

## تأثیر هندسه تبدیل همگرا بر پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای

محمدرضا نیک پور<sup>1\*</sup> - داود فرسادی زاده<sup>2</sup> - علی حسین زاده دلیر<sup>3</sup> - جواد بهمنش<sup>4</sup> - فرزین سلماسی<sup>5</sup>

تاریخ دریافت: 1392/2/26

تاریخ پذیرش: 1393/1/26

### چکیده

در مطالعه جریان‌های فوق بحرانی تشکیل امواج ضربه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. این امواج عمدتاً در هنگام عبور جریان فوق بحرانی در کانال‌های غیر منشوری یافت می‌شوند. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل آزمایشگاهی تأثیر طول و تحدب دیواره تبدیل همگرای کانال روباز بر پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور مقادیر عمق و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرا به‌ازای چهار عدد فرود مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با کاهش طول تبدیل به میزان 63 درصد، مقادیر حداکثر سرعت و ارتفاع امواج به‌طور متوسط 23/6 درصد و  $2/77 \times 10^2$  درصد افزایش یافت. همچنین به‌ازای طول ثابت تبدیل، با تغییر دیواره‌های آن از حالت مستقیم به محدب مقادیر مذکور به‌طور میانگین 6/9 درصد و 35/2 درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: جریان فوق بحرانی، سرعت لحظه‌ای، کانال غیرمنشوری، مدل آزمایشگاهی

### مقدمه

است. بالامادی و چادری (2) به منظور تحلیل جریان در تبدیل‌های همگرا و واگرا معادلات دو بعدی متوسط گرفته شده جریان غیرماندگار در آب‌های کم‌عمق را با استفاده از روش عددی مک-کورمک<sup>8</sup> با شمای صریح<sup>9</sup> مرتبه دوم گسسته و حل نمودند. آنها در تحقیق خود از داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی سایر محققین استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داد هر کجا توزیع فشار به‌صورت هیدرواستاتیک باشد بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مطابقت وجود داشت. در بقیه مناطق و به‌خصوص در مناطقی که جداشدگی جریان وجود داشت مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق پروفیل سطح آب نبود. کروگر و راتشمان (6) با حل معادلات کلاسیک (CSW<sup>10</sup>) و توسعه یافته آب‌های کم‌عمق<sup>11</sup> (ESW) توسط نرم‌افزار FEMTOOL جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا و در تلاقی کانال‌ها را در حالت سه بعدی شبیه‌سازی کردند. در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در سازه‌های مذکور، معادلات ESW نسبت به CSW نتایج بهتری از خود نشان داد. استامو و همکاران (8) با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی مزامدر و هگر (7) جریان فوق بحرانی را در تبدیل واگرای کانال مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به‌صورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند. پس از اجرای مدل عددی به‌ازای چهار

در جریان‌های فوق بحرانی امواج عرضی<sup>6</sup> در سطح جریان به وفور دیده می‌شوند و همین مسأله وجه اصلی تمایز جریان‌های فوق بحرانی و زیربحرانی است (4). امواج عرضی به‌وجود آمده در جریان‌های سریع کانال‌های روباز شبیه امواج ضربه‌ای در جریان‌های مافوق صوت گازها می‌باشد. از این رو به امواج عرضی ایجاد شده در جریان‌های فوق بحرانی، امواج ضربه‌ای<sup>7</sup> نیز گفته می‌شود (3). وجود عارضه‌هایی مانند تنگ شدگی، گشاد شدگی، بالا آمدگی و پایین افتادگی کف، خم‌ها و... در مسیر کانال‌های دارای جریان فوق بحرانی باعث تغییر ناگهانی در عمق و سرعت جریان شده و تشکیل امواج ضربه‌ای را به دنبال خواهد داشت. در مطالعه جریان‌های فوق بحرانی تشکیل امواج ضربه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. در اثر بروز این امواج یک الگوی آشفتگی تشکیل می‌شود که در مسافت‌های قابل توجهی در پایین دست تأثیر می‌گذارد (3). جریان فوق بحرانی در مجاری روباز و تحت فشار از دیرباز مورد توجه محققین قرار گرفته

1، 2، 3 و 5- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*- نویسنده مسئول: (Email: rezanikpoor@yahoo.com)

4- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

8- MacCormak (MAC)

9- Explicit

10- Classic Shallow Water

11- Extended Shallow Water Equations

6- Cross Wave

7- Shock wave

لوله رانش پمپ نصب شده بود، تنظیم می‌شد. در ورودی فلوم یک دریچه کشویی فولادی لبه‌تیز به ضخامت 3 میلی‌متر و ارتفاع 1/2 متر به‌منظور تنظیم سطح آب ورودی و کنترل عدد فرود نصب شده بود. در قسمت خروجی فلوم، یک مخزن تخلیه<sup>2</sup> برای هدایت آب به کانال زهکش و سپس مخزن زیرزمینی آزمایشگاه طراحی شده بود. در طی آزمایشات از چهار ورق پلگسی گلاس به ضخامت 6 میلی‌متر، طول 1 متر و ارتفاع 30 سانتی‌متر به‌منظور ایجاد کانال‌های بالادست و پایین دست تبدیل‌ها استفاده شد. برای دیواره‌های تبدیل‌ها نیز از شش ورق پلگسی گلاس به ضخامت 6 میلی‌متر، طول 1/5 متر و ارتفاع 30 سانتی‌متر استفاده گردید. به منظور نصب دیواره‌های تبدیل و همچنین کانال‌های بالادست و پایین دست، یک کف کاذب از جنس پلی‌اتیلن فشرده به ضخامت 1 سانتی‌متر، طول 3/5 متر و عرض 1 متر در ابتدای فلوم کار گذاشته شد. به‌منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا، در کلیه آزمایشات میزان بازشدگی دریچه کشویی 2 سانتی‌متر و عرض کانال‌های بالادست و پائین دست به ترتیب برابر 80 و 40 سانتی‌متر (نسبت همگرایی برابر 0/5) در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی سنج صوتی مدل UFM610P، با دقت  $\pm 0/02$  لیتر بر ثانیه که حسگرهای آن بر روی لوله آبرسان فلوم نصب شده بود، انجام گرفت. جهت اندازه‌گیری ارتفاع سطح امواج از عمق سنج نقطه‌ای با دقت اندازه‌گیری  $\pm 0/1$  میلی‌متر استفاده شد. همچنین به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در نقاط مختلف موج از سرعت سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق مدل ACM2-RS با دقت  $\pm 0/5$  سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد. آزمایشات به‌ازای چهار عدد فرود جریان 3/2، 5/4، 7/0 و 9/1 در بالادست تبدیل انجام گرفت. لازم به ذکر است که تغییر عدد فرود در طی آزمایشات از طریق تغییر ارتفاع آب در مخزن هد حاصل شد که در جدول 1 مقادیر آن آورده شده است. در این جدول، Q نشان دهنده دبی ورودی به مخزن، H ارتفاع آب مخزن،  $\gamma$  عمق آب خروجی بلافاصله از زیر دریچه کشویی و  $Fr_1$  عدد فرود متناظر با آن در کانال بالادست می‌باشد.

به منظور بررسی تأثیر هندسه تبدیل بر پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای، سه مدل از تبدیل‌های همگرا با هندسه‌های متفاوت به کار گرفته شد. مشخصات تبدیل‌های همگرای مورد استفاده در این تحقیق در جدول 2 آورده شده است.

مدل‌های 1 و 2 به منظور بررسی تأثیر طول دیواره تبدیل و مدل‌های 2 و 3 به منظور بررسی تأثیر انحنای دیواره تبدیل بر امواج ضربه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به ذکر است که شعاع انحنای دیواره‌های محدب مدل 3، 0/63 متر می‌باشد. شعاع انحنای مذکور به‌گونه‌ای انتخاب شد که در فاصله طولی 0/55 متر، عرض کانال را از

عدد فرود مختلف، پروفیل سطح آب استخراج و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید که از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار بودند. منتظری نمین و همکاران (9) به‌منظور شبیه‌سازی الگوی جریان فوق بحرانی در خم کانال در محیط نرم افزار FLUENT، از مدل حجم سیال و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده کردند. پروفیل سطح امواج تشکیل شده در قوس خارجی و داخلی خم در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با دقت مناسبی شبیه‌سازی شده بود. جعفرزاده و همکاران (5) به‌منظور کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای در خم‌ها، یک گوشه محدب در ورودی یک خم آزمایشگاهی ایجاد کردند. امواج منفی تشکیل شده از گوشه محدب با اولین موج مثبت منتشر شده از قوس خارجی خم متداخل شده و کاهش ارتفاع موج مثبت را به همراه داشت. همچنین از روش عددی Roe برای تعیین ابعاد مناسب گوشه محدب فوق برای به حداقل رساندن ارتفاع امواج مثبت و هموار کردن سطح جریان در کانال پایین‌دست استفاده کردند. جعفرزاده و علامتیان (1) با حل معادلات دو بعدی متوسط گرفته شده آب‌های کم‌عمق در تبدیل‌ها با استفاده از روش‌های عددی مک کورمک (با شبکه ثابت و تطبیقی) و لاکس-وندروف<sup>1</sup> (با شبکه ثابت) و همچنین با استفاده از مدل آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا را شبیه سازی کردند. در طی آزمایشات پروفیل سطح آب در امتداد دیواره و محور مرکزی تبدیل برداشت گردید. در نهایت روش مک کورمک با شبکه تطبیقی هم‌خوانی بیشتری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. روش مذکور به خوبی قادر است پیشانی تیز امواج را شبیه‌سازی کند و همچنین زمان محاسباتی را نسبت به شبکه ثابت به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط محققین به اندازه‌گیری و تحلیل پروفیل سرعت امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرا و واگرا کمتر پرداخته شده است، لذا هدف از تحقیق حاضر تحلیل و بررسی آزمایشگاهی مقادیر عمق و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرا با دیواره‌های مستقیم و محدب می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

کلیه مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول 6 متر، عرض 1 متر و ارتفاع دیواره‌های 0/7 متر انجام گرفت. در بالادست فلوم یک مخزن به منظور تأمین هد به طول 1/75 متر، عرض 1/65 متر و ارتفاع 1/20 متر نصب شده بود. آب از مخزن زیرزمینی به داخل مخزن هد پمپاژ شده و پس از عبور از تبدیل مخزن وارد فلوم می‌گردید. لازم به ذکر است که دبی ورودی به مخزن هد توسط شیر فلکه‌ای که بر روی

2- Tail tank

1- Lax-Wendroff

0/8 متر به 0/4 متر تبدیل کند. شکل 1 نمایی از تبدیل‌های همگرای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول 1- مشخصات آزمایشات

| Q (lit/s) | H (m) | y (m) | Fr <sub>1</sub> |
|-----------|-------|-------|-----------------|
| 19/1      | 0/79  | 0/018 | 3/2             |
| 32/4      | 0/90  | 0/018 | 5/4             |
| 38/6      | 0/98  | 0/017 | 7/0             |
| 46/3      | 1/08  | 0/016 | 9/1             |

جدول 2- مشخصات تبدیل‌های همگرا

| شماره مدل | نوع دیواره | طول تبدیل |
|-----------|------------|-----------|
| 1         | مستقیم     | 1/5 متر   |
| 2         | مستقیم     | 0/55 متر  |
| 3         | محدب       | 0/55 متر  |

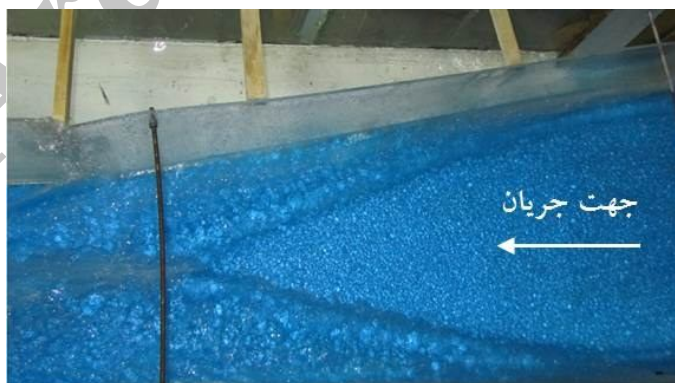


(ج)

(ب)

(الف)

شکل 1- نمای بالادست تبدیل‌های همگرا (الف): تبدیل مدل 1 (ب): تبدیل مدل 2 (ج): تبدیل مدل 3



شکل 2- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل مدل 1 به ازای Fr<sub>1</sub>=7



شکل 3- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل مدل 2 به ازای  $Fr_1 = 7$



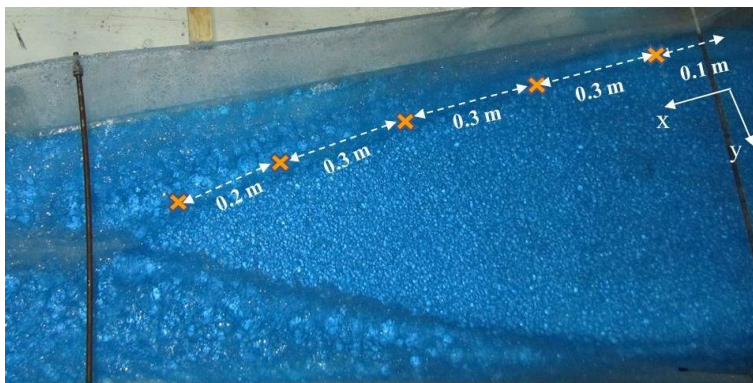
شکل 4- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل مدل 3 به ازای  $Fr_1 = 7$

هر نقطه، 5 ثانیه در نظر گرفته شده بود که در طی زمان مذکور 100 مؤلفه لحظه‌ای سرعت در جهت‌های طولی و عرضی موج (u و v) اندازه‌گیری شده و میانگین آنها ( $\bar{u}$  و  $\bar{v}$ ) به عنوان مؤلفه‌های سرعت نقطه مورد نظر ثبت می‌گردید. در شکل‌های 5 و 6 محل‌های اندازه‌گیری سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های مدل‌های 1 و 2 به صورت شماتیک نمایش داده شده است. از سوی دیگر همانطور که اشاره شد به علت یکسان بودن طول دیواره تبدیل مدل‌های 2 و 3، امواج تشکیل یافته در این دو تبدیل از لحاظ نحوه تشکیل و ارتفاع تقریباً با هم برابرند لذا محل‌های اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای امواج در تبدیل مدل 3 همانند مدل 2 بود.

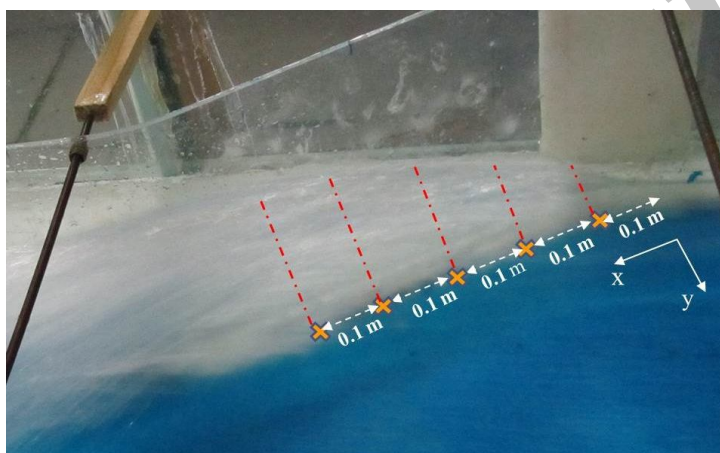
پروفیل سطح امواج نیز در طول حرکت جبهه موج با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری گردید. با توجه به شدت بالای آشفتگی جریان و اختلاط آب و هوا، احتمال بروز خطا در هنگام قرائت پروفیل سطح آب وجود داشت. به منظور به حداقل رساندن خطای مذکور در هر نقطه چندین بار مقدار عمق اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان ارتفاع موج نقطه مورد نظر ثبت می‌گردید.

پس از تنظیم و تثبیت ارتفاع آب در مخزن هد (با استفاده از اشل دیواره مخزن) به‌ازای اعداد فرود مذکور در جدول 1، با عبور آب از زیر دریچه کشویی جریان فوق بحرانی در داخل کانال برقرار می‌گردید. به محض رسیدن جریان فوق بحرانی به ابتدای تبدیل، امواج ضربه‌ای از ابتدای دیواره‌های تبدیل به صورت مورب شروع شده و به هم برخورد می‌کنند. شکل‌های 2 تا 4 نمونه‌ای از امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرا را به‌ازای  $Fr_1 = 7$  نشان می‌دهد.

پس از برقراری شرایط جریان ماندگار و پایدار شدن الگوی امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها، مقادیر سرعت لحظه‌ای در طول حرکت جبهه موج از فاصله 10 سانتی‌متری ابتدای تشکیل موج در پنج مقطع به فواصل طولی 30 سانتی‌متر در مدل 1 و 10 سانتی‌متر در مدل‌های 2 و 3 توسط سرعت‌سنج اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین در مدل 1 در هر راستای قائم، از فاصله 5 میلی‌متری بستر تا 5 میلی‌متری سطح موج در فواصل عمودی 5 میلی‌متری اندازه‌گیری سرعت انجام شد. در مدل‌های 2 و 3 نیز برداشت قائم سرعت از فاصله 5 میلی‌متری بستر تا 1 سانتی‌متری سطح موج در فواصل عمودی 1 سانتی‌متری انجام گرفت. لازم به ذکر است که مدت زمان برداشت داده‌های سرعت در



شکل 5- محل‌های اندازه‌گیری سرعت در تبدیل مدل 1



شکل 6- محل‌های اندازه‌گیری سرعت در تبدیل مدل 2

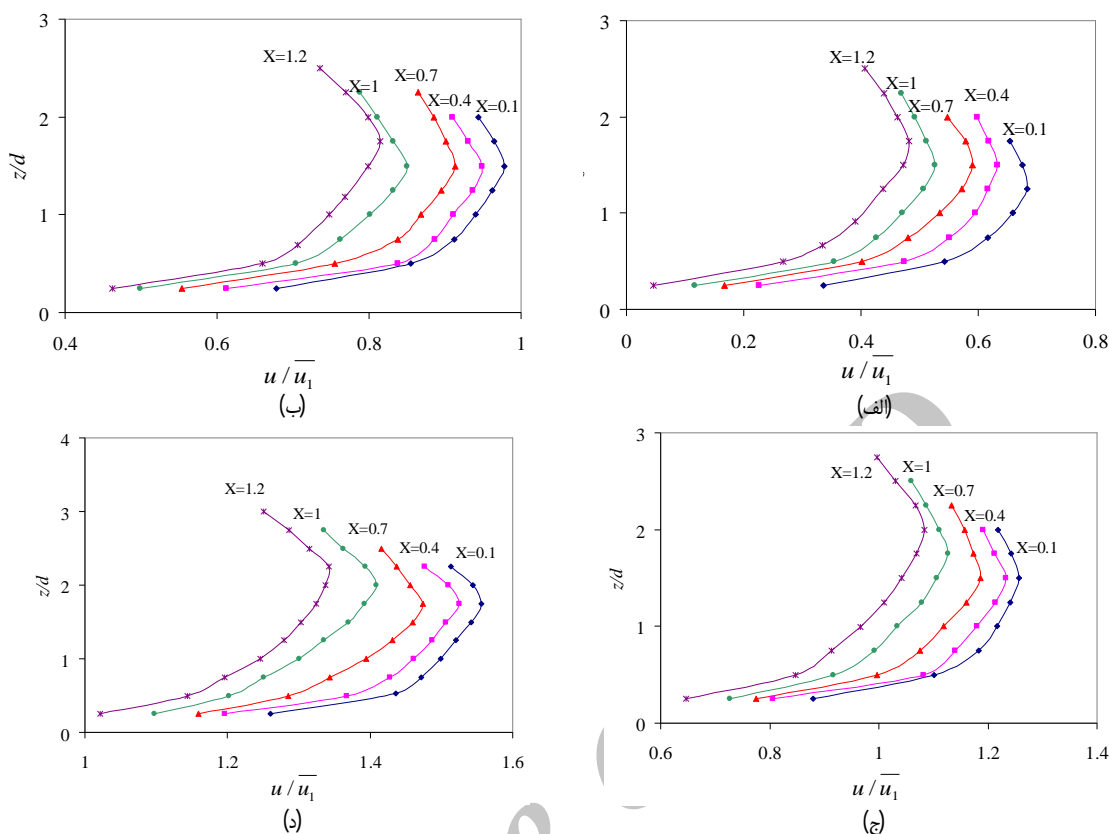
می‌کند. در واقع اختلاط آب و هوا در سطح موج باعث کاهش سرعت آن می‌شود، به عبارت دیگر هوا به‌عنوان مانعی برای سرعت عمل می‌کند. بر این اساس برای هر پروفیل سرعت می‌توان دو ناحیه مجزا در نظر گرفت، ناحیه افزایش سرعت (ناحیه اول) و ناحیه کاهش سرعت (ناحیه دوم). در جداول 3 و 4 میزان کاهش سرعت موج در ناحیه دوم، در مقاطع  $X=0/1$  و  $X=0/4$  برای هر سه مدل آورده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ذکر شده در این جداول از اختلاف مقادیر حداکثر سرعت موج و سرعت در نزدیکی سطح موج حاصل شده است. از سوی دیگر در طول حرکت جبهه موج، سرعت موج کاهش و ارتفاع آن افزایش یافته است. برخورد اولین موج مورب با جریان اصلی کانال باعث استهلاک انرژی جنبشی اغتشاش<sup>1</sup> و افزایش ارتفاع موج شده و کاهش سرعت موج را به دنبال داشته است.

## نتایج و بحث

در شکل‌های 7 تا 9 پروفیل‌های سرعت در امتداد حرکت امواج ضربه‌ای به‌ازای اعداد فرود آزمایشات در مدل‌های 1 تا 3 نمایش داده شده است. در شکل‌های مذکور منظور از  $X$  فاصله طولی بر حسب متر نسبت به مبدأ تشکیل موج و در امتداد حرکت جبهه موج می‌باشد. در شکل‌های مذکور پارامترهای  $u$ ،  $d$ ،  $z$  و  $u_1$  به ترتیب نمایانگر فاصله قائم از کف، میزان گشودگی دریچه، سرعت لحظه‌ای در جهت طولی و میانگین سرعت جریان عبوری از زیر دریچه کشویی به‌ازای اعداد فرود مختلف می‌باشد. شکل‌های 10 تا 12 نیز تغییرات ارتفاع جبهه موج را در امتداد حرکت آن به‌ازای اعداد فرود مختلف در مدل‌های مذکور نشان می‌دهند.

پروفیل‌های بدست آمده برای کلیه مدل‌ها نشان می‌دهند که توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربه‌ای یکنواخت نمی‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار سرعت با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، شروع به کاهش

1- Dissipation of turbulence kinetic energy



شکل 7- پروفیل‌های سرعت موج ضربه‌ای در مدل 1 به‌ازای اعداد فرود مختلف  
 (الف):  $Fr_1 = 3/2$ ; (ب):  $Fr_1 = 5/4$ ; (ج):  $Fr_1 = 7/0$ ; (د):  $Fr_1 = 9/1$

جدول 3- میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم در  $X=0/1$

| $Fr_1 = 9/1$ | $Fr_1 = 7/0$ | $Fr_1 = 5/4$ | $Fr_1 = 3/2$ |                      |
|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|
| 0/108        | 0/096        | 0/085        | 0/075        | مدل 1 (متر بر ثانیه) |
| 2/402        | 1/868        | 1/331        | 0/842        | مدل 2 (متر بر ثانیه) |
| 1/942        | 1/455        | 0/905        | 0/427        | مدل 3 (متر بر ثانیه) |

جدول 4- میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم در  $X=0/4$

| $Fr_1 = 9/1$ | $Fr_1 = 7/0$ | $Fr_1 = 5/4$ | $Fr_1 = 3/2$ |                      |
|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|
| 0/121        | 0/107        | 0/096        | 0/087        | مدل 1 (متر بر ثانیه) |
| 3/508        | 2/954        | 2/336        | 1/681        | مدل 2 (متر بر ثانیه) |
| 3/075        | 2/556        | 1/956        | 1/287        | مدل 3 (متر بر ثانیه) |

جداول 3 و 4 ملاحظه می‌شود که میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم مدل 2 به مراتب از مدل 1 بیشتر است. با توجه به اینکه یکی از عوامل تشکیل امواج ضربه‌ای در جریان‌های فوق بحرانی کاهش عرض کانال می‌باشد و از سوی دیگر در مدل 2 کاهش عرض جریان نسبت به مدل 1 در فاصله کوتاهی انجام گرفته است لذا تغییر رفتار سیال در این مدل شدیدتر بوده و ارتفاع و سرعت امواج تشکیل شده

با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر طول و تحب دیواره‌های تبدیل بر امواج ضربه‌ای می‌باشد، با استفاده از شکل‌ها و جداول فوق به تأثیر این دو پارامتر پرداخته می‌شود:

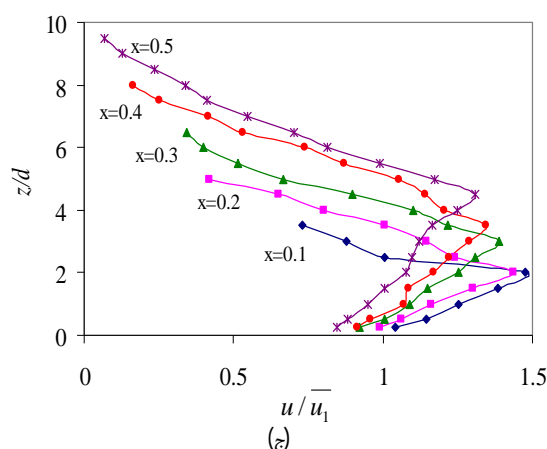
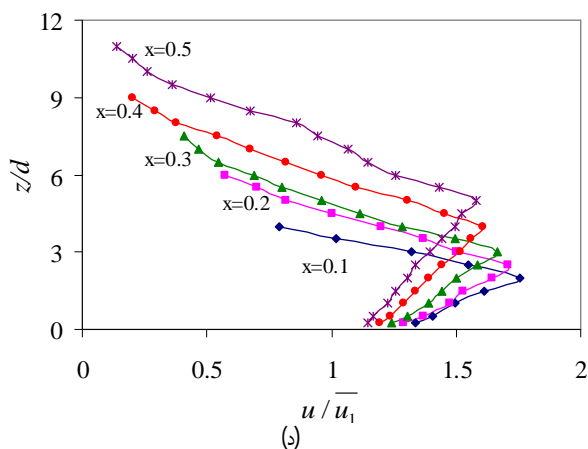
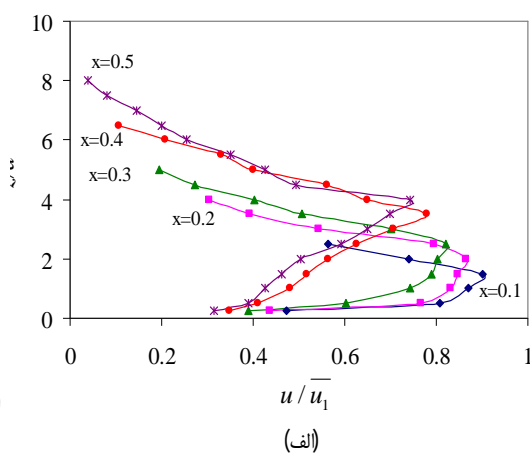
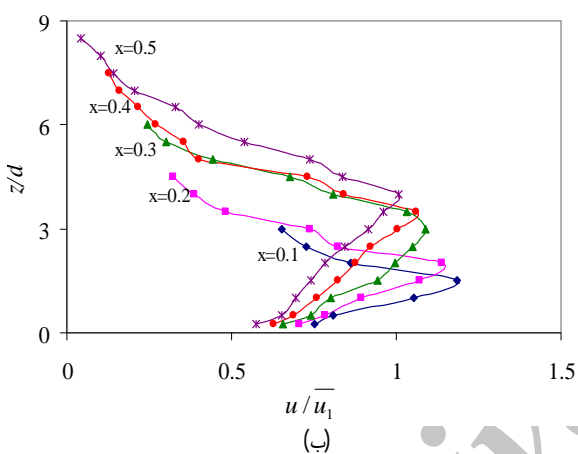
### تأثیر طول تبدیل

با مقایسه شکل‌های 7 و 8 و بر اساس اعداد گزارش شده در

انرژی کمتری نسبت به امواج مدل 2 برخورداری می‌باشند. در جداول 5 و 6 مقادیر حداکثر سرعت و ارتفاع امواج ضربه‌ای به‌زای اعداد فرود مختلف در مدل‌های 1 و 2 به همراه میزان افزایش آنها در مدل 2 نسبت به مدل 1 آورده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ذکر شده حداکثر سرعت به‌زای هر عدد فرود، بر اساس میانگین‌گیری از مقادیر حداکثر سرعت در مقاطع مختلف اندازه‌گیری سرعت موج بدست آمده است.

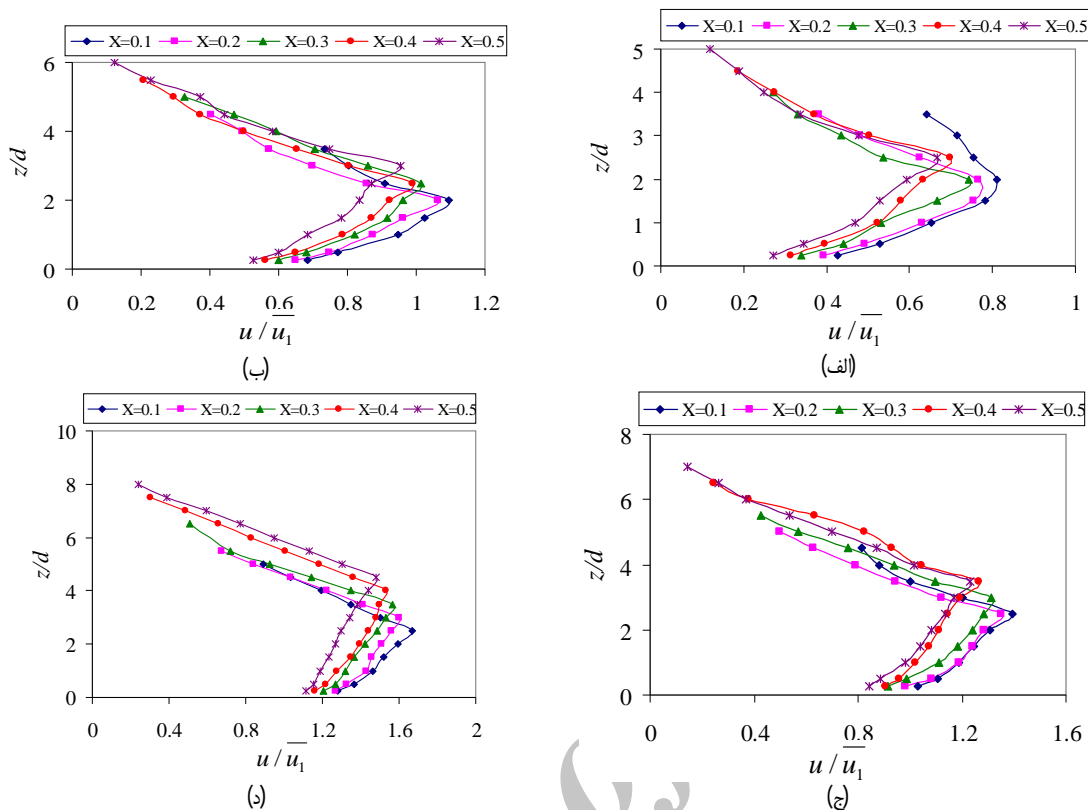
نتایج بدست آمده از جداول 5 و 6 نشان می‌دهد که با کاهش طول تبدیل مدل 1 به اندازه 0/95 متر (63/3 درصد)، مقادیر حداکثر سرعت و ارتفاع امواج به‌طور متوسط 23/6 درصد و  $2/77 \times 10^2$  درصد افزایش یافته است.

نیز بیشتر می‌باشد. به همین خاطر در امواج ضربه‌ای تشکیل شده مدل 2 اختلاط آب و هوا بسیار شدیدتر از مدل 1 بوده و همین عامل، کاهش شدید سرعت را در ناحیه دوم آن به همراه داشته است. با مقایسه شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌شود که ارتفاع جبهه موج در مسیر حرکت آن در مدل 1 با شیب ملایمی افزایش یافته است در صورتی که در مدل 2 پس از تشکیل موج ضربه‌ای ارتفاع آن به‌صورت ناگهانی افزایش یافته و پس از جدا شدن جبهه موج از دیواره تبدیل تا محل تلاقی امواج، افزایش ارتفاع آن به‌صورت ملایم صورت گرفته است. با توجه به اینکه در مدل 1 کاهش عرض کانال به‌صورت تدریجی و در مسیر طولانی‌تری نسبت به مدل 2 انجام گرفته است لذا امواج تشکیل شده در مدل 1 از ارتفاع و سرعت و به عبارت دیگر

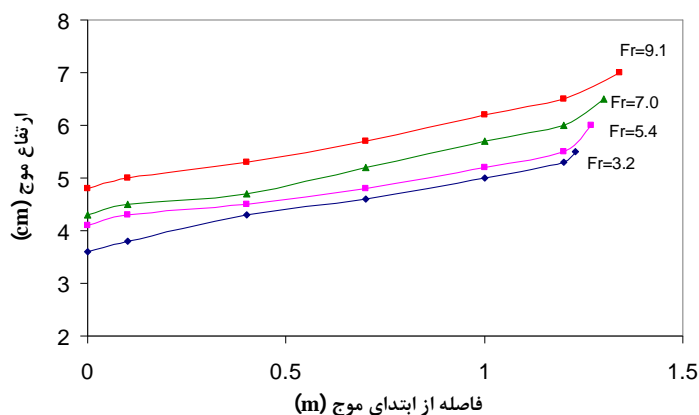


شکل 8- پروفیل‌های سرعت موج ضربه‌ای در مدل 2 به‌زای اعداد فرود مختلف

(الف):  $Fr_1 = 3/2$ ; (ب):  $Fr_1 = 5/4$ ; (ج):  $Fr_1 = 7/0$ ; (د):  $Fr_1 = 9/1$



شکل 9- پروفیل‌های سرعت موج ضربه‌ای در مدل 3 به‌ازای اعداد فرود مختلف  $Fr_1 = 9/1$ : (د)،  $Fr_1 = 7/0$ : (ج)،  $Fr_1 = 5/4$ : (ب)،  $Fr_1 = 3/2$ : (الف)



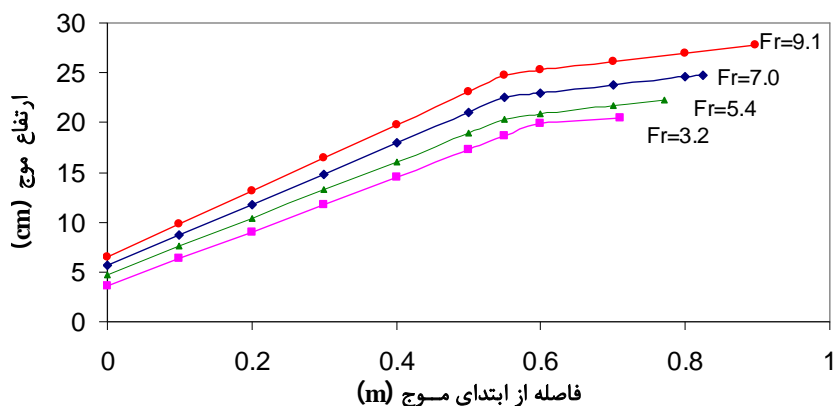
شکل 10- تغییرات ارتفاع امواج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل 1

مدل 2 کمتر می‌باشد. در واقع در مدل‌های 2 و 3 کاهش عرض کانال در فاصله یکسانی انجام گرفته است اما در مدل 3 حالت تحدب دیواره‌ها موجب شده است تا از تلاطم امواج و اختلاط آب و هوا تا حدودی کاسته شده و اختلاف مشاهده شده بین نتایج مدل‌های 2 و 3 نیز به همین دلیل می‌باشد.

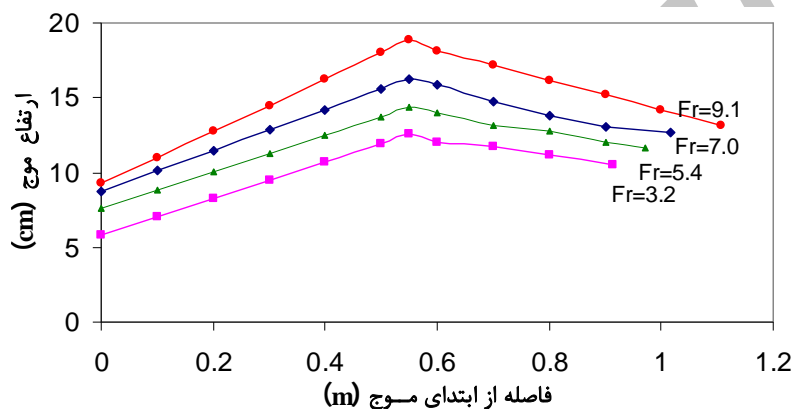
#### تأثیر تحدب دیواره‌ها

با توجه به پروفیل‌های شکل 9 ملاحظه می‌شود که در مدل 3 نیز همانند مدل 2 میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم از شدت نسبتاً بالایی برخوردار است. اما بر اساس اعداد جداول 3 و 4، به‌ازای یک عدد فرود ثابت میزان کاهش سرعت در این مدل به مقدار اندکی از





شکل 11- تغییرات ارتفاع امواج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل 2



شکل 12- تغییرات ارتفاع امواج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل 3

جدول 5- حداکثر سرعت امواج ضربه‌ای در مدل‌های 1 و 2

|                      | $Fr_1 = 9/1$ | $Fr_1 = 7/0$ | $Fr_1 = 5/4$ | $Fr_1 = 3/2$ |         |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| مدل 1 (متر بر ثانیه) | 3/653        | 2/943        | 2/252        | 1/458        |         |
| مدل 2 (متر بر ثانیه) | 4/156        | 3/476        | 2/741        | 2/054        | میانگین |
| نرخ افزایش (درصد)    | 23/6         | 13/8         | 18/1         | 40/9         |         |

جدول 6- حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای در مدل‌های 1 و 2

|                   | $Fr_1 = 9/1$       | $Fr_1 = 7/0$ | $Fr_1 = 5/4$ | $Fr_1 = 3/2$ |         |
|-------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|---------|
| مدل 1 (سانتی‌متر) | 7/13               | 6/51         | 6/07         | 5/52         |         |
| مدل 2 (سانتی‌متر) | 27/80              | 24/78        | 22/31        | 20/45        | میانگین |
| نرخ افزایش (درصد) | $2/77 \times 10^2$ | 289/9        | 280/6        | 267/5        |         |

می‌کنند و همین عامل باعث می‌شود تا فاصله محل تلاقی امواج در مدل 3 نسبت به مدل 2 مقداری افزایش پیدا کند. جداول 7 و 8 نیز مقادیر حداکثر سرعت و ارتفاع امواج ضربه‌ای را به‌زای اعداد فرود مختلف در مدل‌های 2 و 3 به همراه میزان کاهش آنها در مدل 3 نسبت به مدل 2 نشان می‌دهند.

همچنین با مقایسه شکل‌های 12 و 13 مشاهده می‌شود که در هر دو مدل ارتفاع امواج پس از تشکیل به‌صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و این درحالی است که شیب افزایش ارتفاع موج در مدل 3 نسبت به مدل 2 کمتر می‌باشد و از سوی دیگر امواج تشکیل یافته در مدل 3 پس از جدا شدن از دیواره با شیب ملایمی سیر نزولی طی

جدول 7- حداکثر سرعت امواج ضربه‌ای در مدل‌های 2 و 3

|                      | $Fr_1=9/1$ | $Fr_1=7/0$ | $Fr_1=5/4$ | $Fr_1=3/2$ |         |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| مدل 2 (متر بر ثانیه) | 4/156      | 3/476      | 2/741      | 2/054      |         |
| مدل 3 (متر بر ثانیه) | 3/926      | 3/277      | 2/558      | 1/851      | میانگین |
| نرخ کاهش (درصد)      | 6/9        | 5/5        | 5/7        | 6/7        | 9/9     |

جدول 8- حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای در مدل‌های 2 و 3

|                   | $Fr_1=9/1$ | $Fr_1=7/0$ | $Fr_1=5/4$ | $Fr_1=3/2$ |         |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| مدل 2 (سانتی‌متر) | 27/80      | 24/78      | 22/31      | 20/45      |         |
| مدل 3 (سانتی‌متر) | 18/86      | 16/25      | 14/36      | 12/56      | میانگین |
| نرخ کاهش (درصد)   | 35/2       | 32/2       | 34/4       | 35/6       | 38/6    |

میزان اختلاف‌ها افزوده شد. همچنین با مقایسه نتایج مدل‌های 2 و 3 مشاهده شد که به‌ازای طول ثابت تبدیل، با تحذب دیواره‌های تبدیل تا حدودی از شدت تلاطم امواج و اختلاط آب و هوا کاسته شده و در نتیجه آن میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم و همچنین اندازه ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای کاهش یافت. در نهایت نتایج نشان داد که با کاهش طول تبدیل به میزان 63/3 درصد، مقادیر حداکثر سرعت و ارتفاع امواج به‌طور متوسط 23/6 درصد و  $2/77 \times 10^2$  درصد افزایش یافت. همچنین به‌ازای طول ثابت تبدیل، با تغییر دیواره‌های آن از حالت مستقیم به محدب مقادیر مذکور به‌طور میانگین 6/9 درصد و 35/2 درصد کاهش یافت. نتایج کلی تحقیق حاضر نشان داد که به‌ازای نسبت همگرایی ثابت، کاهش زاویه همگرایی (افزایش طول دیواره تبدیل) نسبت به محدب کردن دیواره‌ها تأثیر بهتری بر کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای دارد. بر این اساس توصیه می‌شود که در هنگام طراحی تبدیل‌های همگرا در حالت عبور جریان فوق بحرانی به منظور به حداقل رساندن ارتفاع امواج ضربه‌ای و اثرات مخرب آن، کوچک‌ترین زاویه همگرایی ممکن انتخاب شود و در صورت وجود محدودیت در انتخاب طول دیواره تبدیل قبل از اجرای مدل واقعی، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و یا عددی پدیده تشکیل امواج بررسی شود.

نتایج بدست آمده از جداول فوق نشان می‌دهد که به‌ازای طول ثابت تبدیل، با تغییر دیواره‌های آن از حالت مستقیم به محدب مقادیر حداکثر سرعت و ارتفاع امواج به‌طور میانگین 6/9 درصد و 35/2 درصد کاهش یافته است.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در هر سه مدل توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربه‌ای یکنواخت نمی‌باشد به‌طوری‌که مقدار سرعت با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر در اثر اختلاط آب و هوا در سطح موج شروع به کاهش می‌کند. در هر سه مدل با افزایش عدد فرود و با پیشروی جبهه موج بر شدت تلاطم موج و اختلاط آب و هوا افزوده شده و سرعت موج در ناحیه دوم پروفیل سرعت با شدت بیشتری کاهش یافت. با مقایسه نتایج مدل‌های 1 و 2 مشاهده گردید که ارتفاع و سرعت امواج تشکیل شده در مدل 2 به مقدار قابل ملاحظه‌ای از مدل 1 بزرگتر بود و علاوه بر آن میزان کاهش سرعت موج در ناحیه دوم مدل 2 به مراتب از مدل 1 بیشتر بود. کاهش ناگهانی عرض کانال در مدل 2 که با برخورد سریع خطوط جریان با دیواره‌های تبدیل و تشدید اختلاط آب و هوا همراه بود، باعث اختلاف‌های مذکور شده و با افزایش عدد فرود بر

### منابع

- 1- جعفرزاده م. و علامتیان الف. 1388. تحلیل عددی جریان در تبدیل‌ها با استفاده از شبکه تطبیقی. مجله تحقیقات منابع آب ایران 3: 48-55.
- 2- Bhallamudi S.M., and Chaudhry M.H. 1992. Computation of flows in open-channel transitions. Journal of Hydraulic Research IAHR, 30(1): 77-93.
- 3- Chow V.T. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Publisher, Michigan.
- 4- Hager W.H. 1989. Supercritical flow in channel junction. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 115(5): 595-616.
- 5- Jaefarzadeh M.R., Shamkhalchian A., and Jomehzadeh M. 2012. Supercritical flow profile improvement by means of a convex corner at a bend inlet. Journal of Hydraulic Research IAHR, 50(6): 623-630.
- 6- Krüger S., and Rutschmann P. 2006. Modeling 3D supercritical flow with extended shallow-water approach. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, 132(9): 916-926.

- 7- Mazumder S.K., and Hager W.H. 1993. Supercritical expansion flow in Rouse modified and reversed transitions. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 119(2): 201-219.
- 8- Stamou A., Chapsas D., and Christodoulou G. 2008. 3-D numerical modeling of supercritical flow in gradual expansions. *Journal of Hydraulic Research IAHR*, 46(3): 402-409.
- 9- Montazeri-Namin M., Ghazanfari-Hashemi R., and Ghaeini-Hessaroeeyeh M. 2012. 3D numerical simulation of supercritical flow in bends of channel. p. 167-171. *International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering*, 7-8 Jan. Dubai, United Arab Emarates.

Archive of SID



## Effect of Contraction Geometry on Hydraulic Parameters of Shock Waves

M.R. Nikpour<sup>1\*</sup> - D. Farsadizadeh<sup>2</sup> - A. Hosseinzadeh Dalir<sup>3</sup> - J. Behmanesh<sup>4</sup> - F. Salmasi<sup>5</sup>

Received: 16-05-2013

Accepted: 15-04-2014

### Abstract

Formation of shock waves has an important role in supercritical flows studies. These waves are often occurring during passage of supercritical flow in the non-prismatic channels. In the present study, the effect of length and convergence of contraction wall of open-channel was investigated on hydraulic parameters of shock waves using experimental model. For achieving to this goal, values of depth and instantaneous velocity were measured in various points of shock waves observed in contractions for four Froude Numbers. The results showed that for 63% decreasing the length of contraction, the values of maximum velocity and waves height averagely increased to the amount of 23.6% and  $2.77 \times 10^2\%$ , respectively. Also for the fixed length of contraction, by changing the form of walls from straight-wall to convex-wall the mentioned values averagely decreased to 6.9% and 35.2%, respectively.

**Keywords:** Experimental model, Instantaneous velocity, Non- prismatic channel, Supercritical flow

1,2,3,5- Ph.D Student, Associate Professor, Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Respectively

(\*- Corresponding Author Email: rezanikpoor@yahoo.com)

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Urmia