نقطه مورد نظر ثبت شد.

کلیه مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع دیواره های ۰/۷ متر انجام گرفت. در بالادست فلوم یک مخزن ورودی به طول ۱/۷۵ متر، عرض ۱/۶۵ متر و ارتفاع ۱/۲۰ متر نصب شده بود. آب از مخزن زیرزمینی به داخل مخزن ورودی پمپاژ شده و پس از عبور از تبدیل مخزن وارد فلوم شد. دبی ورودی به مخزن ورودی توسط شیر فلکه ای که روی لوله رانش پمپ نصب شده بود، تنظیم می شد. در ورودی فلوم یک دریچه کشویی فولادی لبه-تیز به ضخامت ۳ میلی متر و ارتفاع ۱/۲ متر به منظور تنظیم سطح آب ورودی و کنترل عدد فرود نصب شده بود. در طی آزمایش ها از چهار ورق پلکسی گلاس به ضخامت ۶ میلی متر، طول ۱ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر به منظور ایجاد کانال های بالادست و پایین دست حوضچه های آرامش استفاده شد. برای دیواره های مقاطع همگرا (حوضچه های آرامش) نیز از شش ورق پلکسی گلاس به ضخامت ۶ میلی متر، طول های ۱/۵ و ۰/۶ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده شد. به منظور نصب دیواره های حوضچه و همچنین کانال های بالادست و پایین دست، یک کف کاذب از جنس پلی اتیلن فشرده با زبری ناچیز، به ضخامت ۱ سانتی متر، طول ۳/۵ متر و عرض ۱ متر در ابتدای فلوم کار گذاشته شد. مشخصات هندسی مدل ها در جدول (۱) آورده شده است. اندازه گیری دبی جریان عبوری از فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی سنج صوتی مدل UFM610P، با دقت ± 0.2 لیتر بر ثانیه که حسگرهای آن روی لوله آبرسان فلوم نصب شده بود، انجام گرفت. برای اندازه گیری پروفیل سطح آزاد جریان از عمق سنج نقطه ای با دقت اندازه گیری ± 0.1 میلی متر استفاده شد. همچنین به منظور اندازه گیری سرعت نقطه ای از سرعت سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق مدل ACM2-RS با دقت

شکل ۲. پلان مدل‌های آزمایشگاهی و موقعیت مقاطع اندازه‌گیری سرعت

(الف): مدل ۱ (ب): مدل ۲ (ج): مدل ۳

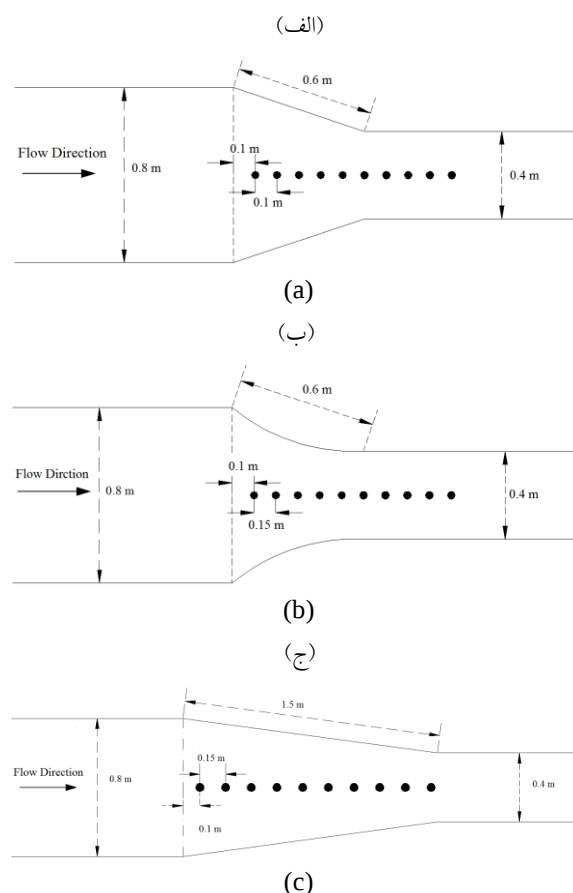


Fig. 2. Plans of the experimental models and sections position of velocity measurement

(a): Model 1 (b): Model 2 (c): Model 3

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تشکیل امواج ضربه‌ای در پرش هیدرولیکی

با برخورد جریان اصلی کانال (حوضچه) با این امواج، تلاطم سطح جریان افزایش یافته و باعث اختلاط شدید آب و هوا می‌شود. مقادیر زاویه تشکیل امواج ضربه‌ای به‌ازای دبی‌های مختلف با استفاده از رابطه (۲) محاسبه و در جدول (۲) گزارش شد. علاوه بر آن بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای (H_{max}) نیز به‌ازای دبی‌های مختلف اندازه‌گیری و در جدول (۲) مقادیر آن ذکر شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشینه مقادیر زاویه تشکیل و ارتفاع امواج ضربه‌ای متعلق به مدل ۱ است. به عبارت دیگر به‌ازای دبی و نسبت همگرایی یکسان، افزایش زاویه همگرایی حوضچه می‌تواند افزایش ارتفاع و زاویه تشکیل امواج ضربه‌ای را در هنگام وقوع پرش هیدرولیکی به دنبال داشته باشد. همچنین کاهش جزئی نتایج مدل ۲

نسبت به مدل ۱، مربوط به وجود انحنای دیواره‌ها و تعدیل نسبی رفتار سیال است. علاوه بر آن، امواج ضربه‌ای تشکیل شده در مدل‌های ۱ و ۲ از ارتفاع و شدت تلاطم بیشتری نسبت به مدل ۳ برخوردار است. با توجه به اینکه به‌ازای نسبت همگرایی یکسان، کاهش زاویه همگرایی الزاماً با افزایش طول دیواره مقطع همگرا میسر می‌شود، پس در مدل ۳ کاهش عرض حوضچه آرامش در فاصله طولانی‌تری نسبت به مدل‌های ۱ و ۲ انجام گرفته است و همین عامل باعث شد تا امواج ضربه‌ای ضعیف‌تری در مدل ۳ نسبت به دو مدل دیگر تشکیل شود.

جدول ۲. زوایای تشکیل امواج ضربه‌ای به‌ازای دبی‌ها و اعداد فرود مختلف

H_{max} (cm)	β (degree)	Fr_1	Q (lit/s)	
17.6	30.2	3.17	19.2	Model
19.3	31.7	4.46	27.0	1
16.3	29.4	3.17	19.2	Model
17.7	30.6	4.46	27.0	2
12.8	9.8	3.17	19.2	Model
14.5	10.2	4.46	27.0	3

Table 2. Formation angles of shock waves for different values of discharge and Froude number

۳-۲- نسبت عمق‌های مزدوج

در جدول (۳) مقادیر اندازه‌گیری شده عمق‌های اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی، نسبت عمق‌های مزدوج و همچنین مقادیر محاسباتی آن توسط رابطه (۳) ارائه شده است. مطابق جدول (۳) با اینکه نتایج حاصل از رابطه استورم با مقادیر اندازه‌گیری شده نسبتاً هم‌خوانی دارد، اما رابطه مذکور حالت کم‌برآورد داشته است. میانگین خطای نسبی رابطه استورم در برآورد عمق‌های مزدوج نسبی ۹/۷۵ درصد بدست آمد. علاوه بر آن با مقایسه نتایج مدل ۳ در مقابل نتایج مدل‌های ۱ و ۲ می‌توان دریافت که به‌ازای دبی یکسان، افزایش زاویه همگرایی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش نسبت عمق‌های مزدوج پرش داشته است. با مقایسه نسبی مدل‌های ۱ و ۳ می‌توان دریافت که افزایش زاویه همگرایی به میزان تقریبی ۱۲ درجه، موجب کاهش عمق‌های مزدوج نسبی به مقدار ۳۴/۴ درصد شده است. همچنین مقایسه نتایج مدل‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد وجود انحنای دیواره حوضچه آرامش همگرا به مقدار جزئی باعث کاهش نسبت عمق‌های مزدوج می‌شود.

جدول ۳. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی عمق‌های مزدوج به‌ازای دبی‌های مختلف

Relative Error (%)	(y_2/y_1) Sturm (1985)	(y_2/y_1) measured	y_2 (cm)	y_1 (cm)	Q (lit/s)
11.69	3.08	3.49	14.3	4.1	19.2
10.85	2.86	3.20	15.7	4.9	27.0
4.61	3.23	3.38	13.2	3.9	19.2
4.27	3.01	3.15	14.8	4.7	27.0
10.27	5.10	5.25	18.9	3.6	19.2
16.79	4.12	4.95	20.8	4.2	27.0
9.75	Average				

Table 3. Measured and computational values of the conjugate depths for different discharges

۳-۳- استهلاک انرژی

۳-۴- طول غلتاب

در این پژوهش معیار اندازه‌گیری طول غلتاب، فاصله افقی از ابتدای حوضچه تا نقطه‌ای در کانال پایین‌دست بود که در آن نقطه، سطح جریان به‌طور نسبی آرام شده و عمق جریان با عمق پایاب برابر می‌شود. در جدول (۵) مقادیر اندازه‌گیری شده طول غلتاب برای مدل‌های مختلف گزارش شده است. ملاحظه می‌شود که به‌ازای دبی یکسان، افزایش زاویه همگرایی به‌طور چشم‌گیری با کاهش طول غلتاب همراه است، به گونه‌ای که طول غلتاب در مدل ۱ نسبت به مدل ۳ به‌طور میانگین ۳۵/۵ درصد کوتاه‌تر است. انحنای دیواره حوضچه نیز تا حدودی باعث آرام شدن اغتشاشات جریان و کاهش طول غلتاب شده است.

جدول ۵. مقادیر اندازه‌گیری شده طول غلتاب به‌ازای دبی‌های مختلف

L_r (cm)	Q (lit/s)	
95.4	19.2	Model 1
98.6	27.0	
91.7	19.2	Model 2
94.0	27.0	
148.3	19.2	Model 3
152.6	27.0	

Table 5. Measured values of the length of roller for different discharges

۳-۵- تحلیل پروفیل‌های سرعت

در شکل (۲) پروفیل‌های بدون بعد مؤلفه افقی سرعت در محور مرکزی پرش هیدرولیکی در مدل‌های ۱ تا ۳ به‌ازای دبی ۱۹/۲ لیتر در ثانیه نمایش داده شده است. در شکل مذکور پارامترهای x , z , d , $\bar{u}$ و u_m به ترتیب نمایانگر فاصله طولی نسبت به ابتدای پرش، فاصله قائم از کف، میزان گشودگی دریچه، میانگین سرعت لحظه‌ای در نقطه مورد نظر و مقدار بیشینه سرعت در هر راستای قائم می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش برای یافتن میزان استهلاک انرژی در محور مرکزی پرش هیدرولیکی، پس از محاسبه مقادیر انرژی مخصوص در مقاطع ابتدایی و انتهایی پرش، افت انرژی نسبی برای مدل‌های ۱ تا ۳ بدست آمد که مقادیر آن به‌ازای دبی‌های مختلف در جدول (۴) آورده شده است. همچنین پارامتر مذکور با استفاده از رابطه ارائه شده به وسیله مونتر و چانسون محاسبه و در جدول (۴) گزارش شد. میانگین خطای نسبی رابطه مذکور در برآورد افت انرژی ۱۷/۱۵ درصد بدست آمد. حالت کم-برآورد رابطه تحلیلی در خصوص این پارامتر نیز مشاهده می‌شود. همچنین ارتباط مستقیم میان زاویه همگرایی و استهلاک انرژی با مقایسه نتایج مدل ۳ در مقابل نتایج مدل‌های ۱ و ۲ کاملاً نمایان است. به عبارت دیگر به‌ازای دبی یکسان، افزایش زاویه همگرایی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر افت انرژی پرش داشته باشد. به گونه‌ای که افزایش زاویه همگرایی به میزان ۱۲ درجه، به‌طور میانگین استهلاک انرژی پرش را به میزان ۳۳/۲ درصد افزایش داده است. مقایسه نتایج مدل‌های ۱ و ۲ نیز تأثیر انحنای دیواره حوضچه آرامش همگرا را بر افزایش جزئی استهلاک انرژی نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی استهلاک انرژی نسبی پرش

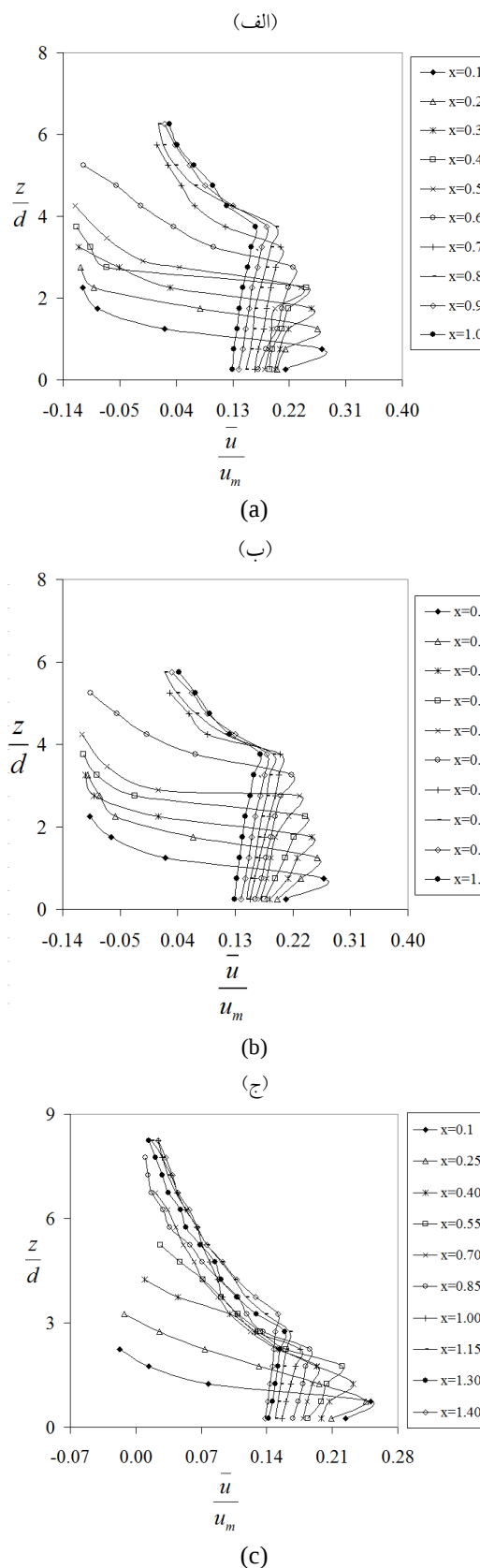
به‌ازای دبی‌های مختلف

Relative Error (%)	$(\Delta E_{CL}/y_c)$ Montes & Chanson (1998)	$(\Delta E_{CL}/y_c)$ measured	Q (lit/s)	
20.49	0.458	0.576	19.2	Model 1
15.26	0.511	0.603	27.0	
20.38	0.465	0.583	19.2	Model 2
16.72	0.523	0.627	27.0	
10.50	0.196	0.219	19.2	Model 3
19.53	0.239	0.297	27.0	
17.15	Average			

Table 4. Measured and computational values of the relative energy dissipation for different discharges

شکل ۳. پروفیل‌های سرعت در محور مرکزی پرش هیدرولیکی به‌ازای دبی

۱۹/۲ لیتر در ثانیه (الف): مدل ۱ (ب): مدل ۲ (ج): مدل ۳


Fig. 3. Velocity profiles in centerline of hydraulic jump for $Q=19.2$ lit/s
(a): Model 1 (b): Model 2 (c): Model 3

با توجه به شکل مذکور، مقادیر سرعت پس از رسیدن به مقدار بیشینه، تغییر جهت ناگهانی داده که علت آن جریان‌های چرخشی در محدوده ابتدایی پرش است. علاوه بر آن، پیشروی امواج ضربه‌ای مورب در مقاطع همگرا که با تشدید اختلاط آب و هوا همراه بود باعث تقویت تغییرات مذکور شد. با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و ضعیف شدن جریان‌های چرخشی و همچنین کاهش ضخامت لایه اختلاط آب و هوا، وقوع پیک منفی شدید در پروفیل‌های سرعت از بین رفته و غیر یکنواختی توزیع آن تعدیل می‌شود. از سوی دیگر با توجه به اینکه در پرش تشکیل یافته در مدل‌های ۱ و ۲ جریان‌های چرخشی و همچنین امواج ضربه‌ای قوی‌تر بوده بنابراین در پروفیل‌های سرعت این دو مدل نیز مقادیر منفی بیشتر مشاهده می‌شود.

۳-۶- تحلیل پروفیل‌های شدت آشفتگی

در شکل (۳) توزیع بدون بعد مؤلفه افقی شدت تلاطم در محور مرکزی پرش هیدرولیکی در مدل‌های ۱ تا ۳ به‌ازای دبی ۱۹/۲ لیتر در ثانیه نمایش داده شده است. در شکل مذکور پارامتر u' نشان‌دهنده نوسانات لحظه‌ای سرعت طولی است. با توجه به شکل-های مذکور توزیع غیر یکنواخت شدت آشفتگی کاملاً مشهود است، به‌طوری‌که در مقاطع ابتدایی پرش مقادیر آن با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر با افت ناگهانی مواجه می‌شود. با توجه به اینکه اختلاط آب و هوا باعث کاهش دامنه نوسانات سرعت لحظه‌ای و در نتیجه جزء یکی از عوامل کاهش شدت اغتشاش محسوب می‌شود، پس کاهش پارامتر مذکور می‌تواند به دلیل اختلاط آب و هوا باشد. با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و آرام شدن نسبی سطح آب شدت آشفتگی پس از رسیدن به مقدار حداکثر با شیب ملایمی نزول کرده و در انتها به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد. از سوی دیگر ملاحظه می‌شود که شیب نزولی پروفیل‌ها در مدل‌های ۱ و ۲ نسبت به مدل ۳ تندتر می‌باشد. با توجه به نسبت همگرایی یکسان حوضچه‌های آرامش و نظر به اینکه در مدل‌های ۱ و ۲ کاهش عرض جریان نسبت به مدل ۳ در فاصله کوتاه‌تری انجام گرفته است پس تغییر رفتار سیال در این مدل‌ها شدیدتر بوده و همان‌گونه که اشاره شد در پرش هیدرولیکی تشکیل شده در مدل‌های ۱ و ۲ اختلاط آب و هوا شدیدتر از مدل

۳ است،

به همین خاطر روند تغییرات در مدل‌های مذکور چشم‌گیرتر از مدل ۳ است. همچنین مطابق شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله از ابتدای پرش، شدت تلاطم کاهش می‌یابد و بیشینه شدت آشفتگی در ابتدای پرش و در محل وقوع حداکثر سرعت رخ می‌دهد. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و توسعه لایه مرزی، z/d متناظر با محل وقوع بیشینه شدت آشفتگی افزایش می‌یابد و در انتهای پرش موقعیت آن تقریباً تثبیت می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که به ازای عدد فرود ثابت، شیب کاهش شدت اغتشاش مدل ۲ به مقدار جزئی از مدل ۱ کمتر است. در واقع در مدل‌های ۱ و ۲ کاهش عرض کانال در فاصله یکسانی انجام گرفته است اما در مدل ۲ انحنای دیواره‌ها تا حدودی موجب تعدیل در تغییر ناگهانی رفتار سیال شده و در نتیجه آن از اختلاط آب و هوا به‌طور نسبی کاسته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تشکیل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش همگرا با سه هندسه متفاوت مطالعه آزمایشگاهی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- وقوع پرش هیدرولیکی در مقاطع همگرا با تشکیل امواج ضربه‌ای همراه بود. با افزایش زاویه همگرایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای زاویه تشکیل و ارتفاع امواج ضربه‌ای افزایش یافت.
- به‌ازای دبی یکسان، تغییر زاویه همگرایی حوضچه آرامش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی داشت به گونه‌ای که افزایش زاویه همگرایی به میزان تقریبی ۱۲ درجه، به‌طور میانگین باعث کاهش عمق‌های مزدوج نسبی و طول پرش به مقدار $34/4$ و $35/5$ درصد و همچنین افزایش افت انرژی به میزان $33/2$ درصد شد (مقایسه نتایج مدل‌های ۱ و ۳).
- مقادیر اندازه‌گیری شده عمق‌های مزدوج نسبی و افت انرژی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی ارائه شده توسط استورم (۱۹۸۵) و مونتز و چانسون (۱۹۹۸) مقایسه و میانگین خطای نسبی روابط مذکور به ترتیب $9/75$ و $17/15$ درصد حاصل شد. ضمناً حالت کم‌برآورد در نتایج روابط تحلیلی دیده شد.
- روند کلی تغییرات مؤلفه افقی شدت آشفتگی و سرعت در محور مرکزی پرش مشابه یکدیگر بود به این صورت که در هر راستای قائم با فاصله گرفتن از بستر مقادیر مذکور افزایش یافته

شکل ۴. پروفیل‌های شدت آشفتگی در محور مرکزی پرش هیدرولیکی به-

ازای دبی $19/2$ لیتر در ثانیه

(الف): مدل ۱ (ب): مدل ۲ (ج): مدل ۳

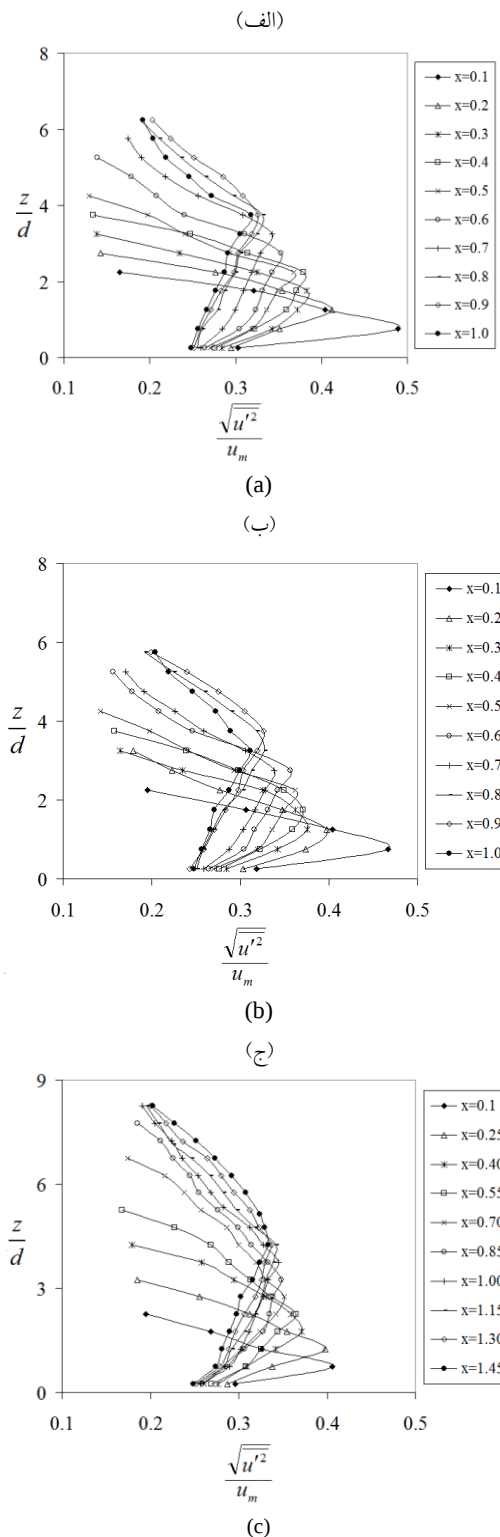


Fig. 4. Turbulence intensity profiles in centerline of hydraulic jump for $Q=19.2$ lit/s
(a): Model 1 (b): Model 2 (c): Model 3

- Conference. Tehran, Iran.: University of Tehran. P. 17. (In Persian)
- [6] Omid M. H. & Esmaeilei-Varaki M. 2005, Theory and experimental study of expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, **9**(2), 17-29. (In Persian)
- [7] Bakhtiari M. & Kashefipour M. 2008, Hydraulic characteristics investigation of jump parameters in divergent sections. *4th Civil National Congaree*. Tehran, Iran.: University of Tehran. P. 63. (In Persian)
- [8] Shojaeian Z., Hosseinzadeh-Dalir A., Farsadzadeh D. & Salmasi F. 2011, Investigation of hydraulic jump characteristics in divergent rectangular sections with reverse slope. *Journal of Water and Soil Science*, **3**(21), 49-60. (In Persian)
- [9] Kasi A., Farhoudi J. & Esmaeilei-Varaki M. 2011, Theory and experimental study of divergent hydraulic jump with reverse bed slope. *Journal of Iran Water Research*, **9**(2), 121-130. (In Persian)
- [10] Bakhtiari M., Kashefipour M. & Shafai-Bajestan M. 2013, Investigation of hydraulic jump characteristics in divergent rectangular stilling basins. *4th National Conference of Irrigation and Drainage Networks*. Ahvaz, Iran.: Shahid Chamran University of Ahvaz. P. 79. (In Persian)
- [11] Omid M.H., Esmaeilei-Varaki M. & Narayanan R. 2007, Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, **45**(4), 512-518.
- [12] Razmkhah A., Pirestani M. R. & Hamzekhani F. 2008, Experimental investigation of hydraulic parameters effects on energy dissipation in convergent stilling basins. *7th Iranian Hydraulic National Conference*. Tehran, Iran.: University of Shahid-Abbaspour. P. 106. (In Persian)
- [13] Honar T. & Pourhamzeh S. 2010, An experimental study of convergent hydraulic jump in stilling basins. *Journal of Water and Soil*, **24**(5), 966-972. (In Persian)
- [14] Montes J. S. & Chanson H. 1998, Characteristics of undular hydraulic jumps: experiments and analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, **124**(2), 192-205.
- [15] Chow V.T. 1959, *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Publisher, Michigan, USA.
- [16] Shafai-Bajestab M. 2004, *Open-Channel Flow*. Shahid Chamran University Press, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- [17] Sturm T. W. 1985, Simplified design of contractions in supercritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, **111**(5), 871-875.
- [18] Hosseini S. M. & Abrishami J. 2004, *Open-Channels Hydraulics*. Astan Quds Razavi Press, Mashhad, Iran. (In Persian)

و پس از رسیدن به مقدار بیشینه با افت ناگهانی مواجه شد. افزایش زاویه همگرایی باعث تشدید تغییرات مذکور شد، به گونه‌ای که غیریکنواختی توزیع در مدل‌های ۱ و ۲ نسبت به مدل ۳ چشم‌گیرتر بود. با فاصله گرفتن از ابتدای پرش و عبور از مقطع همگرا و به دنبال آن کاهش تأثیر امواج ضربه‌ای و اختلاط آب و هوا، پروفیل‌های مذکور یکنواخت‌تر شد. از سوی دیگر با مقایسه توزیع‌های قائم سرعت و شدت آشفتگی در مدل‌ها می‌توان دریافت که محل وقوع بیشینه سرعت در مقاطع مختلف پرش با محل وقوع بیشینه شدت آشفتگی تقریباً هماهنگ است.

- بر اساس نتایج این پژوهش با اینکه افزایش زاویه همگرایی باعث بهبود ویژگی‌های پرش می‌شود اما بروز امواج ضربه‌ای با افزایش زاویه همگرایی تشدید می‌شود و از این‌رو ایجاد پرش پایدار در زوایای همگرایی بالا مشکل خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه به‌ازای زاویه همگرایی یکسان وجود انحناى دیواره باعث کاهش جزئی اغتشاشات جریان می‌شود، اما چون تأثیر آن بر بهبود شرایط پرش اندک بوده و از طرف دیگر هزینه اجرای آن نسبت به دیواره مستقیم بیشتر است، پس از آن نمی‌توان به عنوان راهکار مؤثر یاد کرد.

References

۵- مراجع

- [1] Noshahri A., Omid M. H. & Kouchakzadeh S. 2009, Experimental investigation of hydraulic jump characteristics controlled by sill in divergent stilling basins. *Journal of Iran Water Research*, **3**(4), 31-39. (In Persian)
- [2] Hager W. H. & Bremen R. 1993, T-Jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, **31**(1), 61-78.
- [3] Arabhabhirama A. & Abela A. 1971, Hydraulic jump within gradually expanding channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, **97**(1), 31-42.
- [4] Khelifa A. M. & McCorquodale A. M. 1979, Radial hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, **105**(9), 1065-1078.
- [5] Mousavi-Khandan A., Borghei M. & Daemi A. 2001, Characteristics of scour profile in downstream of divergent stilling basins. *3th Iranian Hydraulic National*

Experimental Investigation of Hydraulic Jumps Characteristics in Stilling Basins with Convergent Walls

M.R. Nikpour^{1*}

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

*m_nikpour@uma.ac.ir

Abstract:

Walls convergence of stilling basins is one of the ways to improve hydraulic jump to increase tailwater depth and energy dissipation at downstream of spillways of high head dams. On the other hand, occurrence of hydraulic jump in converged sections is accompanied with formation of shock waves. Technically, production and development of the mentioned waves are undesirable due to amplification of mixture of water and air and resulting, disturbance outbreak on occurrence of stable hydraulic jump. Many studies have been conducted on the characteristics of hydraulic jump over gradually expanding cross sections, but comparatively few have been carried out on basins with convergent wall. In this research, occurrence of hydraulic jump in stilling basin with convergent wall was studied using experimental model for three different geometry and initial Froude number equal to 3.17 and 4.46. Experiments were conducted in a flume with a length of 6m, width of 1m and depth of 0.7m. Angles of convergence (7.7° and 19.5°) and type of stilling basins walls (straight and curved) were intended as geometric variables. In all experiments, widths of upstream and downstream channels were considered 80 and 40 cm, respectively (contraction ratio=0.5). The flow discharges were measured by an ultrasonic flow-meter having the accuracy of 0.02 lit/s. Values of instantaneous velocity were measured in 10 vertical sections in centerline of the convergent stilling basins using an electromagnetic 2-D velocity meter having the accuracy of 0.5 cm/s. Maximum height of produced shock waves in the contraction sections and conjugate depths of hydraulic jump were measured by a point gauge having the accuracy of 0.1 mm. The measured values of conjugate depths ratio and energy dissipation were compared with the obtained results of analytical equations presented by Sturm (1985) and Montes and Chanson (1998). The average relative errors of calculation of the mentioned parameters were respectively achieved 9.75% and 17.15%. It should be mentioned that the equations tended to underestimate the conjugate depths ratio and energy dissipation values. The velocity and turbulence intensity profiles were demonstrated and analyzed based on the mean values of instantaneous velocity and minor fluctuation of instantaneous velocity. The effects of convergence angle and curvature of basin wall were investigated on changes trend of the profiles. The results showed that changes of the convergence angle has a considerable impact on the conjugate depths ratio, energy dissipation and length of hydraulic jump. As for a constant Froude number, increasing of the convergence angle to approximately 12° was averagely accompanied with decrease of the conjugate depths ratio and hydraulic jump length to the 34.4% and 35.5%, respectively and increment of the energy dissipation to the 33.2%. It should be mentioned that increasing of the convergence angle caused intensification of the shock waves. Moreover, effects of curvature of basin wall were investigated for an equal convergence angle. As regards it had insignificant impact on improvement of hydraulic jump characteristics and difficulty of its implement, so it is not economical. The obtained results of the present research can be very useful for designer engineers.

Keywords: Conjugate depths, Convergent stilling basins, Energy dissipation, Hydraulic jump, Length of jump.