

بررسی ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرای کانال روباز

فریناز شجاع طلاپه^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، علی حسین زاده دلیر^۲، جواد بهمنش^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۵

^۱ دانشجوی دکترای سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: farinaz4433@yahoo.com

چکیده

تبدیل‌های همگرا در جریان‌های فوق بحرانی کاربردهای گسترده‌ای دارند. از جمله آن می‌توان به انتقال جریان از کانال‌های آبگیر سدها به سرریزهای تونلی، کاهش عرض کانال در تندآب‌ها و کاهش زمان انتقال جریان در کانال‌های انتقال سیلاب اشاره کرد. جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا همراه با ایجاد امواج ضربه‌ای می‌باشد. در این تحقیق ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرای کانال روباز با مقاطع نوزنقه‌ای و مستطیلی با به‌کارگیری مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. طول دیواره تبدیل ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ متر، نسبت همگرایی ۱ به ۲، ۱ به ۳ و ۱ به ۴ و زاویه شیب جانبی دیواره‌ها ۳۵، ۴۵، ۶۰، ۷۰ و ۹۰ درجه به‌عنوان متغیرهای هندسی و همچنین هفت عدد فرود مختلف در محدوده ۳/۲۵-۹/۲۳ به‌عنوان متغیر هیدرولیکی آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. مقادیر ارتفاع امواج ضربه‌ای در نقاط مختلف جبهه موج اندازه‌گیری گردید. سپس اثر پارامترهای بی‌بعد به‌دست آمده از تحلیل ابعادی بر روی ارتفاع امواج ضربه‌ای در طول تبدیل بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که در حالت کلی افزایش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل، کاهش نسبت همگرایی، کاهش طول دیواره تبدیل و همچنین افزایش عدد فرود جریان رابطه مستقیم با افزایش ارتفاع موج دارد. در نهایت رابطه‌ای برای محاسبه ارتفاع امواج ضربه‌ای در هر نقطه از تبدیل‌های همگرا براساس پارامترهای بی‌بعد با ضریب تبیین ۸۹٪ ارائه شد. همچنین نتایج نشان داد که طول دیواره تبدیل مؤثرترین پارامتر هندسی بر روی ارتفاع امواج ضربه‌ای می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: امواج ضربه‌ای، تبدیل همگرا، جریان فوق بحرانی، مدل آزمایشگاهی، مقطع نوزنقه‌ای

Investigation of Shock Waves Height in Contractions of Open-Channel

F Shoja Talatapeh^{1*}, D Farsadizadeh², A Hosseinzadeh Dalir², J Behmanesh³

Received: 12 June 2016 Accepted: 14 January 2017

¹- Ph.D. Student, Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

²- Prof. Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

³- Assoc. Prof. Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Urmia, Iran

*Corresponding Author, Email: farinaz4433@yahoo.com

Abstract

Contractions have many uses in supercritical flows, such as flow conveyance from intake channels of dams to tunnel spillways, reduction of chutes width and reduction of flow conveyance time in the flood conduits. In supercritical flows shock waves form at contractions. In this research, height of shock waves in contractions of open-channels with trapezoidal and rectangular sections was investigated using experimental models. For this purpose, transition wall with the lengths of 1, 0.75 and 0.5m, convergence ratio with the values of 1/2, 1/3 and 1/4 and side slope with the angles of 35°, 45°, 60°, 70° and 90° were considered as geometric variables of the experiments. Also Froude number was assumed as a hydraulic variable of the experiments in the range of 3.25-9.23. The values of shock waves height were measured in various points of wave front. Then effect of dimensionless parameters achieved by dimensional analysis was investigated on the height of shock waves formed in the transitions. In general, the results showed that increasing the side slope angle of the transition wall, reduction of convergence ratio, and reduction of the transition wall length and increasing of the Froude number had a direct relationship with increasing the wave height. Finally, an equation with $R^2=0.89$ was recommended using the dimensionless parameters for computing the height of shock waves at any point of contractions. Also, the results showed that the most effective parameter on height of shock waves was the length of transition wall.

Keywords: Contraction, Experimental model, Shock waves, Supercritical flow, Trapezoidal section

مقدمه

(کاوزن و همکاران ۱۹۹۹). تولید و توسعه این امواج به دلیل افزایش ارتفاع آب به اندازه چندین برابر عمق جریان ورودی و گسترش آن در محدوده وسیعی از کانال پایین دست و ناهموار ساختن سطح آب به لحاظ مهندسی نامطلوب بوده و هر گونه طراحی ضعیف کانال می‌تواند منجر به آبهستگی دیواره‌ها و کف کانال، آسیب رساندن به تجهیزات در مسیر جریان و بالا بردن هزینه‌های مربوط به نگهداری و کاهش راندمان انتقال آب گردد. جریان فوق بحرانی در کانال‌های روباز از سال‌های قبل توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته

گسترش روز افزون بافت شهری و تغییرات زیست محیطی ناشی از آن منجر به افزایش روز افزون طراحی کانال‌های انتقال آب با سرعت بالا گشته است. وجود هر گونه تغییر هندسی مانند تنگ‌شدگی، گشاد شدگی، بالا آمدگی و پایین‌افتادگی کف در مسیر کانال-های با جریان فوق بحرانی موجب تغییر ناگهانی عمق و سرعت جریان و تشکیل امواج ضربه‌ای^۱ خواهد شد

¹ Shock wave

بر اساس عدد فرود، شعاع خم و قطر لوله ارائه دادند. گاستین و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی عددی جریان فوق بحرانی در تقاطع خیابان‌ها با استفاده از مدل ترکیبی یک بعدی- دو بعدی آب‌های کم‌عمق^۶ و مقایسه آن با مدل دو بعدی کامل^۷ پرداختند. نتایج نشان داد که دقت و صحت نتایج حاصل از مدل ترکیبی همانند دو بعدی بوده و حتی قادر است تا ۳۰ درصد در زمان محاسبات صرفه‌جویی نماید. گونزالو و همکاران (۲۰۱۴) جریان فوق بحرانی در یک تقاطع چهار شاخه کانال روباز تحت زاویه ۹۰ درجه و با نسبت‌های عرضی متفاوت را مطالعه نموده و معادله‌ای را برای محاسبه دبی خروجی از چهار شاخه ارائه دادند. نیک-پور (۱۳۹۲) تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا و واگرایی کانال روباز مستطیلی را با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و RSM مورد بررسی قرار داد. میانگین خطای نسبی مدل‌های آشفتگی در محاسبه ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها نشان از برتری نسبی مدل RSM داشت. بر اساس منابع موجود، رفتار جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با مقطع دوزنقه‌ای کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به اینکه مقاطع دوزنقه‌ای در طراحی کانال‌های انتقال آب بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، هدف از تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقطع دوزنقه‌ای می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

در تحلیل ابعادی امواج ضربه‌ای تبدیل‌های همگرا، پارامترهای موثر عبارتند از:

الف) جرم مخصوص سیال (ρ)، لزجت دینامیک سیال (μ)، سرعت جریان در کانال بالادست (u_1)، شتاب

است. بالامادی و چادری (۱۹۹۲) جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های کانال‌های روباز را با حل معادلات دو بعدی متوسط‌گیری شده جریان غیرماندگار در آب‌های کم‌عمق^۲ به روش عددی مک‌کورمک^۳ با شمای صریح^۴ مرتبه دوم بررسی کردند. نتایج مدل نشان داد در مناطقی که تغییرات فشار به‌صورت هیدرواستاتیک بود بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مطابقت وجود داشت. رینر و هگر (۱۹۹۸) به‌منظور کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرایی تندآب‌ها، استفاده از تکه‌های منشوری با مقطع مثلثی را پیشنهاد کردند. این تکه‌های منشوری که توسط محققین مذکور، پراکنده‌ساز^۵ نامیده شده‌اند، می‌توانند در نقاط شروع و پایانی تبدیل همگرا (گوشه‌های تبدیل) نصب شود. نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده از پراکنده‌ساز در تندآب می‌تواند ارتفاع امواج ضربه‌ای را ۳۰-۵۰ درصد کاهش دهد. کروگر و راتشمان (۲۰۰۶) جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا و تلاقی کانال‌ها را با حل معادلات کلاسیک و توسعه یافته آب‌های کم‌عمق با استفاده از نرم‌افزار FEMTOOL شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که معادلات توسعه یافته آب‌های کم عمق نسبت به معادلات کلاسیک نتایج بهتری در برآورد پروفیل سطح آب در تبدیل‌های همگرا و تلاقی کانال‌ها دارد. همچنین نتایج به‌دست آمده از دو سری معادلات برای محاسبه پروفیل سطح آب در تبدیل‌های واگرا مشابه بود. جان و همکاران (۲۰۰۹) جریان فوق بحرانی در تبدیل همگرایی یک تندآب آزمایشگاهی را بررسی نمودند. در نهایت روابطی بی‌بعد به‌منظور محاسبه بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای و محل وقوع آن ارائه دادند. کولارویچ و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی امواج ضربه‌ای در امتداد لوله دارای خم، به‌ازای شش زاویه انحراف پرداختند و رابطه‌ای بی‌بعد برای محاسبه ارتفاع امواج

² Shallow water

³ MacCormak (MAC)

⁴ Explicit

⁵ Diffraction

⁶ Coupled 1D-2D shallow water model

⁷ Fully 2D model

عدد فرود می‌باشد. میزان باز شدگی در پیچه مذکور به منظور ایجاد شرایط جریان فوق بحرانی ۲ سانتی‌متر می‌باشد. مخزن تخلیه^۸ نیز در قسمت خروجی فلوم و برای هدایت آب به کانال تخلیه به مخزن زیرزمینی آزمایشگاه در نظر گرفته شده است. به منظور آماده-سازی مدل و انجام آزمایش‌ها یک کف کاذب از جنس پلاستیک فشرده به ضخامت ۵ میلی‌متر، طول ۳/۶ متر و عرض ۱ متر در ابتدای فلوم نصب شد. برای ایجاد کانال‌های بالادست و پایین‌دست تبدیل‌ها از ورق‌های پلکسی‌گلاس استفاده شد. همچنین در ساخت دیواره تبدیل‌ها شش ورق پلکسی‌گلاس به طول‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. هندسه مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به شرح جدول ۱ می‌باشد. در اغلب مطالعات پژوهشی انجام گرفته توسط محققان در خصوص جریان‌های فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا از نسبت همگرایی ۱ به ۲ استفاده شده است. در تحقیق حاضر علاوه بر نسبت مذکور، نسبت‌های همگرایی ۱ به ۳ و ۱ به ۴ نیز مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که امکان اجرای نسبت همگرایی کوچکتر از مقادیر مذکور در مدل آزمایشگاهی میسر نبود. همچنین نظر به اینکه کانال‌های روباز با مقطع دوزنقه‌ای عمدتاً با زوایای شیب جانبی ۳۵ درجه و ۴۵ درجه اجرا و بهره‌برداری می‌شوند، زوایای شیب جانبی برای تحقیق حاضر نیز در محدوده ۳۵-۹۰ درجه در نظر گرفته شد. دبی جریان در فلوم با استفاده از دبی‌سنج صوتی با دقت ± 0.02 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. همچنین اندازه‌گیری ارتفاع امواج با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ± 0.1 میلی‌متر انجام گرفت. در شکل ۱ نمای پایین دست مدل-های ۳، ۶، ۹ و ۲۲ این تحقیق داده شده است.

ثقل (g)، عمق جریان نزدیک‌شونده به تبدیل (y)، ارتفاع مطلق موج (ارتفاع موج نسبت به کف) (H)، طول دیواره تبدیل (L)، فاصله طولی جبهه موج نسبت به ابتدای تبدیل (X)، زاویه شیب جانبی دیواره (α)، عرض کانال بالادست (b_1) و عرض کانال پایین‌دست (b_2).

ارتفاع امواج ضربه‌ای به صورت تابعی از پارامترهای فوق نوشته می‌شود:

$$H = f_1(\rho, \mu, u_1, g, y, L, X, \alpha, b_1, b_2) \quad [1]$$

با کاربرد روش π باکینگهام و در نظر گرفتن پارامترهای ρ ، u_1 و y به عنوان متغیرهای تکراری و با تقسیم پارامترهای بی‌بعد بر همدیگر، رابطه بی‌بعد ۲ بدست می‌آید.

$$\frac{H}{L} = f_2(\text{Re}, Fr_1, \frac{X}{L}, \alpha, \frac{b_2}{b_1}) \quad [2]$$

در رابطه ۲، Fr_1 عدد فرود در کانال بالادست و Re عدد رینولدز می‌باشد که به لحاظ زیادبودن سرعت جریان و ناچیز بودن تأثیر نیروی لزوجت از آن صرف‌نظر شد. همچنین پارامتر بی‌بعد b_2/b_1 نشان‌دهنده نسبت همگرایی می‌باشد. بنابراین رابطه ۲ به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$\frac{H}{L} = f_3(Fr_1, \frac{X}{L}, \alpha, \frac{b_2}{b_1}) \quad [3]$$

تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌ها در تحقیق حاضر از فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه با مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع دیواره‌های ۰/۷ متر استفاده شد. فلوم مذکور شامل مخزن ذخیره به طول ۱/۷۵ متر، عرض ۱/۶۵ متر و ارتفاع ۱/۲۰ متر می‌باشد که در بالادست فلوم قرار دارد. شیرفلکه وظیفه تنظیم دبی ورودی به مخزن ذخیره را داشته و بر روی لوله رانش پمپ نصب شده است. در پیچه کشویی فولادی لبه-تیز در ورودی فلوم قرار داشته و به ضخامت ۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱/۲ متر جهت تنظیم سطح آب ورودی و کنترل

⁸Tail tank

جدول ۱- هندسه مدل‌های مورد استفاده.

شماره مدل	عرض کانال بالادست (m)	عرض کانال پایین-دست (m)	طول دیواره تبدیل (m)	نسبت همگرایی	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (degree)
۱	۰/۴۰	۰/۲۰	۱	۱ به ۲	۳۵
۲	۰/۴۰	۰/۲۰	۰/۷۵	۱ به ۲	۳۵
۳	۰/۴۰	۰/۲۰	۰/۵۰	۱ به ۲	۳۵
۴	۰/۵۰	۰/۲۵	۱	۱ به ۲	۴۵
۵	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۷۵	۱ به ۲	۴۵
۶	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۵۰	۱ به ۲	۴۵
۷	۰/۶۰	۰/۳۰	۱	۱ به ۲	۶۰
۸	۰/۶۰	۰/۳۰	۰/۷۵	۱ به ۲	۶۰
۹	۰/۶۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۱ به ۲	۶۰
۱۰	۰/۷۲	۰/۳۶	۱	۱ به ۲	۷۰
۱۱	۰/۷۲	۰/۳۶	۰/۷۵	۱ به ۲	۷۰
۱۲	۰/۷۲	۰/۳۶	۰/۵۰	۱ به ۲	۷۰
۱۳	۰/۴۰	۰/۱۳	۰/۵۰	۱ به ۳	۳۵
۱۴	۰/۵۰	۰/۱۷	۰/۵۰	۱ به ۳	۴۵
۱۵	۰/۶۰	۰/۲۰	۰/۵۰	۱ به ۳	۶۰
۱۶	۰/۷۲	۰/۲۴	۰/۵۰	۱ به ۳	۷۰
۱۷	۰/۵۰	۰/۱۲۵	۰/۵۰	۱ به ۴	۴۵
۱۸	۰/۶۰	۰/۱۵	۰/۵۰	۱ به ۴	۶۰
۱۹	۰/۷۲	۰/۱۸	۰/۵۰	۱ به ۴	۷۰
۲۰	۰/۶۰	۰/۳۰	۱	۱ به ۲	۹۰
۲۱	۰/۶۰	۰/۳۰	۰/۷۵	۱ به ۲	۹۰
۲۲	۰/۶۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۱ به ۲	۹۰
۲۳	۰/۶۰	۰/۲۰	۰/۵۰	۱ به ۳	۹۰
۲۴	۰/۶۰	۰/۱۵	۰/۵۰	۱ به ۴	۹۰



(ب)



(الف)



(د)



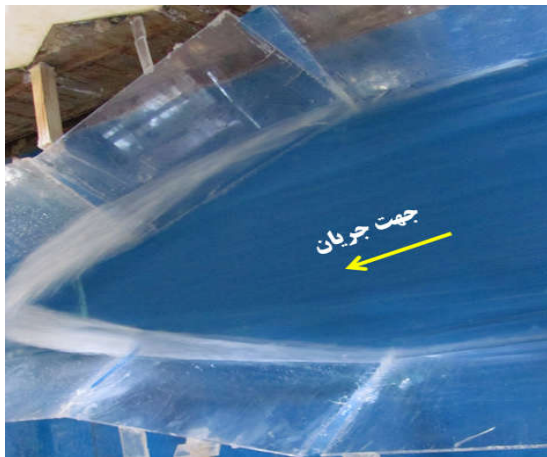
(ج)

شکل ۱- نمای پایین دست تبدیل‌های همگرا (الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۲۲.

روش انجام آزمایش‌ها

تبدیل‌ها در فاصله‌ای از ابتدای کانال نصب شد که جریان فوق بحرانی ورودی به آن به صورت توسعه یافته کامل باشد. همچنین جریان خروجی از تبدیل‌ها در همه آزمایش‌ها به صورت فوق بحرانی بود. آزمایش‌ها با هفت عدد فرود مختلف در بالادست تبدیل در محدوده $Fr_1 = 3/25 - 9/23$ انجام شد. جریان فوق بحرانی در کانال با تنظیم ارتفاع آب مخزن ذخیره در عدد فرود مشخص ایجاد می‌شد. امواج ضربه‌ای با برخورد جریان فوق بحرانی به دیواره‌های تبدیل به صورت مورب

ایجاد شده و با هم تداخل می‌نمایند. ارتفاع امواج بعد از ماندگار شدن در فواصل طولی ۱۰ سانتی‌متر در طول حرکت جبهه موج تا محل تلاقی امواج در اعداد فرود مختلف اندازه‌گیری شد. احتمال وجود خطا در هنگام اندازه‌گیری سطح آب به لحاظ آشفتگی جریان و اختلاط هوا با آب وجود داشت. برای کاهش این خطا اندازه‌گیری ارتفاع موج در هر مقطع چندین بار تکرار شده و میانگین آنها به عنوان ارتفاع موج نقطه مورد نظر در نظر گرفته شد. شکل ۲ امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرای مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۲۲ را در $Fr_1 = 7/26$ نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲- امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با $Fr_1 = 7/26$

(الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۲۲.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل، طول دیواره تبدیل و نسبت همگرایی به عنوان متغیرهای هندسی و عدد فرود به عنوان متغیر هیدرولیکی بر ارتفاع امواج ضربه‌ای بررسی گردید. لذا به ترتیب تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

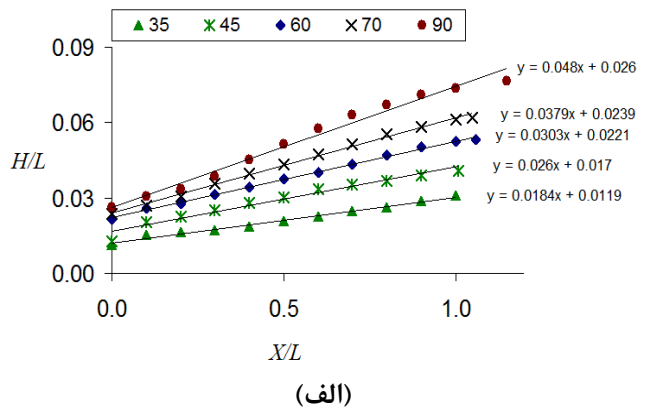
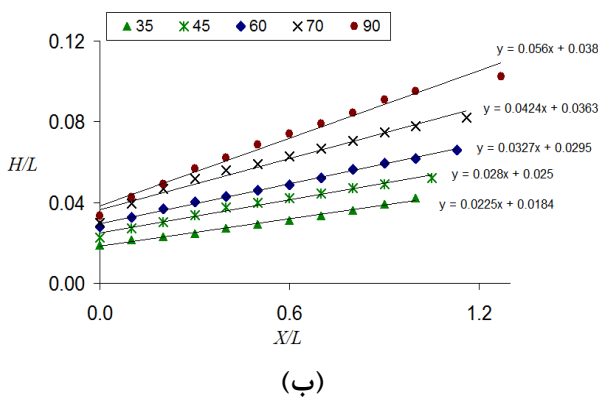
الف) تأثیر زاویه شیب جانبی

شکل ۳ پروفیل بی‌بعد سطح آزاد امواج ضربه‌ای به همراه خط برازش داده شده بین آنها را به ازای

$Fr_1 = 7/26$ و $Fr_1 = 3/25$ و زاویه‌های مختلف شیب جانبی در مدل‌های ۱، ۴، ۷، ۱۰ و ۲۰ نشان می‌دهد. شکل مذکور نشان می‌دهد که در حالت کلی با حرکت جبهه موج، ارتفاع آن افزایش می‌یابد. در واقع در اثر برخورد موج ضربه‌ای با جریان اصلی کانال، ارتفاع جبهه موج زیاد شده و با نزدیک شدن دماغه موج به انتهای تبدیل و تشدید برخورد جریان کانال با جبهه موج، روند صعودی ارتفاع موج نیز افزایش می‌یابد. مقایسه پروفیل‌ها بر اساس شیب خط برازش داده شده بین نقاط اندازه‌گیری شده، حاکی از افزایش ارتفاع امواج با افزایش زاویه شیب جانبی می‌باشد. همچنین متناسب

کاهش ارتفاع جبهه موج را به دنبال دارد. در واقع در هنگام برخورد جریان فوق بحرانی به دیواره تبدیل همگرا و ایجاد امواج ضربه‌ای، وجود شیب جانبی دیواره تبدیل موجب تعدیل در تغییر ناگهانی رفتار سیال شده و در نتیجه آن از ارتفاع امواج کاسته می‌شود.

با افزایش زاویه شیب جانبی، روند افزایش ارتفاع امواج نیز بیشتر می‌شود. در مقاطع مستطیلی با زاویه شیب ۹۰ درجه سیر صعودی مذکور شیب تندتری به خود گرفته و روند افزایش ارتفاع امواج سریع‌تر می‌باشد. به عبارت دیگر به‌ازای عدد فرود، نسبت همگرایی و طول دیواره یکسان، کاهش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل،



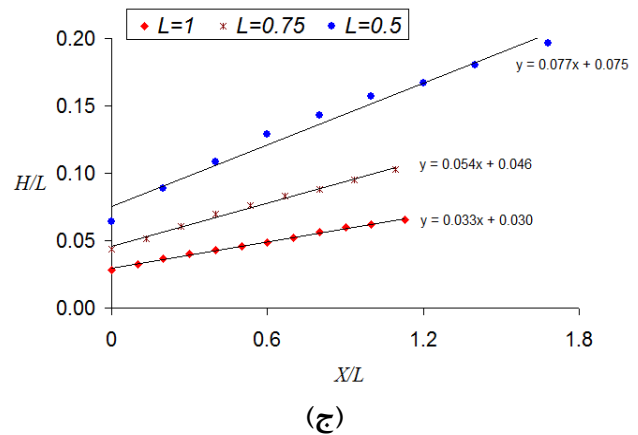
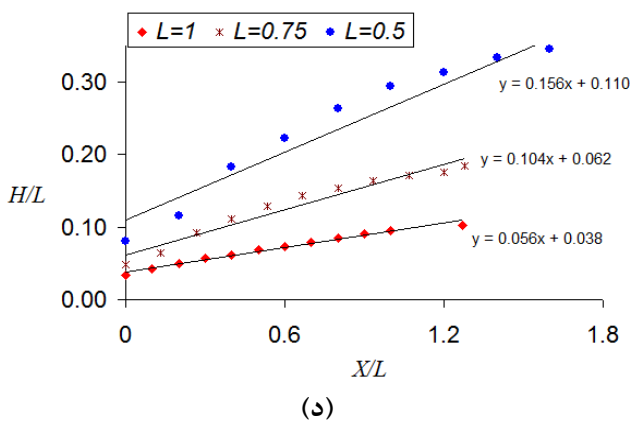
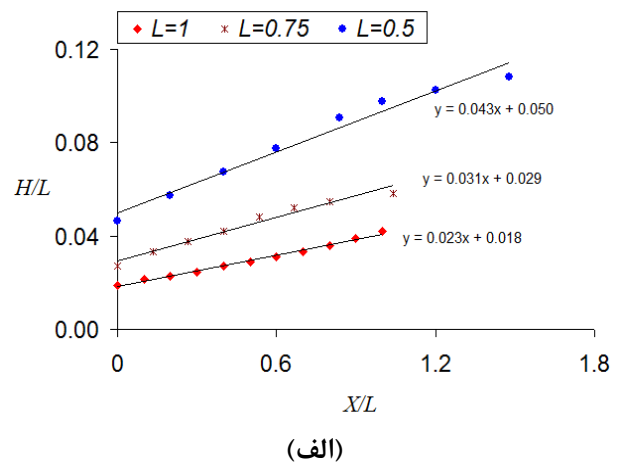
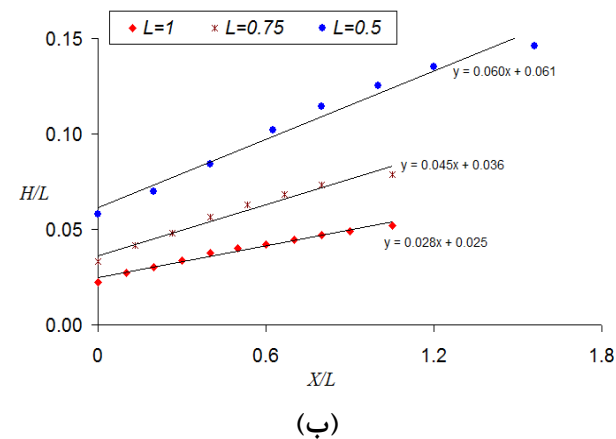
شکل ۳- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در زاویه‌های مختلف شیب جانبی با (الف): $Fr_1 = 3/25$ (ب): $Fr_1 = 7/26$.

ج) تأثیر نسبت همگرایی

شکل ۵ پروفیل بی‌بعد سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به‌ازای $Fr_1 = 7/26$ ، زاویه‌های شیب جانبی ۴۵ و ۶۰ درجه و نسبت‌های همگرایی مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در حالت کلی کاهش نسبت همگرایی تبدیل با افزایش ارتفاع جبهه موج همراه می‌باشد. در واقع به‌ازای طول یکسان دیواره تبدیل کاهش نسبت همگرایی، تغییر ناگهانی مسیر جریان فوق بحرانی را تشدید کرده و در نتیجه آن جریان با شدت بیشتری به دیواره تبدیل برخورد کرده و منجر به افزایش قابل توجه ارتفاع جبهه موج می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۵ با کاهش نسبت همگرایی از مقدار ۱ به ۳ به مقدار ۱ به ۴، روند صعودی مذکور چشمگیرتر بوده به طوری که شیب خط برازش داده شده به بیش از ۲ برابر افزایش یافت. ضمناً در زاویه‌های شیب ۷۰ و ۹۰ درجه، جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با نسبت همگرایی ۱ به ۴ عمدتاً با پدیده انسداد جریان همراه بود.

ب) تأثیر طول دیواره تبدیل

شکل ۴ پروفیل بی‌بعد سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به‌ازای $Fr_1 = 7/26$ و طول‌های دیواره ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ متر در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد به‌ازای عدد فرود، زاویه شیب جانبی دیواره و نسبت همگرایی یکسان، کاهش طول دیواره تبدیل تأثیر به‌سزایی در افزایش ارتفاع امواج و شیب صعودی آن دارد. روند افزایشی مذکور در مدل‌هایی که زاویه شیب جانبی آنها بزرگتر است، نمود بیشتری دارد. با توجه به اینکه یکی از عوامل ایجاد امواج ضربه‌ای در جریان‌های فوق بحرانی کاهش عرض کانال می‌باشد بنابراین هر چقدر کاهش عرض جریان در فاصله کوتاهی صورت پذیرد، تغییر رفتار سیال شدیدتر بوده و منجر به افزایش تصاعدی ارتفاع امواج می‌شود.

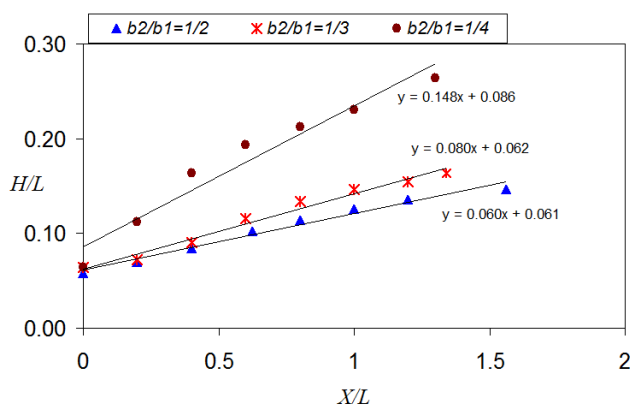


شکل ۴- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در طول‌های مختلف دیواره و $Fr_1 = 7/26$ ، نسبت همگرایی ۱ به ۲ و زاویه شیب جانبی (الف): ۳۵ درجه (ب): ۴۵ درجه (ج): ۶۰ درجه (د): ۹۰ درجه.

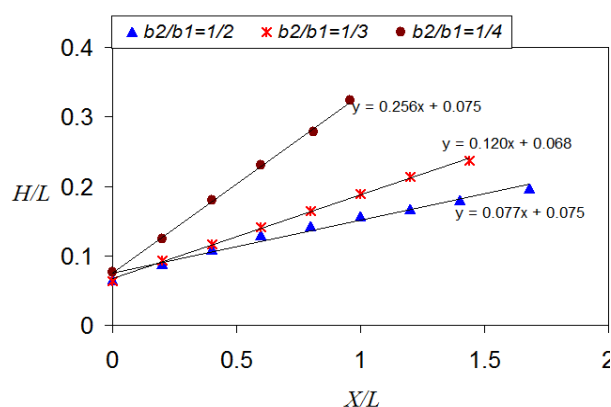
ایجاد شده و برخورد سریع‌تر جریان اصلی کانال با جبهه موج نیز تأثیر افزایشی بر ارتفاع جبهه موج داشته است. همچنین شکل مذکور نشان می‌دهد که به‌ازای نسبت همگرایی، شیب جانبی و طول یکسان دیواره تبدیل‌ها، شیب افزایش ارتفاع امواج تقریباً ثابت می‌باشد. به عبارت دیگر تغییر عدد فرود تأثیر چندانی بر روند تغییرات ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا ندارد.

د) تأثیر عدد فرود جریان

شکل ۶ پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به ازای اعداد فرود مختلف در مدل‌های ۷، ۱۰، ۹ و ۱۲ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود جریان، افزایش ارتفاع امواج ضربه‌ای را به دنبال دارد. زیرا همزمان با افزایش عدد فرود، سرعت برخورد جریان نزدیک شونده به ابتدای دیواره تبدیل نیز افزایش یافته که در نتیجه آن موج ضربه‌ای با ارتفاع بزرگتری

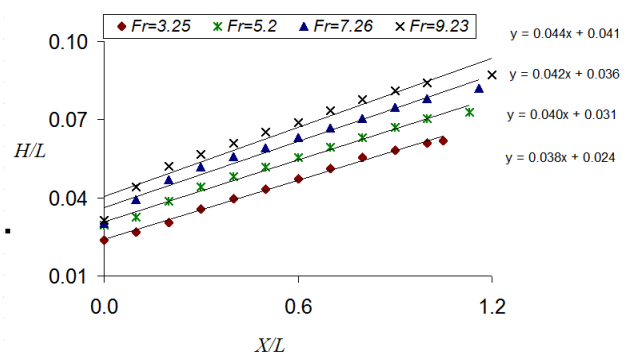


(ب)

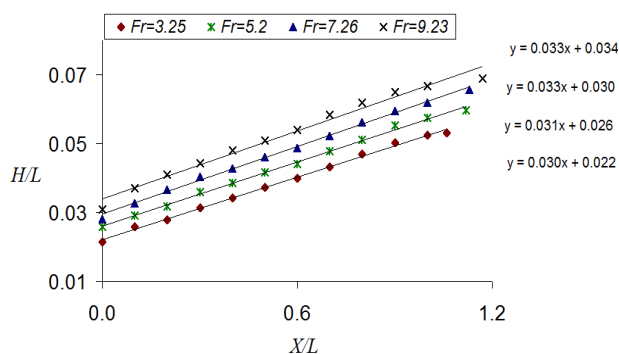


(الف)

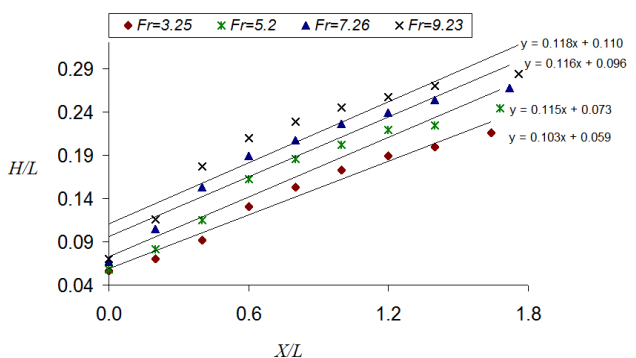
شکل ۵- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای با $Fr_1 = 7/26$ در نسبت‌های همگرایی مختلف و زاویه شیب جانبی (الف): ۴۵ درجه (ب): ۶۰ درجه.



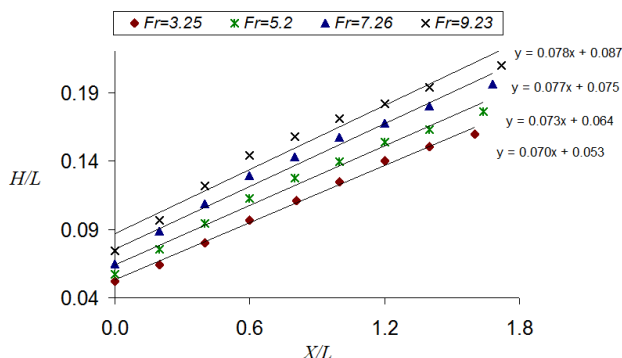
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

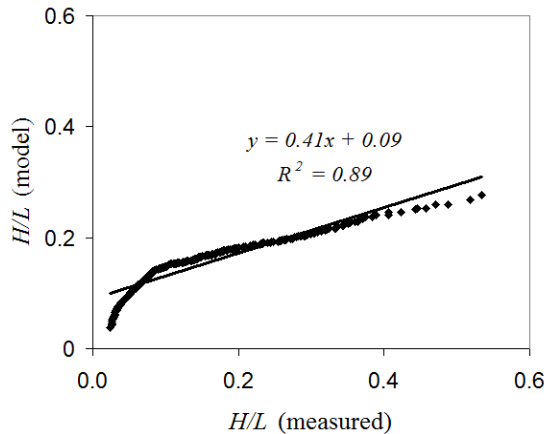
شکل ۶- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در اعداد فرود مختلف با طول دیواره و زاویه شیب جانبی (الف): ۱ متر و ۶۰ درجه (ب): ۱ متر و ۷۰ درجه (ج): ۰/۵ متر و ۶۰ درجه (د): ۰/۵ متر و ۷۰ درجه.

(ه) رابطه ارتفاع امواج ضربه‌ای

افزار SPSS انجام گرفت (سمیع‌زاده ۱۳۹۱) و در نهایت رابطه ۴ بدست آمد. لازم به ذکر است که پس از به-کارگیری انواع مختلف رگرسیون‌های غیرخطی و مقایسه نتایج آنها با رگرسیون خطی، در نهایت رگرسیون خطی نتیجه بهتری را به همراه داشت. رابطه

برای بررسی اینکه کدامیک از متغیرهای مورد مطالعه در تحقیق حاضر بیشترین تأثیر را بر روی ارتفاع امواج ضربه‌ای دارد و همچنین استخراج رابطه‌ای بدون بعد بر اساس تحلیل ابعادی انجام شده، تحلیل داده‌ها با نرم-

پیش‌بینی ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا می‌باشد.



شکل ۷- نمودار نکویی برازش در مرحله صحت‌سنجی.

در تحقیق نیکپور (۱۳۹۲) نرخ کاهش بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با دیواره انحنادار نسبت به دیواره مستقیم به‌ازای اعداد فرود مختلف بررسی شد. در جدول ۲ تأثیر شیب جانبی و انحای دیواره تبدیل بر روی بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای در نسبت همگرایی ۲ به ۱، طول دیواره ۰/۵ متر و عدد فرود مشابه ۷/۲۶ مقایسه شده است. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود به‌منظور کاهش بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای، وجود شیب جانبی دیواره تبدیل موثرتر از انحای دیواره می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع نوزنقه‌ای و مستطیلی با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

- در حالت کلی در تبدیل‌های همگرا حرکت جبهه امواج ضربه‌ای با افزایش ارتفاع آن همراه می‌باشد.
- افزایش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل همگرا علاوه بر افزایش ارتفاع امواج ضربه‌ای موجب

۴ به ازای ۷۰ درصد از کل داده‌ها (۱۳۵۸ داده) که در نقاط مختلف جبهه امواج (به ازای شرایط هندسی و اعداد فرود متفاوت) اندازه‌گیری شده بود، حاصل شد.

$$\left(\frac{H}{L}\right) = 0.056 + 0.08\left(\frac{X}{L}\right) + 0.006 Fr_1 \quad [4]$$

$$- 0.357\left(\frac{b_2}{b_1}\right) + 0.002\alpha$$

$$R^2 = 0.75$$

مطابق نتایج رگرسیون چندمتغیره، همه متغیرهای مستقل X/L ($t=32.975$, $P<0.000$), Fr_1 ($t=11.303$, $P<0.000$), b_2/b_1 ($t=-28.934$, $P<0.000$) و α ($t=25.772$, $P<0.000$) واجد شرایط برآورد مقدار متغیر وابسته (H/L) هستند. از سوی دیگر، بر اساس ضریب معیاری بتا^۹ که به‌عنوان مقیاسی از اهمیت نسبی متغیرهای مستقل بر تبیین میزان متغیر وابسته تحقیق به‌کار برده می‌شود، مهمترین متغیر تبیین‌کننده متغیر وابسته تحقیق (H/L) ، متغیر X/L می‌باشد. به‌عبارت دیگر پارامتر X/L بیشترین تأثیر را بر روی ارتفاع امواج ضربه‌ای به همراه دارد و پارامترهای α ، b_2/b_1 و Fr_1 به‌ترتیب در مراتب بعدی قرار دارند. همچنین نتایج آزمون همبستگی نشان داد که اولاً رابطه معنی‌داری بین همبستگی متغیر وابسته و متغیرهای مستقل تحقیق در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد وجود دارد. ثانیاً بین ارتفاع امواج ضربه‌ای با متغیرهای α ، Fr_1 و X/L همبستگی مثبت (مستقیم) و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد وجود دارد اما بین ارتفاع امواج با متغیر b_2/b_1 همبستگی منفی (معکوس) و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد وجود دارد. بیشترین میزان همبستگی متغیر وابسته با متغیر X/L (به‌ازای ضریب همبستگی ۰/۵۹۲) می‌باشد. ۳۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده نیز برای صحت‌سنجی رابطه ۴ استفاده شد. در شکل ۷ مقادیر محاسباتی توسط رابطه ۴ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در مرحله صحت‌سنجی آورده شده است. ضریب تبیین به‌دست آمده ($R^2=0.89$) حاکی از دقت قابل قبول رابطه ۴ در

⁹ Beta coefficient

- تسریع روند افزایشی آن در طول حرکت جبهه موج می‌شود. - کاهش طول دیواره تبدیل تأثیر قابل توجهی بر افزایش ارتفاع امواج و همچنین شیب صعودی آن دارد.

جدول ۲- مقایسه تأثیر شیب جانبی و انحنای دیواره تبدیل بر روی بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای.

شماره مدل	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (degree)	نوع دیواره	بیشینه ارتفاع موج ضربه‌ای (cm)	نرخ کاهش ارتفاع نسبت به مدل ۲۲ (%)
۳	۳۵	مستقیم	۵/۴۰	۶۹/۵
۶	۴۵	مستقیم	۷/۳۱	۵۸/۷
۹	۶۰	مستقیم	۹/۸۲	۴۴/۵
۱۲	۷۰	مستقیم	۱۳/۳۸	۲۴/۴
۲۲	۹۰	مستقیم	۱۷/۷۰	-
نیکپور (۱۳۹۲)	۹۰	انحنادار	۱۴/۲۵	۱۹/۵

- به‌ازای طول یکسان دیواره تبدیل، کاهش نسبت همگرایی در صورتی‌که منجر به بروز پدیده انسداد نشود، تأثیر افزایشی بر روی ارتفاع امواج ضربه‌ای و سیر صعودی آن دارد.
- به‌ازای متغیرهای هندسی یکسان، متناسب با افزایش عدد فرود جریان، ارتفاع امواج ضربه‌ای نیز افزایش می‌یابد اما تغییر عدد فرود تأثیر چندانی بر تغییرات ارتفاع امواج در تبدیل‌های همگرا ندارد.
- بررسی اثر پارامترهای مذکور بر روی ارتفاع امواج ضربه‌ای نشان داد که پارامترهای مؤثر به‌ترتیب طول دیواره تبدیل، زاویه شیب جانبی، نسبت همگرایی و عدد فرود می‌باشند. ضمن
- اینکه رابطه‌ای بی‌بعد با ضریب تبیین ۸۹٪ برای محاسبه ارتفاع امواج ضربه‌ای بدست آمد. رابطه مذکور برای مهندسان طراح می‌تواند بسیار مفید باشد.
- بر اساس یافته‌های این تحقیق بهتر است طراحی تبدیل‌های همگرا در جریان فوق بحرانی برای کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای و جلوگیری از اثرات تخریبی آن، در حد امکان زاویه شیب جانبی کوچکتر و طول دیواره تبدیل بزرگتر در نظر گرفته شود و ایجاد امواج ضربه‌ای در مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار بگیرد.

منابع مورد استفاده

- سمیع‌زاده ر، ۱۳۹۱. آموزش کاربردی SPSS 13.0 (تألیف). انتشارات خانیان، تهران.
- نیکپور م، ۱۳۹۲. بررسی جریان‌های فوق بحرانی در تبدیل کانال‌های روباز با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی. رساله دکتری تخصصی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- Bhalla SM and Chaudhry MH, 1992. Computation of flows in open-channel transitions. Journal of Hydraulic Research 30(1): 77-93.
- Causon DM, Mingham CG and Ingram DM, 1999. Advances in calculation methods for supercritical flow in spillway channels. Journal of Hydraulic Engineering 125(10): 1039-1050.

- Ghostine R, Hoteit I, Vazquez J, Terfousd A, Ghenaime A and Mosef R, 2014. Comparison between a coupled 1D-2D model and a fully 2D model for supercritical flow simulation in crossroads. *Journal of Hydraulic Research* 53(2): 274-281.
- Gonzalo R, Nania LS and Gómez M, 2014. Influence of channel width on flow distribution in four-branch junctions with supercritical flow: Experimental Approach. *Journal of Hydraulic Engineering* 140(1): 77-88.
- Jan CD, Chang CJ, Lai JS and Guo WD, 2009. Characteristics of hydraulic shock waves in an inclined chute contraction – Experiments. *Journal of Mechanics* 25(2): 129-136.
- Kolarević M, Savić L, Kapor R and Mladenović N, 2013. Supercritical flow in circular pipe bends. Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, *Scientific Journal* 42: 128-133.
- Krüger S and Rutschmann P, 2006. 3D Modeling supercritical flow with extended shallow-water approach. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(9): 916-926.
- Reinauer R and Hager W, 1998. Supercritical flow in chute contraction. *Journal of Hydraulic Engineering* 124(1): 55-64.