



دانشگاه مکتب کوردی و مکتب کوردی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و چهارم، شماره اول، ۱۳۹۶
<http://jwsc.gau.ac.ir>

مطالعه آزمایشگاهی اثر امواج ضربه‌ای در تبدیل کانال‌های روباز با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی بر مشخصات جریان

سهیلا علیپور^۱، * جواد بهمنش^۲ و محمدرضا نیک‌پور^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، دانشجویار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه،

^۲استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی

تاریخ دریافت: ۹۵/۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: 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. در مطالعه جریان‌های فوق بحرانی تشکیل امواج ضربه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. 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 پایین‌دست و ناهموار ساختن سطح آب به لحاظ مهندسی نامطلوب بوده و هر گونه طراحی ضعیف کانال می‌تواند منجر به آبشستگی دیواره‌ها و کف کانال، آسیب رساندن به تجهیزات در مسیر جریان و بالا بردن هزینه‌های مربوط به نگهداری و کاهش راندمان انتقال آب گردد. در پژوهش حاضر تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرای کانال روباز با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی با به‌کارگیری مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا، دوازده مدل با هندسه‌های متفاوت به کار گرفته شد. طول مورب دیواره‌های تبدیل (۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ متر) و زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (۳۳/۶۹، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) متغیرهای هندسی مورد مطالعه در پژوهش حاضر بود. مقدار نسبت همگرایی در همه مدل‌ها برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. مقادیر ارتفاع و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای تشکیل شده در مدل‌های مذکور به‌ازای چهار عدد فرود مختلف در محدوده ۹/۲۳-۳/۲۵ اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: مقادیر اندازه‌گیری شده در تبدیل‌های همگرا بیانگر توزیع غیریکنواخت سرعت در راستای قائم امواج ضربه‌ای بود. همچنین حرکت جبهه موج به سمت پایین‌دست با کاهش سرعت و افزایش ارتفاع موج همراه بود که به‌ازای هندسه‌های مختلف تبدیل، روند تغییرات مذکور نیز متفاوت بود. نتایج نشان داد حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای به‌ازای زوایای شیب جانبی ۳۳/۶۹، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به مقاطع مستطیلی به‌طور میانگین، به ترتیب به‌میزان ۶۴/۸، ۵۴/۳ و ۳۹/۶ درصد کاهش یافت. همچنین حداکثر سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای به‌ازای زوایای شیب جانبی مذکور نسبت به مقاطع مستطیلی به‌طور میانگین،

* مسئول مکاتبه: j.behmanesh@urmia.ac.ir

به‌ترتیب به‌میزان ۳۹/۱، ۳۱/۶ و ۱۶/۵ درصد کاهش یافت. به‌ازای عدد فرود ثابت و طول یکسان دیواره تبدیل، افزایش زاویه شیب جانبی با افزایش استهلاک انرژی امواج ضربه‌ای همراه بود. همچنین بیش‌ترین نرخ استهلاک انرژی در طول دیواره ۰/۵ متر مشاهده شد. به‌طوری‌که مقادیر افت انرژی امواج ضربه‌ای به‌ازای طول دیواره مذکور، عدد فرود ۷/۲۶ و زوایای شیب جانبی ۳۳/۶۹، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به‌ترتیب برابر ۱۴/۶۹، ۱۵/۴۳، ۱۶/۳۴ و ۱۸/۷۲ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: تحلیل پروفیل‌های سرعت و سطح آزاد امواج ضربه‌ای بیانگر آن بود که در حالت کلی کاهش زاویه شیب جانبی (افزایش شیب جانبی) دیواره تبدیل، افزایش طول مورب دیواره تبدیل و همچنین کاهش عدد فرود جریان رابطه مستقیم با کاهش ارتفاع و سرعت امواج دارد. نظر به این‌که کانال‌های اجرایی عمدتاً با مقطع دوزنقه‌ای ساخته و بهره‌برداری می‌شوند، یافته‌های پژوهش حاضر برای مهندسين طراح می‌تواند بسیار سودمند باشد.

واژه‌های کلیدی: امواج ضربه‌ای، تبدیل همگرا، زاویه شیب جانبی، جریان فوق بحرانی، طول مورب

مقدمه

در جریان‌های فوق بحرانی امواج عرضی^۱ در سطح جریان به‌وفور دیده می‌شوند و همین مسأله وجه اصلی تمایز جریان‌های فوق بحرانی و زیربحرانی است (۵). امواج عرضی به‌وجود آمده در جریان‌های سریع کانال‌های روباز شبیه امواج ضربه‌ای در جریان‌های مافوق صوت گازها می‌باشند. از این‌رو به امواج عرضی ایجاد شده در جریان‌های فوق بحرانی، امواج ضربه‌ای^۲ نیز گفته می‌شود (۲). وجود عارضه‌هایی مانند تنگ‌شدگی، گشادشدگی، بالآمدگی و پایین‌افتادگی 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 قابل‌توجهی در پایین‌دست تأثیر می‌گذارد (۲). جریان فوق بحرانی در مجاری روباز و تحت فشار از دیرباز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هگر (۱۹۸۹) با استفاده

از روش‌های تئوری و آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی در تلاقی کانال‌ها را تحت زوایای ۲۲/۵ و ۴۵ درجه مورد مطالعه قرار داد. وی در طی آزمایش‌ها خود زاویه جبهه امواج ضربه‌ای، حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای و موقعیت آن در تلاقی کانال‌ها را اندازه‌گیری و تعیین نمود. مقادیر آزمایشگاهی به‌دست آمده با نتایج روش‌های تئوری از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار بود (۵). بالامادی و چادری (۱۹۹۲) به‌منظور تحلیل جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا معادلات دوبردی متوسط گرفته شده جریان غیرماندگار در آب‌های کم‌عمق^۳ را با استفاده از روش عددی مک‌کورمک^۴ با شمای صریح^۵ مرتبه دوم گسسته و حل نمودند. مقایسه نتایج با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داد هر کجا توزیع فشار به‌صورت هیدرواستاتیک بود 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 (۱). هگر و همکاران (۱۹۹۴) با منحرف کردن یکی از دیواره‌های

3- Shallow water
4- Mac-Cormak (MAC)
5- Explicit

1- Cross Wave
2- Shock wave

(۱۰). یاکان و هانگن (۲۰۰۸) تأثیر شیب کف کانال را بر روی الگوی امواج ضربه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. بدین‌منظور یک تیغه منحرف‌کننده را در مسیر جریان کانال شیب‌دار با زاویه شیب ۳۵/۵۴ درجه قرار داده و الگوی امواج تشکیل شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در کانال‌های شیب‌دار بر خلاف کانال‌های افقی، زاویه تشکیل و ارتفاع امواج ضربه‌ای ثبات چندانی نداشته و با گذشت زمان تغییرات اندکی در جبهه موج رخ می‌دهد (۱۶). میگنات و همکاران (۲۰۰۸) به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری در تقاطع خیابان‌ها، در یک تلاقی چهار شاخه کانال‌های روباز در محیط آزمایشگاه جریان فوق بحرانی برقرار کرده و ضمن اندازه‌گیری عمق جریان، موقعیت و رفتار امواج ضربه‌ای تشکیل شده در شاخه‌های پایین‌دست را مورد تحلیل قرار دادند (۱۱). جعفرزاده و همکاران (۲۰۱۲) 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 (۷). سالداریکا و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی در محل تلاقی مجاری فاضلاب با چاهک بازرسی پرداختند. برای این منظور حالت‌های مختلف اتصال مجاری فاضلاب به چاهک بازرسی در نظر گرفته شد. در طول آزمایش‌ها متغیرهای مستقل به‌ترتیب عدد فرود و درصد پرشدگی چاهک و متغیرهای وابسته مربوط به مشخصات موج‌های ایستاده مانند مختصات شروع و پایان موج‌ها و ارتفاع موج در نظر گرفته شد (۱۵). غضنفری‌هاشمی و منتظری‌نمین (۲۰۱۲) به مطالعه

کانال مستطیلی، جریان فوق بحرانی نزدیک دیواره منحرف‌شده را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. مقادیر عمق و سرعت اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی (با استفاده از اشل و مولینه) با نتایج مدل عددی که بر اساس معادلات دوبعدی جریان ماندگار آب‌های کم‌عمق به روش تفاضلات محدود^۱ با شمای صریح محاسبه شده بود، مقایسه شد. نتایج نشان داد مقادیر عمق و سرعت محاسباتی در مناطقی که فرضیه توزیع هیدرواستاتیک فشار معتبر بود، با مقادیر اندازه‌گیری‌شده از تطابق قابل‌قبولی برخوردار بود (۶). رینز و هگر (۱۹۹۷) جریان فوق بحرانی در خم‌ها را به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و رابطه‌ای تجربی برای محاسبه پروفیل سطح امواج ضربه‌ای ایجاد شده در خم‌ها به‌زای شعاع‌های انحنا و اعداد فرود متفاوت ارائه دادند (۱۳). رینز و هگر (۱۹۹۸) به‌منظور کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا واقع در تندآب‌ها، استفاده از تکه‌های منشوری با مقطع مثلثی را پیشنهاد کردند. این تکه‌های منشوری که توسط پژوهشگران مذکور، پراکنده‌ساز^۲ نامیده شده‌اند، می‌توانند در نقاط شروع و پایانی تبدیل همگرا (گوشه‌های تبدیل) واقع شود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پراکنده‌ساز در داخل تندآب می‌تواند ارتفاع امواج ضربه‌ای را ۳۰-۵۰ درصد کاهش دهد (۱۴). کروگر و راتشمان (۲۰۰۶) با حل معادلات کلاسیک (CSW^۳) و توسعه‌یافته آب‌های کم‌عمق^۴ (ESW) توسط نرم‌افزار FEMTOOL جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا و در تلاقی کانال‌ها را در حالت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در سازه‌های مذکور، معادلات ESW نسبت به CSW نتایج بهتری از خود نشان داد

- 1- Finite Difference
- 2- Diffractor
- 3- Classic Shallow Water
- 4- Extended Shallow Water

طراحان قرار می‌گیرد، بنابراین در پژوهش حاضر به‌ازای نه هندسه متفاوت و اعداد فرود مختلف، امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقطع دوزنقه‌ای مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. همچنین به‌منظور مقایسه با مقطع مستطیلی، سه مدل از تبدیل‌های همگرا با مقطع مستطیلی نیز مورد آزمایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی: پارامترهای مؤثر بر تشکیل امواج

ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا به‌شرح زیر می‌باشند:

الف) خصوصیات سیال: جرم مخصوص (ρ) و لزجت دینامیک (μ).

ب) خصوصیات سینماتیکی جریان: سرعت جریان در کانال بالادست (u_1)، سرعت لحظه‌ای موج (u) و شتاب ثقل (g).

ج) خصوصیات مرزی و هندسی جریان: عمق جریان نزدیک‌شونده 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).

بنابراین ارتفاع امواج ضربه‌ای را می‌توان به‌صورت تابع زیر نشان داد:

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

با استفاده از تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن پارامترهای ρ ، u_1 و y به‌عنوان متغیرهای تکراری و با تقسیم پارامترهای بی‌بعد به‌دست آمده، رابطه بی‌بعد مطابق رابطه ۲ حاصل می‌گردد.

$$\frac{H}{L} = f_2\left(\text{Re}, Fr_1, \frac{X}{L}, \frac{u}{u_1}, \alpha, \frac{b_2}{b_1}\right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، Fr_1 عدد فرود جریان در کانال بالادست و Re عدد رینولدز جریان می‌باشد که با توجه به

اثرات آشفتگی در جریان فوق بحرانی در دو تبدیل همگرای متقارن و نامتقارن به کمک مدل عددی فلوئنت برای دو حالت آشفته و غیرآشفته پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که نقش پدیده آشفتگی در جریان فوق بحرانی قابل توجه نبوده و علت این امر را می‌توان در غلبه پدیده انتقال بر پدیده پخش در جریانات فوق بحرانی دانست (۳). نیک‌پور (۲۰۱۳) تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا و واگرای کانال روباز مستطیلی را با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار داد. مقادیر ارتفاع و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌ها به‌ازای اعداد فرود مختلف اندازه‌گیری شد. به‌منظور شبیه‌سازی عددی، مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و RSM مورد استفاده قرار گرفت. میانگین خطای نسبی مدل‌های آشفتگی در محاسبه ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا نشان از برتری نسبی مدل RSM داشت (۱۲). کولاروویچ و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی آزمایشگاهی امواج ضربه‌ای در امتداد لوله دارای خم، به‌ازای شش زاویه انحراف در محدوده ۹۰-۱۵ درجه پرداختند. نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی بیانگر افزایش شدت اغتشاش امواج به‌ازای زوایای بزرگ‌تر از ۴۵ درجه بود. ضمن این‌که رابطه‌ای بی‌بعد برای محاسبه ارتفاع امواج بر اساس عدد فرود، شعاع خم و قطر لوله ارائه گردید (۹). گونزالو و همکاران (۲۰۱۴) جریان فوق بحرانی در یک تقاطع چهار شاخه کانال روباز تحت زاویه ۹۰ درجه و با نسبت‌های عرضی متفاوت را مورد مطالعه و معادله‌ای را برای محاسبه دبی خروجی از چهار شاخه ارائه دادند (۴). بر اساس منابع موجود در مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته، از آنجایی‌که تحلیل رفتار جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با مقطع دوزنقه‌ای مورد توجه پژوهشگران قرار نگرفته و سطح مقطع مزبور در عمل مورد توجه

یک کف کاذب از جنس پلی اتیلن فشرده به ضخامت ۵ میلی متر، طول ۳/۶ متر و عرض ۱ متر در ابتدای فلوم کار گذاشته شد. به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در تبدیل ها، در همه آزمایش ها میزان بازشدگی دریچه کشویی ۲ سانتی متر در نظر گرفته شد. اندازه گیری دبی جریان عبوری از فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی سنج صوتی مدل UFM610P با دقت ± 0.02 لیتر بر ثانیه که حسگرهای آن بر روی لوله آبرسان فلوم نصب شده بود، انجام گرفت. جهت اندازه گیری ارتفاع سطح امواج از عمق سنج نقطه ای مکانیکی ساخت شرکت Armfield با دقت اندازه گیری ± 0.1 میلی متر استفاده شد. همچنین به منظور اندازه گیری سرعت جریان در نقاط مختلف موج از سرعت سنج الکترومغناطیسی دوبعدی سطح افق مدل ACM2-RS با دقت ± 0.5 سانتی متر بر ثانیه استفاده شد. آزمایش ها به ازای چهار عدد فرود جریان در بالادست تبدیل $(Fr_1 = 3.25, 5.20, 7.26, 9.23)$ انجام گرفت. لازم به ذکر است که تغییر عدد فرود در طی آزمایش ها از طریق تغییر ارتفاع آب در مخزن هد حاصل شد. در جدول ۱ مقادیر دبی مورد استفاده در پژوهش حاضر به همراه ارتفاع آب در مخزن هد و اعداد فرود متناظر آن آورده شده است. هندسه مدل های مورد استفاده در پژوهش حاضر به شرح جدول ۲ می باشد.

سرعت بالای جریان و ناچیز بودن تأثیر نیروی لزوجت می توان از آن صرف نظر نمود. همچنین پارامتر بی بعد b_2/b_1 نشان دهنده نسبت همگرایی می باشد. **تجهیزات آزمایشگاهی:** جهت انجام مطالعات پژوهش حاضر از یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع دیواره های ۰/۷ متر بهره گرفته شد. به منظور ذخیره سازی و تأمین هد مورد نیاز، در بالادست فلوم مخزنی به طول ۱/۷۵ متر، عرض ۱/۶۵ متر و ارتفاع ۱/۲۰ متر نصب شده بود. لازم به ذکر است که دبی ورودی به مخزن هد توسط شیر فلکه ای که بر روی لوله رانش پمپ نصب شده بود، تنظیم می شد. تنظیم سطح آب ورودی و کنترل عدد فرود در ورودی فلوم از طریق یک دریچه کشویی فولادی لبه تیز به ضخامت ۳ میلی متر، عرض ۰/۹ متر، ارتفاع ۱/۲ متر و با ضریب دبی ۰/۶ تأمین شد. در طی آزمایش ها از ۴ ورق پلگسی گلاس به ضخامت ۶ میلی متر، طول ۱ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر به منظور ایجاد کانال های بالادست و پایین دست تبدیل ها استفاده شد. برای دیواره های تبدیل ها نیز از ۶ ورق پلگسی گلاس به ضخامت ۶ میلی متر، طول های ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده گردید. به منظور نصب دیواره های تبدیل و همچنین کانال های بالادست و پایین دست،

جدول ۱- خصوصیات هیدرولیکی آزمایش ها.

Table 1. Hydraulic characteristics of the experiments.

Fr_1	ارتفاع آب در مخزن هد (متر) Water height in the head tank (m)	دبی (مترمکعب در ثانیه) Discharge (m^3/s)
3.25	0.39	0.030
5.20	0.61	0.038
7.26	0.76	0.042
9.23	0.92	0.046

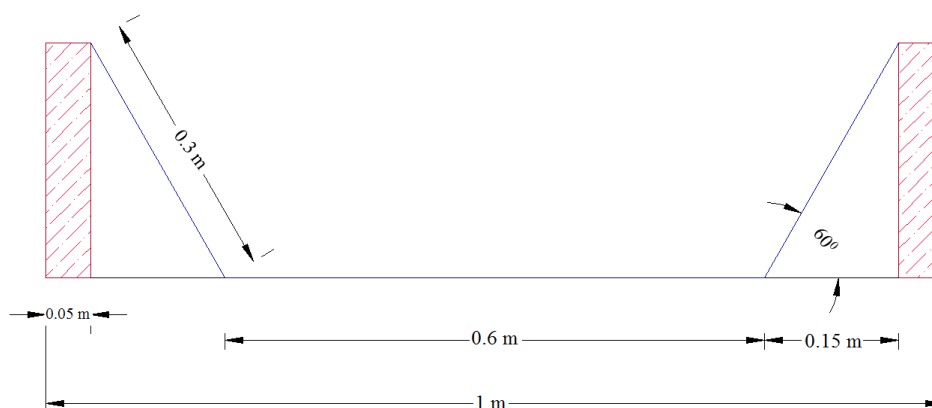
جدول ۲- هندسه مدل‌های مورد استفاده.

Table 2. Geometry of utilized models.

زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه) Slide slope angle (Degree)	نسبت همگرایی Contraction ratio	طول مورب دیواره (متر) Diagonal length of wall (m)	عرض کانال پایین‌دست (متر) Width of downstream (m)	عرض کانال بالادست (متر) Width of upstream (m)	شماره مدل Model No.
33.69 (z=1.5)	1/2	1	0.20	0.40	1
33.69 (z=1.5)	1/2	0.75	0.20	0.40	2
33.69 (z=1.5)	1/2	0.5	0.20	0.40	3
45 (z=1)	1/2	1	0.25	0.50	4
45 (z=1)	1/2	0.75	0.25	0.50	5
45 (z=1)	1/2	0.5	0.25	0.50	6
60	1/2	1	0.30	0.60	7
60	1/2	0.75	0.30	0.60	8
60	1/2	0.5	0.30	0.60	9
90	1/2	1	0.30	0.60	10
90	1/2	0.75	0.30	0.60	11
90	1/2	0.5	0.30	0.60	12

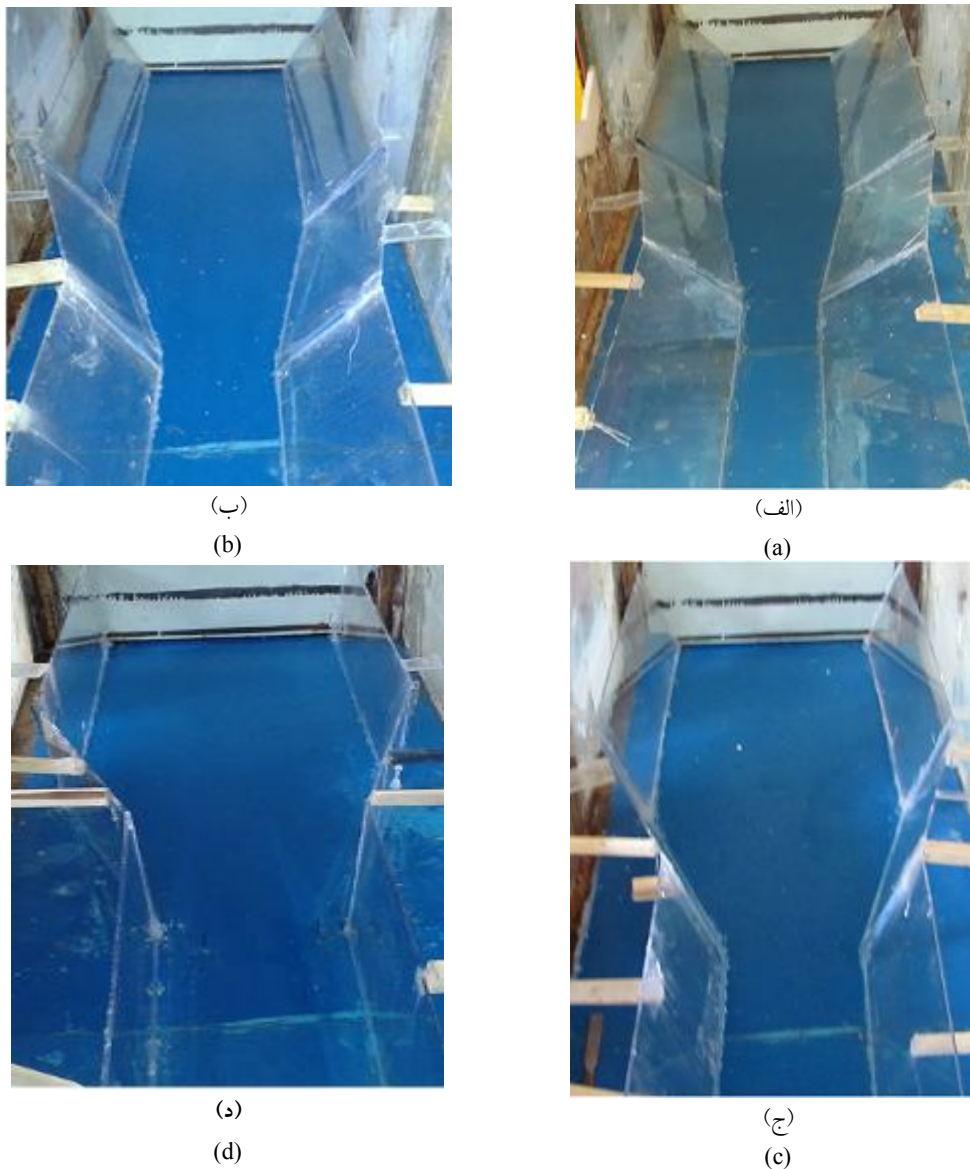
نمایی از تبدیل‌های همگرایی مورد استفاده در این پژوهش را به‌ازای مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نشان می‌دهد.

به‌منظور توصیف زاویه شیب جانبی، در شکل ۱ مقطع عرضی کانال بالادست مدل‌های ۷، ۸ و ۹ به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. شکل ۲ نیز



شکل ۱- نمای شماتیک مقطع عرضی کانال بالادست مدل‌های آزمایشگاهی.

Figure 1. Schema of upstream cross section of experimental models.



شکل ۲- نمای پایین دست تبدیل های همگرا (الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۱۲.

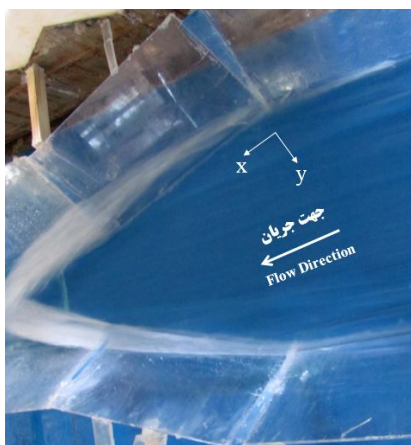
Figure 2. Downstream view of the contractions (a): model 3 (b): model 6 (c): model 9 (d): model 12.

مدل های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نشان می دهد. پس از برقراری شرایط جریان ماندگار و پایدار شدن الگوی امواج ضربه ای در تبدیل ها، مقادیر سرعت لحظه ای در طول حرکت جبهه موج از فاصله ۱۰ سانتی متری ابتدای تشکیل موج در چهار مقطع توسط سرعت سنج اندازه گیری و ثبت گردید. فواصل طولی برای مقاطع اندازه گیری سرعت به ازای طول های مورب ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ متر دیواره تبدیل به ترتیب برابر ۲۵، ۱۵ و ۱۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. همچنین در هر راستای

روش انجام آزمایش ها: پس از تنظیم و تثبیت ارتفاع آب در مخزن هد (با استفاده از اشل دیواره مخزن) به ازای اعداد فرود مذکور، با عبور آب از زیر دریچه کشویی جریان فوق بحرانی در داخل کانال برقرار می گردید. به محض رسیدن جریان فوق بحرانی به ابتدای تبدیل، امواج ضربه ای از ابتدای دیواره های تبدیل به صورت مورب شروع شده و به هم برخورد می کنند. شکل ۳ نمونه ای از امواج ضربه ای تشکیل شده در تبدیل های همگرا را به ازای $Fr_1=7/26$ در

به صورت شماتیک نمایش داده شده است. پروفیل سطح امواج نیز در طول حرکت جبهه موج به علت عدم وجود امکانات آزمایشگاهی در استفاده از پیزومتر، 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 موردنظر ثبت می‌گردید.

قائم، از فاصله ۵ میلی‌متری بستر تا ۱ سانتی‌متری سطح موج در فواصل عمودی ۵ میلی‌متر اندازه‌گیری سرعت انجام شد. لازم به ذکر است که مدت زمان برداشت داده‌های سرعت در هر نقطه، ۵ ثانیه در نظر گرفته شده بود که در طی زمان مذکور ۱۰۰ 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 موردنظر ثبت می‌گردید. در شکل ۴ محل‌های اندازه‌گیری سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها با طول دیواره ۰/۵ متر



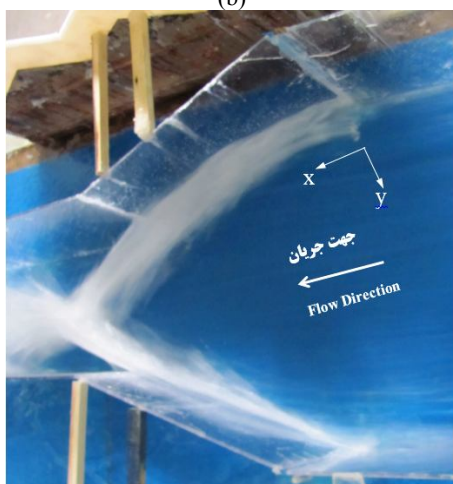
(ب)

(b)



(الف)

(a)



(د)

(d)

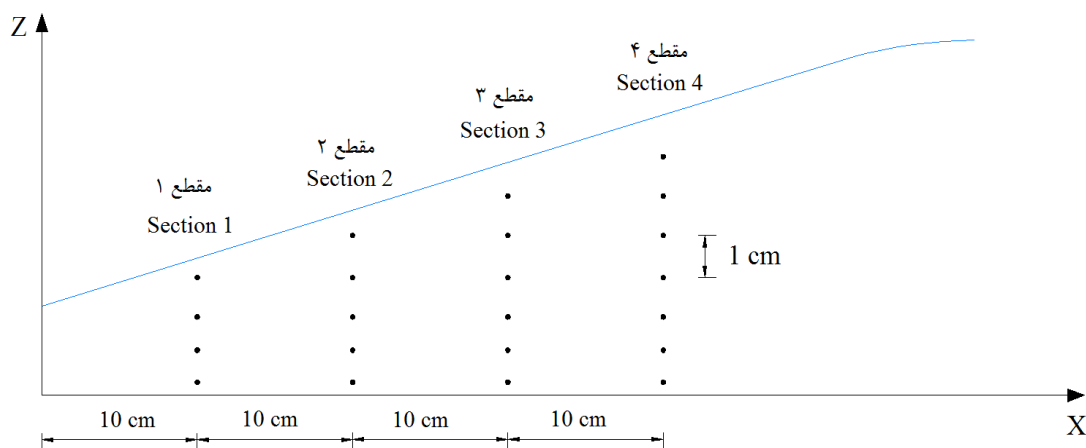


(ج)

(c)

شکل ۳- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها به‌ازای $Fr_1=7.26$ (الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۱۲.

Figure 3. Formation of shock waves in the contractions for $Fr_1=7.26$ (a): model 3 (b): model 6 (c): model 9 (d): model 12.



شکل ۴- محل‌های اندازه‌گیری سرعت امواج ضربه‌ای.

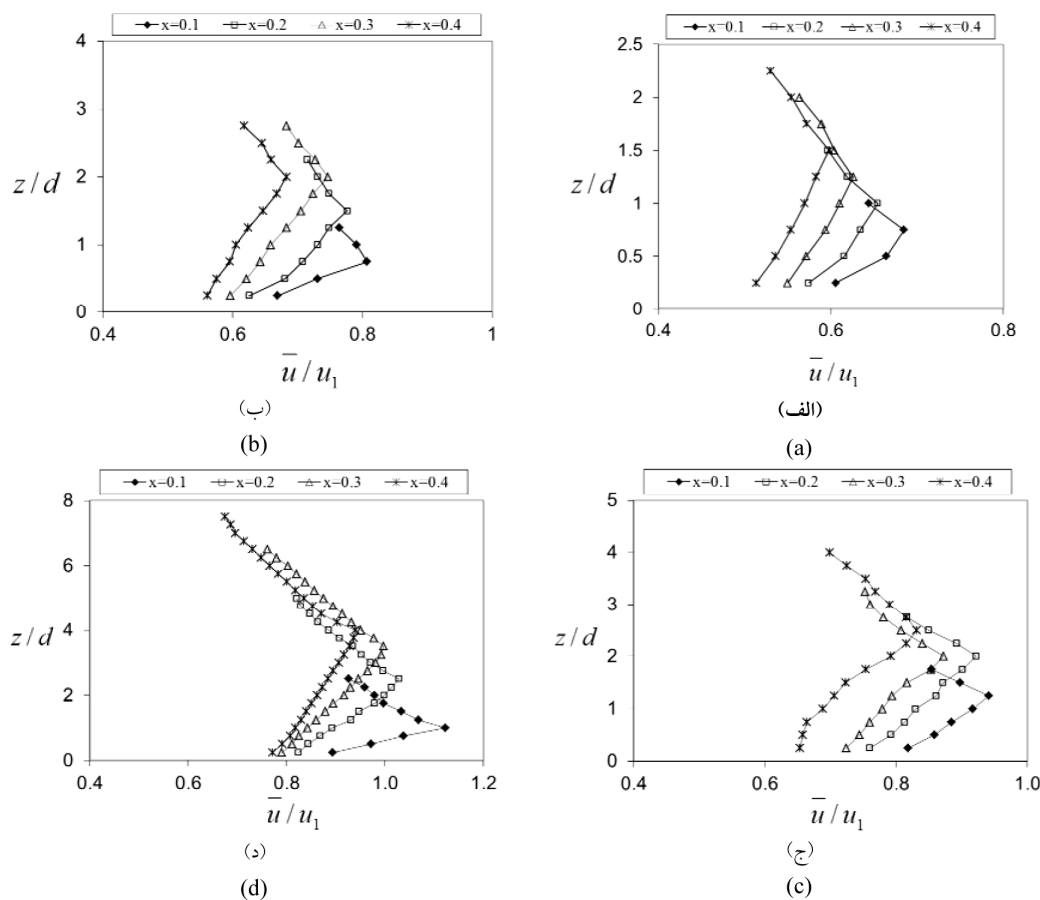
Figure 4. Measuring places of shock waves velocities.

اصلی کانال باعث استهلاک انرژی جنبشی اغتشاش^۱ و افزایش ارتفاع موج شده و کاهش سرعت موج را به دنبال داشته است. همان‌گونه که اشاره گردید در پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای زاویه شیب جانبی و طول مورب دیواره تبدیل به‌عنوان متغیرهای هندسی و عدد فرود به‌عنوان متغیر هیدرولیکی بر الگوی امواج ضربه‌ای بررسی گردید. بنابراین تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور به‌شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

در شکل ۵ پروفیل‌های سرعت در امتداد حرکت امواج ضربه‌ای به‌عنوان نمونه به‌ازای $Fr_1=7/26$ در مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نمایش داده شده است. در شکل مذکور منظور از Z و d به‌ترتیب فاصله قائم نقطه اندازه‌گیری از کف و میزان گشودگی دریچه می‌باشد. پروفیل‌های به‌دست آمده برای همه 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 می‌کند. در واقع اختلاط آب و هوا در سطح موج باعث کاهش سرعت آن می‌شود، به‌عبارت دیگر هوا به‌عنوان مانعی برای سرعت عمل می‌کند. بر این اساس برای هر پروفیل سرعت می‌توان دو ناحیه مجزا در نظر گرفت، که عبارتند از: ناحیه افزایش سرعت (ناحیه اول) و ناحیه کاهش سرعت (ناحیه دوم). از سوی دیگر در طول حرکت جبهه موج، سرعت موج کاهش و ارتفاع آن افزایش یافته است. برخورد اولین موج مورب با جریان

1- Dissipation of turbulence kinetic energy



شکل ۵- پروفیل سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها به‌ازای $Fr_1=7.26$ (الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۱۲.

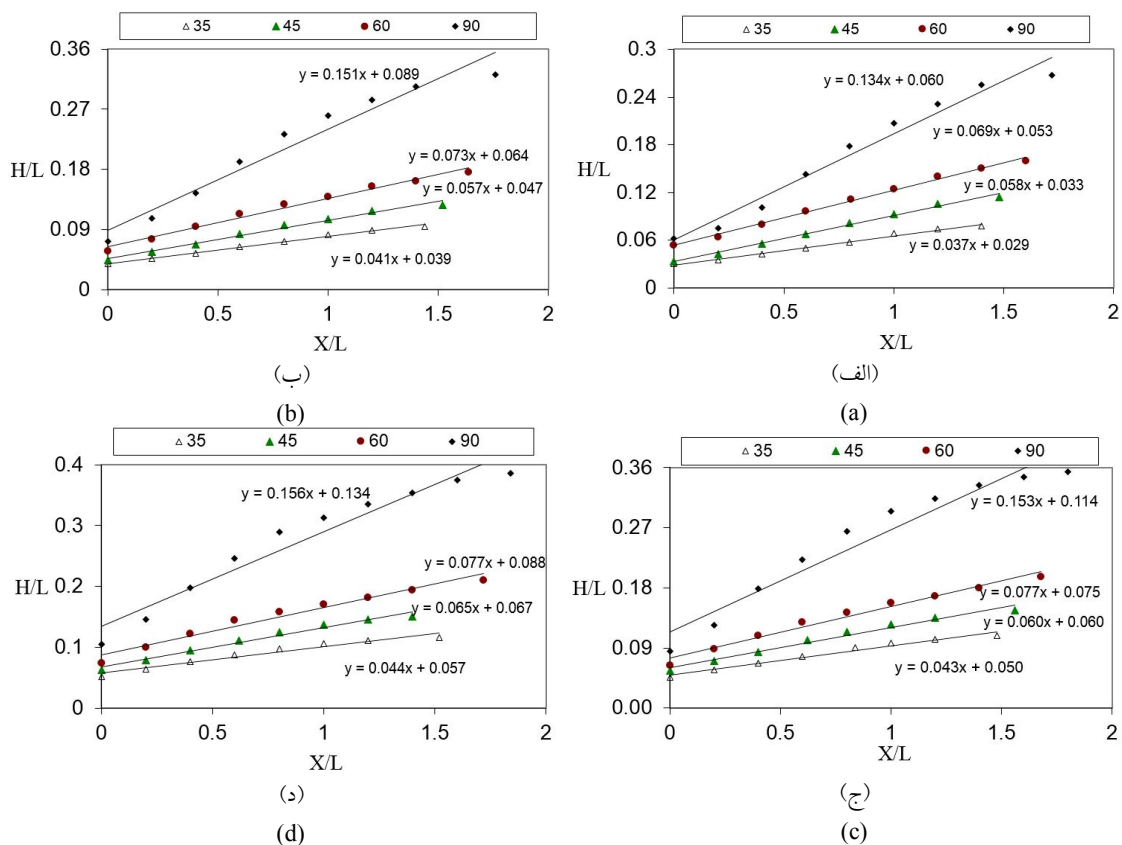
Figure 5. Velocity profile of shock waves in the contractions for $Fr_1=7.26$ (a): model 3 (b): model 6 (c): model 9 (d): model 12.

می‌باشد. همچنین متناسب با افزایش زاویه شیب جانبی، روند افزایش ارتفاع امواج نیز بیش‌تر می‌شود. در مقاطع مستطیلی (زاویه شیب ۹۰ درجه) سیر صعودی مذکور شیب تندتری به خود گرفته و روند افزایش ارتفاع امواج سریع‌تر می‌باشد. میزان درصد کاهش حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای در مدل‌های مختلف نسبت به مقاطع مستطیلی در جدول ۳ گزارش شده است. بر اساس نتایج محاسباتی جدول ۳، حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای به‌ازای زوایای شیب جانبی ۳۳/۶۹، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به مقاطع مستطیلی به‌طور میانگین، به‌ترتیب به‌میزان ۶۴/۸، ۵۴/۳ و ۳۹/۶ درصد

(الف) تأثیر زاویه شیب جانبی: شکل ۶ پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به‌ازای اعداد فرود و زوایای مختلف شیب جانبی، در مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ 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، بیانگر افزایش ارتفاع امواج با افزایش زاویه شیب جانبی

امواج ضربه‌ای در مدل‌های مختلف نسبت به مقاطع مستطیلی در جدول ۴ گزارش شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ذکر شده در جدول ۴ به‌ازای هر عدد فرود، بر اساس میانگین‌گیری از مقادیر حداکثر سرعت در محل‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت موج محاسبه شده است. بر اساس نتایج محاسباتی جدول ۴، حداکثر سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای به‌ازای زوایای شیب جانبی ۳۳/۶۹، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به مقاطع مستطیلی به‌طور میانگین، به‌ترتیب به‌میزان ۳۹/۱، ۳۱/۶ و ۱۶/۵ درصد کاهش یافته است.

کاهش یافته است. مقایسه پروفیل‌های سرعت در مدل‌های مختلف (شکل ۵) نشان می‌دهد که با کاهش زاویه شیب جانبی دیواره‌های تبدیل، مقادیر حداکثر سرعت موج نیز کاهش یافته است. به‌عبارت دیگر به‌ازای عدد فرود، نسبت همگرایی و طول دیواره یکسان، کاهش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل، کاهش سرعت جبهه موج را به دنبال دارد. در واقع در هنگام برخورد جریان فوق بحرانی به دیواره تبدیل همگرا و تشکیل امواج ضربه‌ای، وجود شیب جانبی دیواره تبدیل موجب تعدیل در تغییر ناگهانی رفتار سیال شده و در نتیجه آن از ارتفاع و سرعت امواج کاسته می‌شود. میزان درصد کاهش حداکثر سرعت



شکل ۶- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ به‌ازای (الف): $Fr_1=3/25$ (ب): $Fr_1=5/2$ (ج): $Fr_1=7/26$ (د): $Fr_1=9/23$.

Figure 6. Free surface profile of shock waves for the models: 3, 6, 9 and 12 for (a): $Fr_1=3.25$ (b): $Fr_1=5.2$ (c): $Fr_1=7.26$ (d): $Fr_1=9.23$.

جدول ۳- درصد کاهش حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای در مقاطع دوزنقه‌ای نسبت به مقاطع مستطیلی.

Table 3. Reduction percentage of maximum height of shock waves in the trapezoidal sections compared with the rectangular ones.

میانگین (%) Average (%)	Fr ₁ =9.23	Fr ₁ =7.26	Fr ₁ =5.2	Fr ₁ =3.25	طول مورب دیواره (متر) Diagonal length of wall (m)	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه) Slide slope angle (Degree)
59.2	59.5	59.0	58.8	59.5		33.69
49.0	50.5	49.2	49.6	46.7	1	45
34.3	37.9	35.8	32.9	30.6		60
64.8	64.0	64.0	63.8	67.4		33.69
54.9	54.7	54.8	55.6	54.4	0.75	45
40.5	41.7	41.8	40.0	38.5		60
70.2	69.9	69.5	70.8	70.7		33.69
59.1	59.6	58.7	60.8	57.1	0.5	45
43.9	45.6	44.6	45.3	40.1		60

جدول ۴- درصد کاهش حداکثر سرعت امواج ضربه‌ای در مقاطع دوزنقه‌ای نسبت به مقاطع مستطیلی.

Table 4. Reduction percentage of maximum velocity of shock waves in the trapezoidal sections compared with the rectangular ones.

میانگین (%) Average (%)	Fr ₁ =9.23	Fr ₁ =7.26	Fr ₁ =5.2	Fr ₁ =3.25	طول مورب دیواره (متر) Diagonal length of wall (m)	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه) Slide slope angle (Degree)
40.0	34.3	35.0	50.0	40.7		33.69
32.2	29.0	33.9	30.5	35.6	1	45
17.2	11.2	18.6	15.2	23.6		60
38.9	34.3	37.5	44.1	39.7		33.69
32.2	27.3	29.5	34.6	37.4	0.75	45
15.8	12.4	15.2	17.9	17.8		60
38.3	33.7	39.4	39.8	40.5		33.69
30.3	23.5	27.5	33.0	37.2	0.5	45
16.5	12.8	15.0	18.0	20.3		60

طول دیواره ۰/۵ متر و عدد فرود مشابه ۷/۲۶ مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌منظور کاهش حداکثر ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای، وجود شیب جانبی دیواره تبدیل مؤثرتر از انحنای دیواره می‌باشد.

در پژوهش نیک‌پور (۲۰۱۳) نرخ کاهش حداکثر ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با دیواره انحنادار نسبت به دیواره مستقیم به‌ازای اعداد فرود مختلف بررسی شد. در جدول‌های ۵ و ۶ تأثیر شیب جانبی و انحنای دیواره تبدیل بر روی حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای به‌ازای نسبت همگرایی ۰/۵،

جدول ۵- مقایسه تأثیر شیب جانبی و انحنای دیواره تبدیل بر روی حداکثر ارتفاع امواج ضربه‌ای.

Table 5. Comparison the effect of side slope and curvature of the transition wall on maximum height of shock waves.

نرخ کاهش ارتفاع نسبت به مدل ۱۲ (%) Rate of height reduction to model 12 (%)	حداکثر ارتفاع موج ضربه‌ای (سانتی‌متر) Maximum height of shock wave (cm)	نوع دیواره Wall type	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه) Slide slope angle (Degree)	شماره مدل Model No.
69.5	5.40	مستقیم Straight	33.69	3
58.7	7.31	مستقیم Straight	45	6
44.6	9.81	مستقیم Straight	60	9
-	17.70	مستقیم Straight	90	12
19.5	14.25	انحنادار Curved	90	نیک‌پور (۲۰۱۳)

جدول ۶- مقایسه تأثیر شیب جانبی و انحنای دیواره تبدیل بر روی حداکثر سرعت امواج ضربه‌ای.

Table 6. Comparison the effect of side slope and curvature of the transition wall on maximum velocity of shock waves.

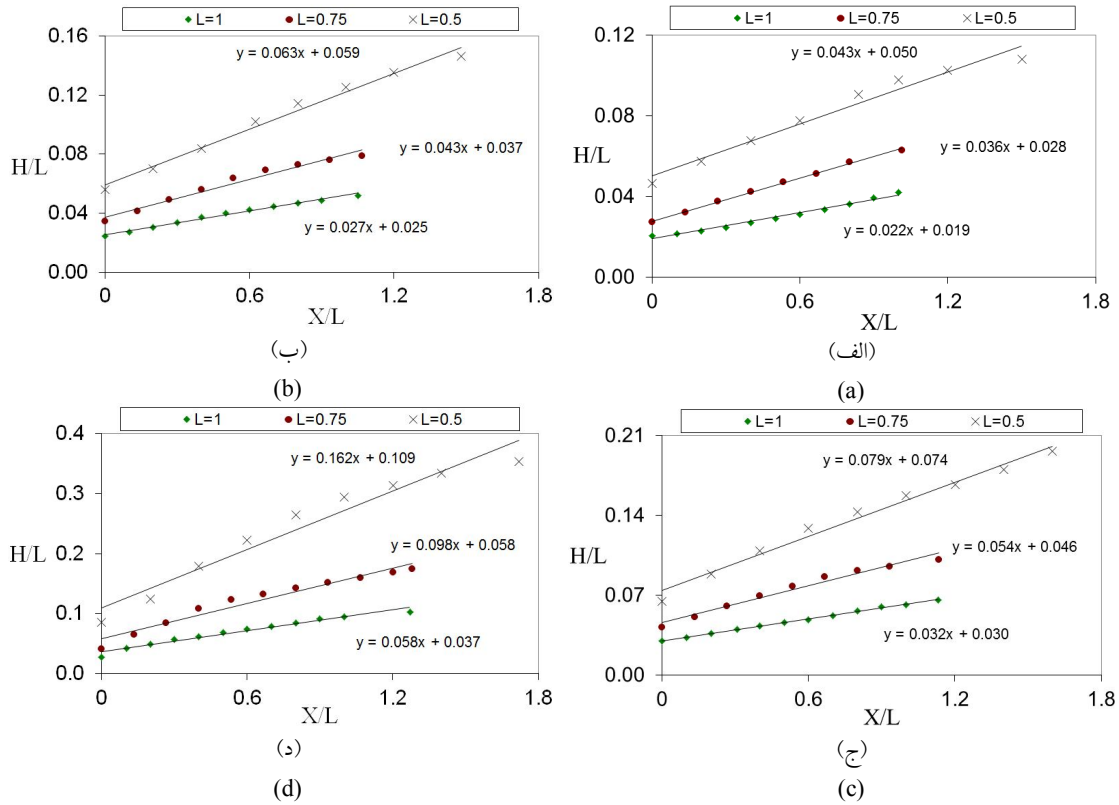
نرخ کاهش سرعت نسبت به مدل ۱۲ (%) Rate of velocity reduction to model 12 (%)	حداکثر سرعت موج ضربه‌ای (متر بر ثانیه) Maximum velocity of shock wave (m/s)	نوع دیواره Wall type	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه) Slide slope angle (Degree)	شماره مدل Model No.
39.4	1.94	مستقیم Straight	33.69	3
27.5	2.32	مستقیم Straight	45	6
15.0	2.72	مستقیم Straight	60	9
-	3.20	مستقیم Straight	90	12
7.8	2.95	انحنادار Curved	90	نیک‌پور (۲۰۱۳)

دارد. در واقع کاهش طول دیواره تبدیل، تغییر ناگهانی مسیر عبور 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. روند افزایشی مذکور در مدل‌هایی که زاویه شیب جانبی آن‌ها بزرگ‌تر است، نمود

ب) تأثیر طول مورب دیواره تبدیل: شکل ۷ پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به‌ازای Fr_1 ۷/۲۶ و طول‌های مورب دیواره تبدیل، در مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در تمام مدل‌ها، کاهش طول مورب دیواره تبدیل تأثیر به‌سزایی در افزایش ارتفاع امواج و شیب صعودی آن

عرض جریان در فاصله کوتاه‌تری صورت پذیرد، تغییر رفتار سیال شدیدتر بوده و ارتفاع و سرعت امواج تشکیل شده نیز بیشتر می‌باشد.

بیش‌تری دارد. با توجه به این‌که یکی از عوامل تشکیل امواج ضربه‌ای در جریان‌های فوق بحرانی کاهش عرض کانال می‌باشد بنابراین هر چه قدر کاهش

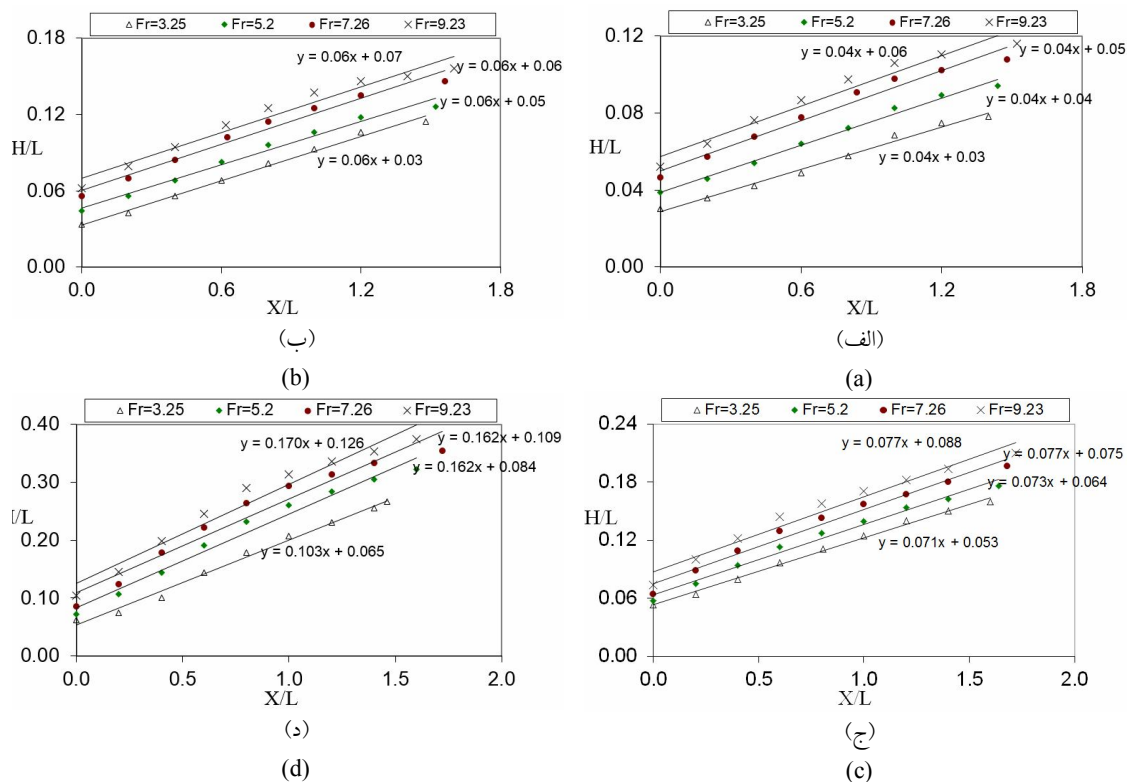


شکل ۷- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها به‌ازای $Fr_1=7.26$ (الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۱۲.

Figure 7. Free surface profile of shock waves in the contractions for $Fr_1=7.26$ (a): model 3 (b): model 6 (c): model 9 (d): model 12.

جانبی و طول مورب یکسان دیواره تبدیل‌ها، شیب افزایش ارتفاع امواج تقریباً ثابت می‌باشد. به‌عبارت دیگر تغییر عدد فرود تأثیر چندانی بر روی روند تغییرات ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا ندارد.

(ج) تأثیر عدد فرود جریان: شکل ۸ پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به‌ازای اعداد فرود مختلف در مدل‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود جریان، افزایش ارتفاع امواج ضربه‌ای را به دنبال دارد. همچنین به‌ازای شیب



شکل ۸- تأثیر عدد فرود بر پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها (الف): مدل ۳ (ب): مدل ۶ (ج): مدل ۹ (د): مدل ۱۲.

Figure 8. Effect of Froude number on free surface profile in the contractions for (a): model 3 (b): model 6 (c): model 9 (d): model 12.

$$E = H + \frac{\bar{U}^2}{2g} \quad (4)$$

در جدول ۷ مقادیر محاسباتی استهلاک انرژی نسبی در مدل‌های مختلف و به‌ازای Fr_1 ۷/۲۶ گزارش شده است. مقادیر مذکور بیانگر آن است که به‌ازای طول ثابت دیواره تبدیل، افزایش زاویه شیب جانبی موجب افزایش افت انرژی در طول حرکت جبهه موج می‌شود. به‌عبارت دیگر افزایش زاویه شیب جانبی دیواره‌های تبدیل‌های همگرا علاوه بر افزایش مقادیر ارتفاع، سرعت و انرژی امواج ضربه‌ای، تقویت استهلاک انرژی را نیز به دنبال دارد.

محاسبه استهلاک انرژی: به‌منظور محاسبه استهلاک انرژی نسبی (ΔE) در طول حرکت جبهه موج از رابطه ۳ استفاده شد. در رابطه مذکور منظور از E_1 و E_2 مقادیر انرژی مخصوص موج، به‌ترتیب در مقاطع ابتدا و انتهای اندازه‌گیری سرعت موج می‌باشد که مقادیر مذکور توسط رابطه ۴ محاسبه شد. در رابطه ۴، \bar{U} میانگین مقادیر \bar{u} اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف واقع در راستای قائم می‌باشد.

$$\Delta E(\%) = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (3)$$

جدول ۷- مقادیر محاسباتی استهلاک انرژی نسبی در تبدیل‌های همگرا به‌ازای $Fr_1=7.26$.

Table 7. Calculated values of relative energy dissipation in the contractions for $Fr_1=7.26$.

استهلاک انرژی نسبی (%) Relative energy dissipation (%)	طول مورب دیواره (متر) Diagonal length of wall (m)	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه) Slide slope angle (Degree)
8.04	1	33.69
8.42		45
8.85		60
9.44		90
10.30	0.75	33.69
10.74		45
11.25		60
11.92		90
14.69	0.5	33.69
15.43		45
16.34		60
18.72		90

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر هندسه تبدیل بر پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای، دوازده مدل از تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی به‌ازای هندسه‌های متفاوت به‌کار گرفته شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

در حالت کلی در تبدیل‌های همگرا حرکت جبهه امواج ضربه‌ای با افزایش ارتفاع و کاهش سرعت آن همراه می‌باشد.

با پیشروی جبهه موج بر شدت تلاطم موج و اختلاط آب و هوا افزوده شده و غیریکنواختی توزیع سرعت چشمگیرتر می‌شود.

به‌ازای عدد فرود، نسبت همگرایی و طول دیواره یکسان، افزایش زاویه شیب جانبی (کاهش شیب جانبی) دیواره تبدیل، افزایش ارتفاع، سرعت و استهلاک انرژی امواج ضربه‌ای را به دنبال داشت.

کاهش زاویه شیب جانبی (افزایش شیب جانبی) دیواره تبدیل، افزایش طول مورب دیواره تبدیل و

همچنین کاهش عدد فرود جریان رابطه مستقیم با کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای دارد. همچنین با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی، تفاوت چشمگیری مشاهده شد. به‌طوری‌که به‌ازای عدد فرود و طول دیواره یکسان، مقادیر حداکثر ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای در مقاطع مستطیلی نسبت به دوزنقه‌ای به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافت.

بر اساس یافته‌های پژوهش حاضر توصیه می‌شود که در هنگام طراحی تبدیل‌های همگرا در حالت عبور جریان فوق بحرانی به‌منظور به حداقل رساندن ارتفاع امواج ضربه‌ای و اثرات مخرب آن، کوچک‌ترین زاویه شیب جانبی و بزرگ‌ترین طول ممکن برای دیواره تبدیل انتخاب شود و در صورت وجود محدودیت در انتخاب متغیرهای هندسی مذکور، قبل از اجرای مدل واقعی، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و یا عددی پدیده تشکیل امواج بررسی شود.

منابع

1. Bhallamudi, S.M., and Chaudhry, M.H. 1992. Computation of flows in open-channel transitions. *J. Hydr. Res.* 30: 1. 77-93.
2. Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics*. Mc Graw-Hill Press, Michigan, 680p.
3. Ghazanfari hashemi, R., and Montazeri Namin, M. 2012. Investigation of turbulence effects of supercritical flow in contractions using 3D numerical modeling. 11th Iranian Conference on Hydraulic, Pp: 171-179. (In Persian)
4. Gonzalo, R., Nanía, L.S., and Gómez, M. 2014. Influence of Channel Width on Flow Distribution in Four-Branch Junctions with Supercritical Flow: Exp. App. *J. Hydr. Eng.* 140: 1. 77-88.
5. Hager, W.H. 1989. Supercritical flow in channel junction. *J. Hydr. Eng.* 115: 5. 595-616.
6. Hager, W.H., Schwalt, M., Jimenez, O.F., and Chaudhry, M.H. 1994. Supercritical flow near an abrupt wall deflection. *J. Hydr. Res.* 32: 1. 103-118.
7. Jafarzadeh, M.R., Shamkhalchian, A., and Jomehzadeh, M. 2012. Supercritical flow profile improvement by means of a convex corner at a bend inlet. *J. Hydr. Res.* 50: 6. 623-630.
8. Jimenez, O.F., and Chaudhry, M.H. 1988. Computation of Supercritical Free-Surface Flows. *J. Hydr. Eng.* 114: 4. 377-395.
9. Kolarević, M., Savić, L., Kapor, R., and Mladenović, N. 2013. Supercritical flow in circular pipe bends. *J. Scineks. Ceon.* 42: 128-133.
10. Krüger, S., and Rutschmann, P. 2006. 3D Modeling supercritical flow with extended shallow-water approach. *J. Hydr. Eng.* 132: 9. 916-926.
11. Mignot, E., Rivière, N., Perkins, R., and Paquier, A. 2008. Flow patterns in a four-branch junction with supercritical flow. *J. Hydr. Eng.* 134: 6. 701-713.
12. Nikpour, M.R. 2013. Investigation of Supercritical flow in open-channels transition using experimental and numerical models. In: A thesis submitted to the Faculty of Agriculture, University of Tabriz for the Ph.D. Degree, 200p. (In Persian)
13. Reinauer, R., and Hager, W.H. 1997. Supercritical bend flow. *J. Hydr. Eng.* 123: 3. 208-218.
14. Reinauer, R., and Hager, W. 1998. Supercritical flow in chute contraction. *J. Hydr. Eng.* 124: 1. 55-64.
15. Saldarriaga, J., Bermudez, N., and Rubio, D.P. 2012. Hydraulic behavior of junction manholes under supercritical flow conditions. *J. Hydr. Res.* 50: 6. 631-636.
16. Ya Kun, L., and Han Gen, N. 2008. Abrupt deflected supercritical water flow in sloped channels. *J. Hydrodyn.* 20: 3. 293-298.



Experimental study of shock waves effect on flow characteristics in open-channels transition with trapezoidal and rectangular sections

S. Alipour¹, *J. Behmanesh² and M.R. Nikpour³

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, University of Urmia,

²Associate Prof., Dept. of Water Engineering, University of Urmia,

³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

Received: 05/08/2016; Accepted: 02/05/2017

Abstract

Background and Objectives: 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 studies, the formation of the shock waves has an important role. Technically, production and development of the mentioned waves are undesirable due to water depth increase because of several times increasing of inflow water depth, its spread at a wide range in downstream of channel and water surface roughness. Any weak design of channels under supercritical condition can cause to scour channel's bed and walls, damage to equipment in the flow direction, raising maintenance costs and reduce water conveyance efficiency. In the present research, the formation of shock waves in converged transitions of open channel with rectangular and trapezoidal sections was investigated using laboratory and physical models.

Materials and Methods: In order to investigate hydraulic parameters of shock waves in the converged transitions, twelve models with different geometries were used. In the present research, the studied geometric variables were the diagonal length of transition walls (0.5, 0.75 and 1 m) and side wall angle (33.69°, 45°, 60° and 90°). In all used models, the convergence ratio was 0.5. The height and instantaneous velocity were measured in different points of formed shock waves in the mentioned models for four different Froude number in the range of 3.25 to 9.23.

Results: The measured values in the converged transitions showed that the velocity distribution was not uniform in the vertical direction of shock waves. Also, the results showed that by traveling wave front toward downstream cause to reduce wave velocity and increase wave height so that for various geometries, the changes trend was different. The results showed that on average, and for side slopes angles of 33.69°, 45° and 60°, the maximum height of shock waves was reduced 64.8%, 54.3% and 39.6% respectively in the comparison of trapezoidal and rectangular sections. Also, in the converged transitions and for the mentioned side slope angles, maximum shock wave velocity was reduced 39.1%, 31.6% and 16.5% respectively in the comparison of trapezoidal and rectangular sections. Increasing of side slope angle was accompanied with energy dissipation increment of shock waves for a constant Froude number and transition wall length. Also, maximum value of energy dissipation was seen for 0.5 m of wall length. The values of energy dissipation for the mentioned length, $Fr_1=7.26$ and side slopes angles of 33.69°, 45°, 60° and 90° were achieved 14.69%, 15.43%, 16.34% and 18.72%, respectively.

Conclusion: The analysis of the velocity profiles and free surface of shock waves showed that in general the reduction of side slope angle (increasing side slopes) of the transition wall, increase of diagonal wall length of the transition and reduction of Froude number have a direct relationship with the reduction of waves velocity and height. Since channels are constructed in the form of trapezoidal, the obtained results of the present research can be very useful for designer engineers.

Keywords: Contraction, Diagonal length, Slide slope angle, Shock waves, Supercritical flow

* Corresponding Author; Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir