

مطالعه آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی

فریناز شجاع‌طلاتیپه^{۱*}، داود فرسادی‌زاده^۲، علی حسین‌زاده دلیر^۳، جواد بهمنش^۴
و محمدرضا نیک‌پور^۵

۱ و ۲ - به ترتیب: دانشجوی دکتری؛ و استادان گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۴ - استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۵ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۸

چکیده

وجود هرگونه تغییر هندسی مانند تبدیل در مسیر کانال‌های با جریان فوق بحرانی، موجب تغییر ناگهانی عمق و سرعت جریان و تشکیل امواج ضربه‌ای می‌شود. در این تحقیق، ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرای کانال روباز با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی با به‌کارگیری مدل‌های آزمایشگاهی بررسی شد. زاویه شیب جانبی دیواره‌ها ۴۵، ۶۰، ۷۰ و ۹۰ درجه و نسبت همگرایی ۱ به ۲، ۱ به ۳ و ۱ به ۴ به عنوان متغیرهای هندسی و همچنین چهار عدد فرود مختلف در محدوده ۲۳/۲۵-۳/۹ به عنوان متغیر هیدرولیکی آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. تحلیل پروفیل‌های سرعت و سطح آزاد امواج ضربه‌ای نشان می‌دهد که در حالت کلی، افزایش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل، کاهش نسبت همگرایی و افزایش عدد فرود جریان رابطه‌ای مستقیم دارد با افزایش ارتفاع و سرعت امواج. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد که بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای، به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ و زاویه‌های شیب جانبی ۴۵، ۶۰ و ۷۰ درجه، در مقایسه با مقطع مستطیلی، به‌طور میانگین به‌ترتیب به‌میزان ۳۴/۵۹، ۲۷/۴۴ و ۴/۲۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای به‌ازای شرایط مذکور به‌ترتیب به‌میزان ۵۱/۳۷، ۲۳/۲۵ و ۶۷/۱۴ درصد کاهش می‌یابد. نظر به اینکه کانال‌های اجرایی عمدتاً با مقطع دوزنقه‌ای ساخته می‌شوند، یافته‌های پژوهش حاضر برای مهندسان طراح می‌تواند بسیار سودمند باشد.

واژه‌های کلیدی

امواج ضربه‌ای، شیب جانبی، نسبت همگرایی

مقدمه

این امواج، به دلیل افزایش ارتفاع آب به اندازه چندین برابر عمق جریان ورودی و گسترش آن در محدوده‌ای وسیع از کانال پایین‌دست و ناهموار ساختن سطح آب، به لحاظ مهندسی نامطلوب است و هرگونه طراحی ضعیف کانال می‌تواند منجر به آبستگي دیواره‌ها و کف کانال، آسیب رساندن به تجهیزات در مسیر جریان و بالا بردن

تبدیل‌های همگرا در کانال‌های با جریان فوق بحرانی کاربرد دارند از جمله در کانال‌های انتقال آب سدها به سرریزهای تونلی، تند آب‌ها و کانال‌های انتقال سیلاب (Jan et al., 2009). جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با تشکیل امواج ضربه‌ای همراه است. تولید و توسعه

کانال‌های شیب‌دار پایدار نیست و در طول زمان جبهه موج تغییر می‌یابد. جان و همکاران (Jan *et al.*, 2009) جریان فوق بحرانی در تبدیل همگرایی واقع در یک تند آب آزمایشگاهی را شبیه‌سازی و روابطی بی‌بعد به منظور محاسبه بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای و محل وقوع آن ارائه کردند. جعفرزاده و همکاران (Jafarzadeh *et al.*, 2012) به منظور کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای در خم‌ها، گوشه‌های 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 شد و کاهش ارتفاع موج مثبت را به همراه داشت. این محققان همچنین برای تعیین ابعاد مناسب گوشه محدب فوق برای به حداقل رساندن ارتفاع امواج مثبت و هموار کردن سطح جریان در کانال پایین دست از روش عددی Roe استفاده کردند.

منتظری نمین و همکاران (Montazeri-Namin *et al.*, 2012) جریان فوق بحرانی در خم کانال‌ها را با نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی کردند. نتایج به دست آمده از مدل عددی در مورد پروفیل سطح امواج در قوس خارجی و داخلی خم کانال با مقادیر آزمایشگاهی هم‌خوانی خوبی نشان داد. کولارویچ و همکاران (Kolarević *et al.*, 2013) به بررسی آزمایشگاهی امواج ضربه‌ای در امتداد لوله دارای خم، به‌ازای شش زاویه انحراف پرداختند و رابطه‌ای بی‌بعد برای محاسبه ارتفاع امواج بر اساس عدد فرود، شعاع خم و قطر لوله ارائه دادند. گاستین و همکاران (Ghostine *et al.*, 2014) با استفاده از مدل ترکیبی یک‌بعدی-دو بعدی آب‌های کم‌عمق^۴ و مقایسه آن با مدل دو بعدی کامل^۵ به بررسی عددی جریان فوق بحرانی در تقاطع خیابان‌ها پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که دقت و صحت نتایج حاصل از مدل ترکیبی یک‌بعدی دو بعدی آب‌های کم‌عمق همانند مدل دو بعدی کامل است و حتی می‌تواند تا ۳۰ درصد در مدت زمان محاسبات

هزینه‌های نگهداری و کاهش راندمان انتقال آب شود (Causon *et al.*, 1999). از این‌رو، در طراحی سازه‌های هیدرولیکی با جریان فوق بحرانی، تشکیل امواج ضربه‌ای و مطالعه رفتار این موج‌ها با اهمیت است. رینر و هگر (Reinauer & Hager, 1997) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، جریان فوق بحرانی در خم‌ها را بررسی کردند. آزمایش‌های آنها شامل ۳ خم با شعاع انحنا و اعداد فرود متفاوت بود و پروفیل امواج ضربه‌ای ایجاد شده در قوس‌های داخلی و خارجی خم اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی‌های این محققان با رابطه تجربی ناپ^۱ که در سال ۱۹۵۱ ارائه داد تقریباً مطابقت دارد.

کروگر و راتشمان (Krüger & Rutschmann, 2006) جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا و تلاقی کانال‌ها را با حل عددی معادلات کلاسیک آب‌های کم‌عمق^۲ و معادلات توسعه یافته آب‌های کم‌عمق^۳ به روش المان‌های محدود شبیه‌سازی کردند. نتایج عددی، در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی، نشان داد که معادلات توسعه یافته نسبت به معادلات کلاسیک در برآورد پروفیل سطح آب نتایج بهتری دارند. بلترامی و همکاران (Beltrami *et al.*, 2007) برای مهار امواج ضربه‌ای در خم ۱۸۰ درجه کانال مستطیلی از پایه‌هایی با مقطع دایره‌ای استفاده کردند. این پایه‌ها در بالادست قوس داخلی خم به گونه‌ای نصب شدند که اغتشاش‌های حاصل از برخورد جریان به آنها همراه بود با کاهش ارتفاع امواج مثبت تشکیل یافته در قوس خارجی خم. یاکان و هانگن (Ya-kun & Han-gen, 2008) در تحقیقات خود به بررسی اثر شیب کف کانال بر رفتار امواج ضربه‌ای در حضور تیغه منحرف‌کننده پرداختند. بر اساس آزمایش‌ها، برای محاسبه تقریبی زاویه امواج ضربه‌ای روشی پیشنهاد گردید. همچنین، مقایسه نتایج حاصل از مطالعه امواج ضربه‌ای در کانال شیب‌دار با کانال با بستر افقی حاکی از آن بود که زاویه و ارتفاع امواج ضربه‌ای ایجاد شده در

1- Knop

3- Extended Shallow Water Equations

5- Fully 2d Model

2- Classic Shallow Water Equations

4- Coupled 1d-2d Shallow Water Model

صرفه جویی کند. جعفرزاده و علامتیان (Jafarzadeh & Alamatian, 2009) با حل معادلات دو بعدی متوسط

گرفته شده آب‌های کم‌عمق در تبدیل‌ها با استفاده از روش‌های عددی مک‌کورمک و لاکس-وندروف^۱ و همچنین با استفاده از مدل آزمایشگاهی، جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا را شبیه‌سازی کردند. در آزمایش‌ها پروفیل سطح آب در امتداد دیواره و محور مرکزی تبدیل برداشت گردید. در نهایت، در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، روش مک‌کورمک با شبکه تطبیقی هم‌خوانی بیشتری نشان داد.

شمخالچیان و همکاران (Shamkhalchian *et al.*, 2010) جریان فوق بحرانی در خم با زاویه ۱۸۰ درجه را با استفاده از گسسته‌سازی معادلات دو بعدی آب‌های کم‌عمق با الگوی حجم محدود Roe-TVD و یک شبکه چهارگوش مدل‌سازی کردند. همچنین، با استفاده از روش عددی مذکور به شبیه‌سازی نصب موانع عرضی در کانال، جهت کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای، پرداختند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با نصب صحیح موانع عرضی، ارتفاع امواج تا ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. نیک‌پور (Nikpour, 2013) تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا و واگرای کانال روباز مستطیلی را با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG و RSM در محیط Fluent بررسی کردند. 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 در طراحی کانال‌های انتقال آب از مقاطع دوزنقه‌ای بیشتر استفاده می‌شود در تحقیق حاضر به‌ازای هندسه‌های متفاوت و اعداد فرود مختلف، امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی در آزمایشگاه بررسی شده

مواد و روش‌ها تحلیل ابعادی

در تحلیل ابعادی ارتفاع امواج ضربه‌ای تبدیل‌های همگرا، پارامترهای مؤثر عبارت‌اند از:

جرم مخصوص سیال (ρ)، لزوجت دینامیک سیال (μ)، سرعت جریان در کانال بالادست (u_1)، شتاب ثقل (g)، عمق جریان نزدیک شونده 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 پایین دست (b_2).

ارتفاع امواج ضربه‌ای به‌صورت تابعی از پارامترهای فوق نوشته می‌شود (رابطه ۱):

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

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

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

که در آن،

Fr_1 = عدد فرود در کانال بالادست و Re = عدد رینولدز. در پژوهش حاضر، اعداد رینولدز در محدوده ۲۲۸۴۷-۵۵۶۴۹ قرار دارند و بنابراین به‌علت متلاطم بودن جریان از آنها صرف‌نظر شد. همچنین، پارامتر بی‌بعد b_2/b_1 نشان‌دهنده نسبت همگرایی است. بنابراین رابطه ۲ به‌صورت زیر تغییر می‌یابد (رابطه ۳):

متر و ارتفاع ۱/۲۰ متر است که در بالادست فلوم قرار دارد. شیر فلکه وظیفه تنظیم دبی ورودی به مخزن ذخیره را دارد و روی لوله رانش پمپ نصب شده است. دریچه کشوی فولادی لبه‌تیز در ورودی فلوم قرار دارد و به ضخامت ۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱/۲ متر جهت تنظیم سطح آب ورودی و کنترل عدد فرود است. میزان بازشدگی دریچه مذکور، به‌منظور ایجاد شرایط جریان فوق بحرانی، ۲ سانتی‌متر است. مخزن تخلیه^۱ نیز در قسمت خروجی فلوم و برای هدایت آب به کانال تخلیه و مخزن زیرزمینی آزمایشگاه در نظر گرفته شده است.

برای آماده‌سازی مدل و اجرای 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 به طول ۱ متر استفاده شد. همچنین در ساخت دیواره تبدیل‌ها دو ورق پلکسی‌گلاس به طول ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۳ متر به کار گرفته شد. هندسه مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به شرح جدول ۱ است.

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

به‌همین ترتیب، سرعت موج را مطابق تابع زیر (رابطه ۴) می‌توان نوشت:

$$\bar{u} = f_1 (\rho, \mu, g, u_1, y, L, X, \alpha, b_1, b_2, z, d) \quad (4)$$

که در آن، متغیر \bar{u} متوسط سرعت لحظه‌ای در نقطه اندازه‌گیری به فاصله z قائم از کف و متغیر d گشودگی دریچه است. رابطه ۴ به‌صورت رابطه ۵ تغییر می‌یابد:

$$\frac{\bar{u}}{u_1} = f_4 \left(Fr_1, \frac{X}{L}, \alpha, \frac{b_2}{b_1}, \frac{z}{d} \right) \quad (5)$$

تجهیزات آزمایشگاهی

به‌منظور اجرای 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

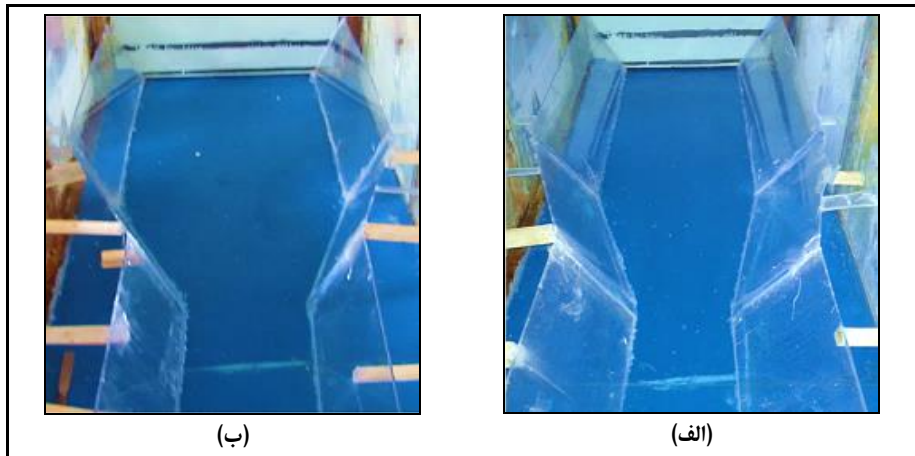
جدول ۱- هندسه مدل‌های مورد استفاده

شماره مدل	عرض کانال بالادست (سانتی‌متر)	عرض کانال پایین‌دست (سانتی‌متر)	طول دیواره تبدیل (متر)	نسبت همگرایی	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه)
۱	۵۰	۲۵	۰/۵	۱ به ۲	۴۵
۲	۵۰	۱۷	۰/۵	۱ به ۳	۴۵
۳	۵۰	۱۲/۵	۰/۵	۱ به ۴	۴۵
۴	۶۰	۳۰	۰/۵	۱ به ۲	۶۰
۵	۶۰	۲۰	۰/۵	۱ به ۳	۶۰
۶	۶۰	۱۵	۰/۵	۱ به ۴	۶۰
۷	۷۲	۳۶	۰/۵	۱ به ۲	۷۰
۸	۷۲	۲۴	۰/۵	۱ به ۳	۷۰
۹	۷۲	۱۸	۰/۵	۱ به ۴	۷۰
۱۰	۶۰	۳۰	۰/۵	۱ به ۲	۹۰
۱۱	۶۰	۲۰	۰/۵	۱ به ۳	۹۰
۱۲	۶۰	۱۵	۰/۵	۱ به ۴	۹۰

نصب شده بود. برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح امواج، از عمق سنج نقطه‌ای مکانیکی ساخت شرکت Armfield با دقت اندازه‌گیری ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. همچنین، به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در نقاط مختلف موج از سرعت‌سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق مدل ACM2-RS با دقت ± 0.5 سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد. در جدول ۱، منظور از نسبت همگرایی، نسبت عرض کانال پایین‌دست به عرض کانال بالادست است. شکل ۱ نیز نمایی از مدل‌های ۱ و ۴ را نشان می‌دهد.

در اغلب مطالعات پژوهشی دیگر 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 به کار رفته است. گفتنی است که امکان اجرای نسبت همگرایی کوچک‌تر از مقادیر مذکور در مدل آزمایشگاهی میسر نیست.

دبی جریان فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی‌سنج صوتی مدل UFM610P با دقت ± 0.2 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد که حسگرهای آن روی لوله آبرسان فلوم



شکل ۱- نمای پایین‌دست تبدیل‌های همگرا

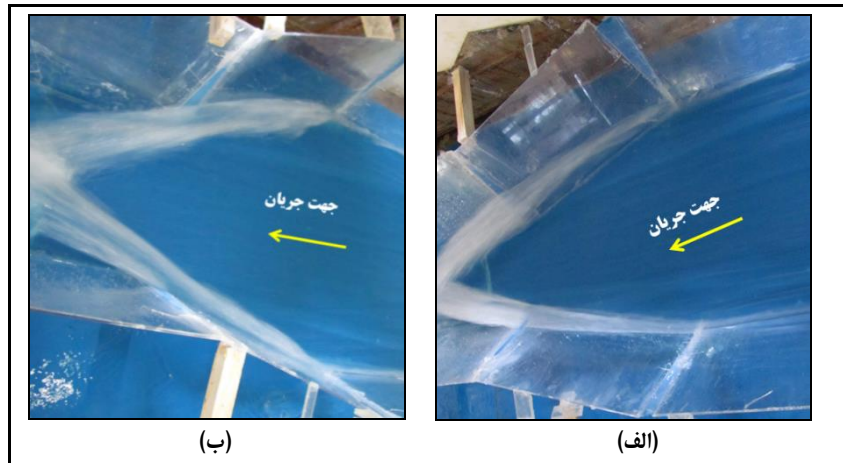
الف) مدل ۱ و ب) مدل ۴

بعد از ماندگار شدن در فواصل طولی ۱۰ سانتی‌متر در طول حرکت جبهه موج تا محل تلاقی امواج در اعداد فرود مختلف اندازه‌گیری شد (مطابق شکل ۳). احتمال وجود خطا در هنگام اندازه‌گیری سطح آب به لحاظ آشفتگی جریان و اختلاط هوا با آب همواره وجود دارد و برای کاهش این خطا، اندازه‌گیری ارتفاع موج در هر مقطع چندین بار تکرار و میانگین آنها به عنوان ارتفاع موج نقطه مورد نظر در محاسبات وارد شد.

شکل ۲، نمونه‌ای از امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرا را در مدل‌های ۱ و ۴ به ازای $Fr_1 = 7/26$ نشان می‌دهد.

روش اجرای آزمایش‌ها

تبدیل‌ها در فاصله‌ای از ابتدای کانال نصب شد که جریان فوق بحرانی ورودی به آن به صورت توسعه‌یافته کامل باشد. همچنین جریان خروجی از تبدیل‌ها در همه آزمایش‌ها به صورت فوق بحرانی بود. آزمایش‌ها با چهار عدد فرود مختلف در بالادست تبدیل در محدوده $Fr_1 = 3/9 - 25/23$ و در مجموع، ۴۸ آزمایش اجرا 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 می‌شوند و با هم تداخل می‌کنند. ارتفاع امواج



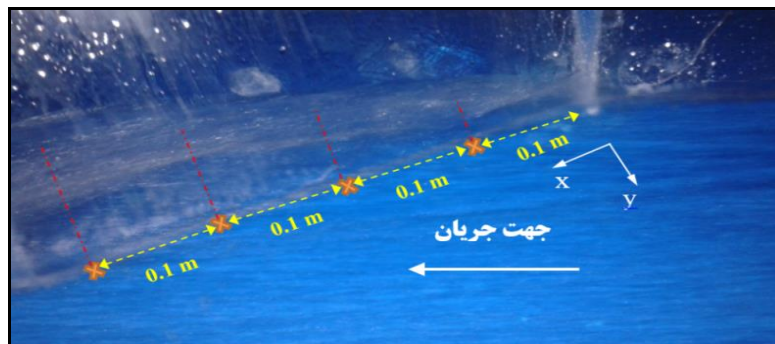
شکل ۲- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها

(الف) مدل ۱ و (ب) مدل ۴

نقطه، ۱۰۰ داده سرعت لحظه‌ای موج در جهت طولی و عرضی (u و v) در مدت زمان ۵ ثانیه برداشت و میانگین آنها (\bar{u} و \bar{v}) به‌عنوان مؤلفه‌های سرعت آن نقطه در نظر گرفته شد.

در شکل ۳، محل‌های اندازه‌گیری سرعت و ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌ها به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است.

سرعت لحظه‌ای در طول حرکت جبهه موج و از فاصله ۱۰ سانتی‌متری ابتدای محل ایجاد موج در چهار مقطع با استفاده از سرعت‌سنج اندازه‌گیری شد. فواصل طولی مقاطع اندازه‌گیری سرعت برابر ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. سرعت جریان در هر امتداد عمودی نیز، از فاصله ۰/۵ سانتی‌متری بستر تا ۱ سانتی‌متری سطح موج در فواصل عمودی ۰/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در هر



شکل ۳- محل‌های اندازه‌گیری سرعت و ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا

الف) تأثیر زاویه شیب جانبی

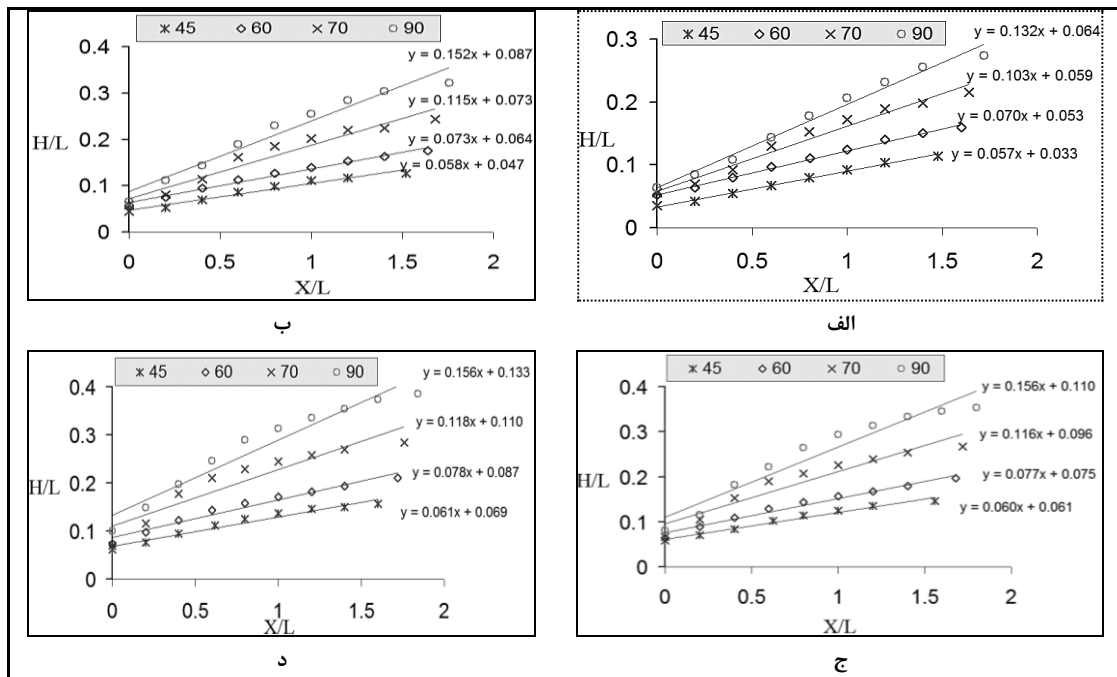
شکل ۴ پروفیل بی‌بعد سطح آزاد امواج ضربه‌ای به‌همراه خط برازش داده شده بین نقاط اندازه‌گیری را به‌ازای $Fr_1 = 3/25 - 9/23$ و نسبت همگرایی ۱ به ۲ و در زاویه‌های مختلف شیب جانبی نشان می‌دهد. پروفیل‌ها نشان می‌دهند که جریان اصلی کانال به محض رسیدن به

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر، تأثیر پارامترهای زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل و نسبت همگرایی به‌عنوان متغیرهای هندسی و عدد فرود به‌عنوان متغیر هیدرولیکی، بر ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای بررسی گردید. در اینجا تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور بررسی می‌شود.

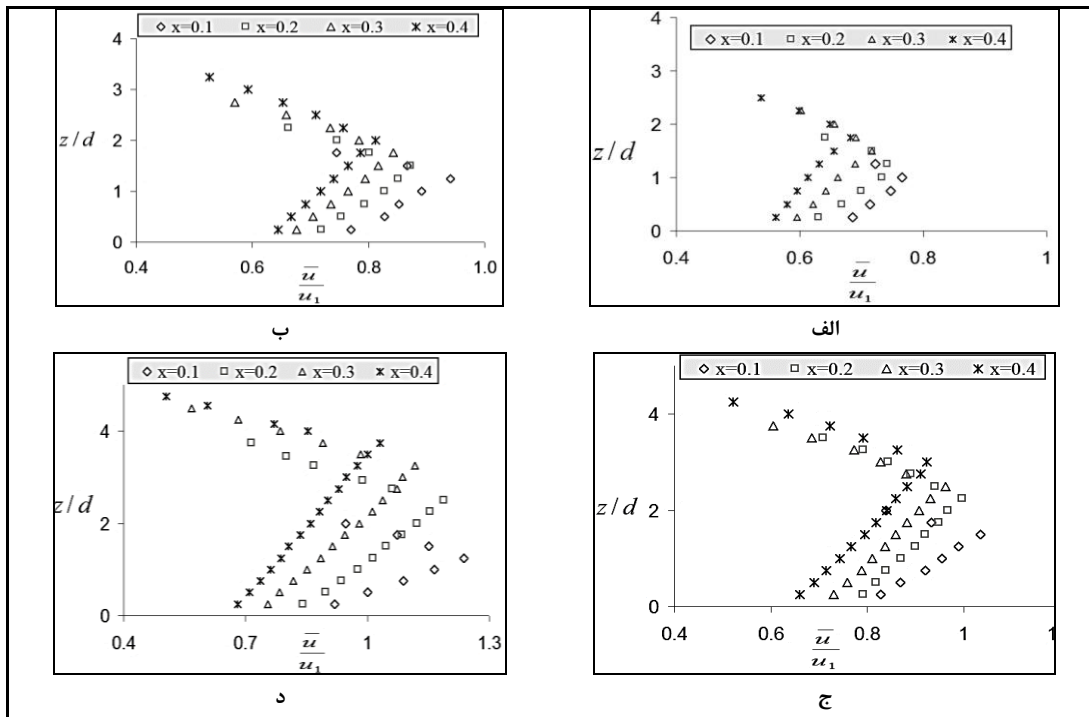
سرعت به مقدار بیشینه، در اثر وجود اختلاط هوا و آب در سطح موج، مقدار آن روند نزولی به خود می‌گیرد. از سوی دیگر، با افزایش زاویه شیب جانبی (کاهش شیب جانبی) دیواره تبدیل، مقادیر بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین، کاهش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل موجب می‌شود تا از تلاطم امواج و اختلاط هوا و آب کاسته شود. کاهش در اختلاط هوا و آب به کاهش اختلاف بین بیشینه سرعت موج و سرعت در نزدیکی سطح موج می‌انجامد. همچنین، به جهت کاهش تلاطم جریان، محل تشکیل بیشینه سرعت بدون بعد موج به سطح آب نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین، به‌ازای عدد فرود و نسبت همگرایی یکسان، کاهش زاویه شیب جانبی دیواره تبدیل، کاهش ارتفاع و بیشینه سرعت امواج را به‌دنبال 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 خواهد شد و در نتیجه آن از ارتفاع و سرعت امواج کاسته می‌شود.

ابتدای تبدیل دچار تغییرات شدید می‌شود و موج‌های ضربه‌ای با انرژی جنبشی بسیار بالایی را به‌وجود می‌آورد. انرژی جنبشی موج‌های تشکیل شده به محض برخورد با جریان اصلی کانال، مستهلک می‌شود و به روند صعودی افزایش ارتفاع موج از محل تشکیل آن، یعنی ابتدای تبدیل تا انتهای آن، می‌انجامد. مقایسه پروفیل‌های سطح آزاد بر اساس شیب خط برآزش داده شده بین نقاط اندازه‌گیری شده (شکل ۴)، حاکی از افزایش ارتفاع امواج با افزایش زاویه شیب جانبی است. 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 می‌گیرد و روند افزایش ارتفاع امواج سریع‌تر است. در شکل ۵، پروفیل بی‌بعد سرعت امواج ضربه‌ای به‌ازای $Fr_1 = 7/26$ و نسبت همگرایی ۱ به ۲ و در زاویه‌های مختلف شیب جانبی نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور، توزیع غیریکنواخت سرعت در هر راستای قائم کاملاً مشهود است، به‌طوری‌که پس از رسیدن



شکل ۴- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای در زاویه‌های مختلف شیب جانبی

الف) $Fr_1 = 3/25$ ب) $Fr_1 = 5/2$ ج) $Fr_1 = 7/26$ د) $Fr_1 = 9/23$



شکل ۵- پروفیل سرعت امواج ضربه‌ای در زاویه‌های شیب جانبی مختلف

(الف) ۴۵ درجه، (ب) ۶۰ درجه، (ج) ۷۰ درجه، (د) ۹۰ درجه و به‌ازای $Fr_1 = 7/26$

۴۵، ۶۰ و ۷۰ درجه نسبت به مقطع مستطیلی به‌طور میانگین، به‌ترتیب به‌میزان $37/51$ ، $25/23$ و $14/67$ درصد کاهش یافته است. برای محاسبه انرژی جنبشی اغتشاش^۱ در طول حرکت جبهه موج، از رابطه $(K = \frac{1}{2} \bar{u}^2)$ استفاده شد. در رابطه مذکور، 'u' نشان دهنده نوسان‌های طولی سرعت لحظه‌ای است.

در جدول ۴، مقدار کاهش گرادیان طولی انرژی جنبشی اغتشاش در مدل‌های مختلف به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ و اعداد فرود مختلف آورده شده است. گفتنی است که مقادیر ذکر شده در جدول ۴ از تفاضل مقادیر انرژی جنبشی اغتشاش در ابتدا و انتهای بازه اندازه‌گیری، نسبت به طول بازه به‌دست آمده است. مقادیر جدول مذکور نشان می‌دهد که به‌ازای عدد فرود ثابت، با افزایش زاویه شیب جانبی دیواره‌ها، گرادیان طولی انرژی جنبشی اغتشاش امواج ضربه‌ای با کاهش بیشتری همراه است و به‌عبارت دیگر در مسافت پیموده شده توسط موج، استهلاک انرژی بیشتری مشاهده می‌شود.

میزان درصد کاهش بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای در مدل‌های مختلف نسبت به مقطع مستطیلی به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ و اعداد فرود مختلف در جدول ۲ گزارش شده است. بر اساس نتایج محاسباتی جدول ۲، بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای به‌ازای زاویه‌های شیب جانبی ۴۵، ۶۰ و ۷۰ درجه نسبت به مقطع مستطیلی به‌طور میانگین، به‌ترتیب به‌میزان $59/34$ ، $44/27$ و $24/04$ درصد کاهش یافته است.

میزان درصد کاهش بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای در مدل‌های مختلف نسبت به مقطع مستطیلی در جدول ۳ گزارش شده است. یادآوری می‌شود که مقادیر ذکر شده در جدول ۳ به‌ازای هر عدد فرود، بر اساس میانگین‌گیری از مقادیر بیشینه سرعت در محل‌های مختلف اندازه‌گیری سرعت موج محاسبه شده است. بر اساس نتایج محاسباتی جدول ۳، بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با مقاطع دوزنقه‌ای به‌ازای زاویه‌های شیب جانبی

جدول ۲- درصد کاهش بیشینه ارتفاع امواج ضربه‌ای در مقاطع دوزنقه‌ای نسبت به مقاطع مستطیلی به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲

میانگین (درصد)	$Fr_1=9/23$	$Fr_1=7/26$	$Fr_1=5/2$	$Fr_1=3/25$	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه)
۵۹/۳۴	۵۹/۶۰	۵۸/۷۱	۶۰/۸۱	۵۸/۲۳	۴۵
۴۴/۲۷	۴۵/۶۱	۴۴/۵۷	۴۵/۲۸	۴۱/۶۲	۶۰
۲۴/۰۴	۲۶/۴۳	۲۴/۴۱	۲۴/۱۱	۲۱/۲۱	۷۰

جدول ۳- درصد کاهش بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای در مقاطع دوزنقه‌ای نسبت به مقاطع مستطیلی به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲

میانگین (درصد)	$Fr_1=9/23$	$Fr_1=7/26$	$Fr_1=5/2$	$Fr_1=3/25$	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه)
۳۷/۵۱	۳۶/۸۷	۳۷/۴۰	۳۷/۵۹	۳۸/۱۶	۴۵
۲۵/۲۳	۲۴/۵۳	۲۴/۸۴	۲۵/۲۳	۳۳/۲۶	۶۰
۱۴/۶۷	۱۴/۱۴	۱۴/۶۰	۱۴/۶۴	۱۵/۳۷	۷۰

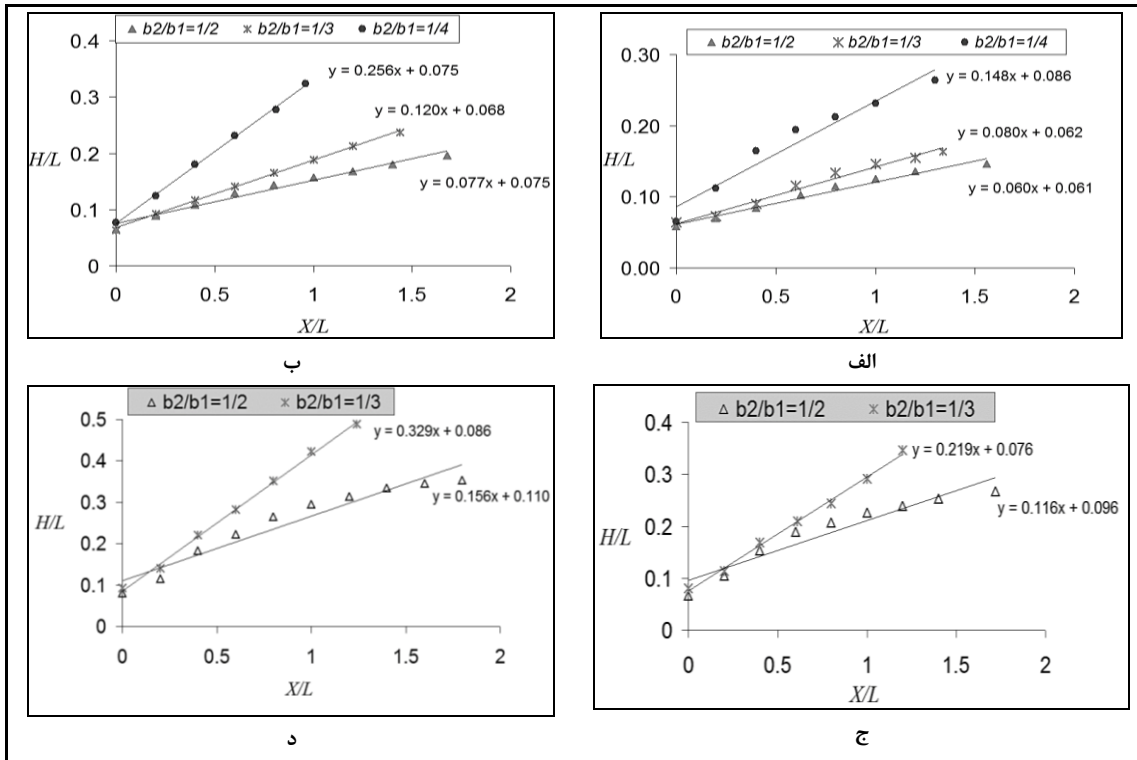
جدول ۴- میزان کاهش گرادیان طولی انرژی جنبشی اغتشاش در بازه اندازه‌گیری به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ (m^2/s^2)

$Fr_1=9/23$	$Fr_1=7/26$	$Fr_1=5/2$	$Fr_1=3/25$	زاویه شیب جانبی دیواره‌ها (درجه)
-۰/۲۶۴	-۰/۲۵۸	-۰/۲۵۲	-۰/۲۴۸	۴۵
-۰/۲۸۱	-۰/۲۷۵	-۰/۲۶۷	-۰/۲۶۱	۶۰
-۰/۲۹۱	-۰/۲۸۶	-۰/۲۸۰	-۰/۲۷۴	۷۰
-۰/۳۱۷	-۰/۳۱۳	-۰/۳۰۷	-۰/۳۰۰	۹۰

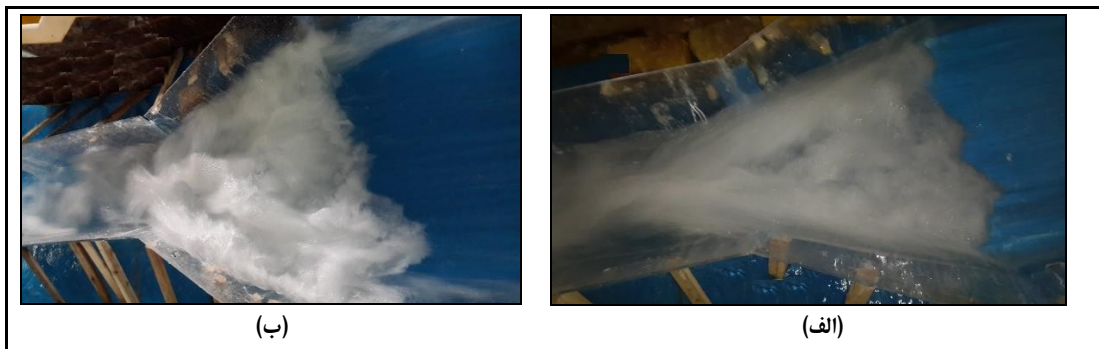
همچنین با توجه به شکل‌ها، کاهش نسبت همگرایی از ۱ به ۳ به ۱ به ۴ روند صعودی ارتفاع امواج ضربه‌ای را سرعت بخشیده به طوری که شیب خط برازش داده شده به بیش از ۲ برابر افزایش یافته است. ضمناً، در زاویه‌های شیب ۷۰ و ۹۰ درجه، عبور جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با نسبت همگرایی ۱ به ۴ به‌ازای تمام اعداد فرود و در زاویه ۶۰ درجه به‌ازای اعداد فرود کمتر از ۷/۲۶ با پدیده انسداد جریان همراه است. شکل ۷، وقوع انسداد جریان را در مدل‌های ۶ و ۹ به ترتیب در اعداد فرود ۵/۲ و ۷/۲۶ نشان می‌دهد.

ب) تأثیر نسبت همگرایی

شکل ۶، پروفیل بی‌بعد سطح آزاد امواج ضربه‌ای را در $Fr_1=7/26$ ، زاویه‌های مختلف شیب جانبی و به‌ازای نسبت‌های همگرایی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت کلی کاهش نسبت همگرایی تبدیل با افزایش ارتفاع موج همراه است. در واقع، به‌ازای طول یکسان دیواره تبدیل، کاهش نسبت همگرایی، تغییرات ناگهانی مسیر عبور جریان فوق بحرانی را تشدید و در نتیجه آن جریان با شدت بیشتری به دیواره تبدیل برخورد می‌کند و به افزایش قابل توجه ارتفاع موج می‌انجامد.



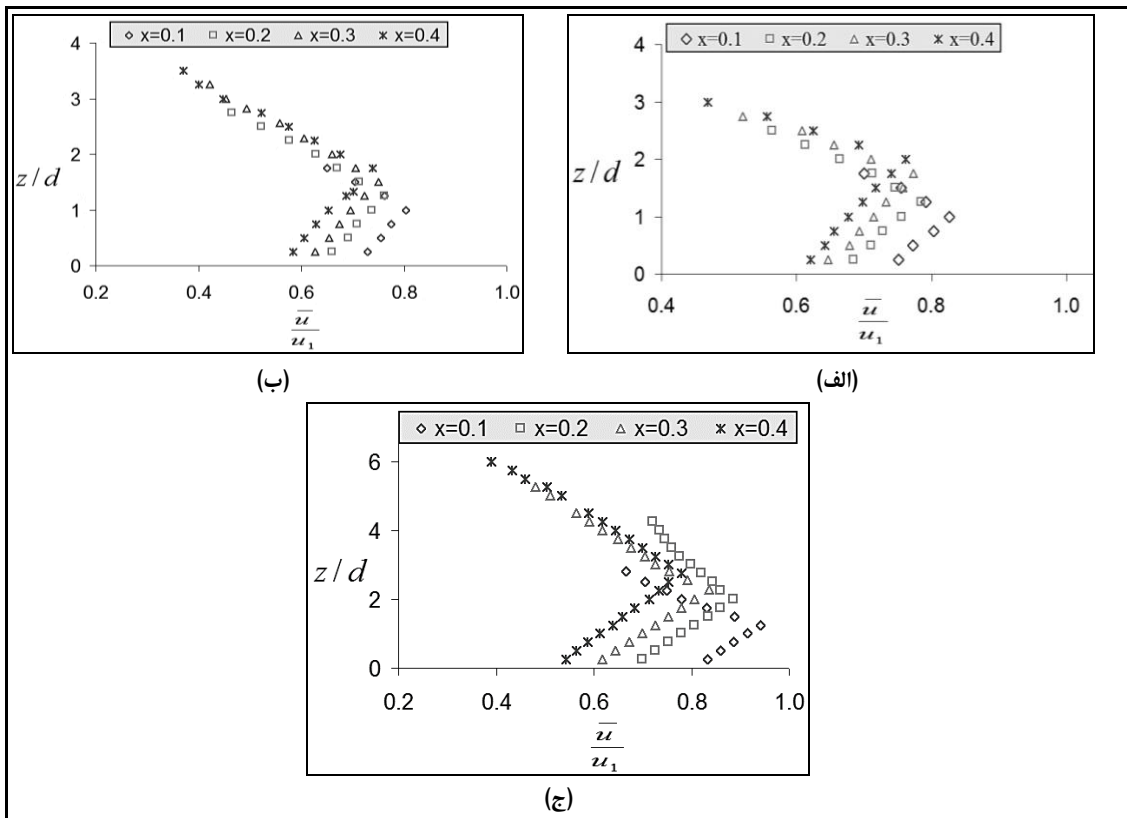
شکل ۶- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای به‌ازای نسبت‌های همگرایی مختلف و $Fr_1 = 7/26$ (الف ۴۵ درجه، ب ۶۰ درجه، ج ۷۰ درجه و د ۹۰ درجه)



شکل ۷- وقوع انسداد جریان (الف) در مدل ۶ و (ب) در مدل ۹

تشکیل شده نیز تشدید می‌شود و جریان با تلاطم و اغتشاش بالا تشکیل خواهد شد و میزان اختلاط هوا و آب نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که این اختلاط و تلاطم منجر می‌شود به افزایش اختلاف بین بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای با مقدار آن در سطح آزاد امواج. علاوه بر آن، با کاهش نسبت همگرایی موقعیت تشکیل بیشینه سرعت به بستر نزدیک‌تر می‌شود.

شکل ۸، پروفیل بی‌بعد سرعت امواج ضربه‌ای را در $Fr_1 = 9/23$ ، زاویه شیب جانبی ۶۰ درجه و به‌ازای نسبت‌های همگرایی مختلف نشان می‌دهد. در هنگام عبور جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا، کاهش نسبت همگرایی موجب تشدید در تغییرات ناگهانی سیال می‌شود به‌طوری‌که با کاهش نسبت همگرایی از ۱ به ۲ به ۱ به ۳ سرعت امواج ضربه‌ای



شکل ۸- پروفیل بدون بعد سرعت امواج ضربه‌ای در نسبت‌های همگرایی مختلف

(الف) ۱ به ۲، (ب) ۱ به ۳ و (ج) ۱ به ۴، به‌ازای زاویه شیب جانبی ۶۰ درجه، طول مورب تبدیل ۰/۵ متر و $Fr_1 = 9/23$

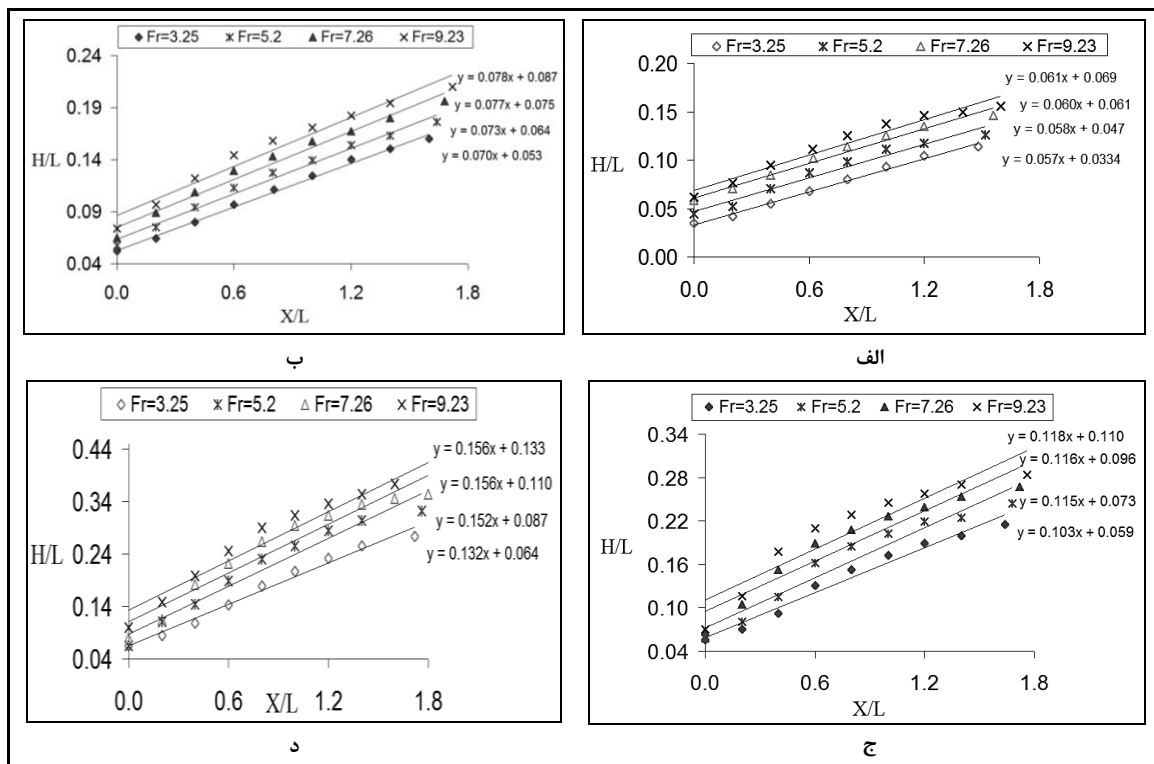
ج) تأثیر عدد فرود جریان نزدیک‌شونده

شکل ۹، پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای را به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲، زاویه‌های شیب جانبی و اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد فرود جریان، افزایش ارتفاع امواج ضربه‌ای را به‌دنبال 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 تشکیل شده و در ادامه برخورد سریع‌تر جریان اصلی کانال با موج نیز تأثیر افزایشی بر ارتفاع موج داشته است.

شکل ۹ همچنین نشان می‌دهد که به‌ازای نسبت همگرایی و شیب جانبی یکسان دیواره تبدیل‌ها، شیب

افزایش ارتفاع امواج تقریباً ثابت است. به‌عبارت دیگر، تغییر عدد فرود تأثیر چندانی بر روند تغییرات ارتفاع امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا ندارد.

برای بررسی تأثیر تغییرات اعداد فرود بر پروفیل سرعت امواج ضربه‌ای، بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اعداد گزارش شده، مشخص می‌شود که تغییر اعداد فرود تغییرات چشمگیری را در بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای تولید نمی‌کند و در نتیجه تأثیر اعداد فرود بر تغییرات سرعت بیشینه و همچنین پروفیل سرعت امواج ضربه‌ای نسبت به تغییرات پارامترهای هیدرولیکی چندان چشمگیر نیست.



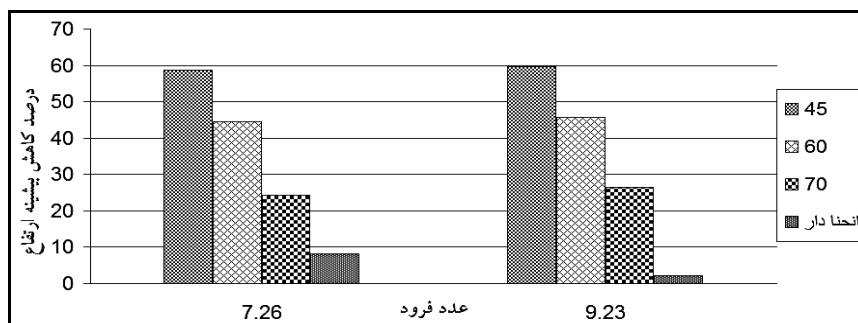
شکل ۹- پروفیل سطح آزاد امواج ضربه‌ای به‌ازای نسبت‌های همگرایی ۱ به ۲ و زاویه‌های شیب جانبی (الف) ۴۵ درجه، (ب) ۶۰ درجه، (ج) ۷۰ درجه و (د) ۹۰ درجه

جدول ۵- تغییرات بیشینه سرعت (متر بر ثانیه) در مقاطع مختلف اندازه‌گیری سرعت امواج ضربه‌ای به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲

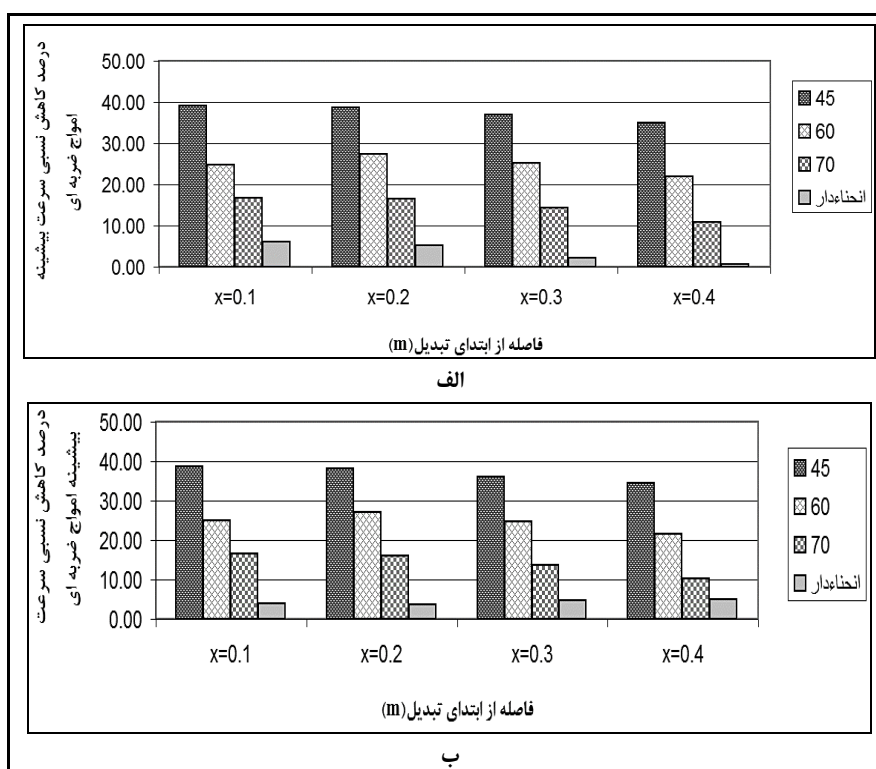
Fr ₁ =۹/۲۳	Fr ₁ =۷/۲۶	Fr ₁ =۵/۲	Fr ₁ =۳/۲۵	فاصله از ابتدای تبدیل (متر)	زاویه شیب جانبی تبدیل
۲/۳۵۷	۲/۲۰۵	۲/۰۸۶	۱/۹۸۷	x=۰/۱	۴۵
۲/۳۱۷	۲/۱۳۶	۱/۹۷۸	۱/۸۵	x=۰/۲	
۲/۲۸۴	۲/۰۶۴	۱/۸۸۷	۱/۷۴۳	x=۰/۳	
۲/۲۰۶	۱/۹۶۶	۱/۷۵۷	۱/۵۸	x=۰/۴	
۲/۸۸۹	۲/۷۲۹	۲/۵۸۷	۲/۴۶۶	x=۰/۱	۶۰
۲/۷۳۲	۲/۵۲۹	۲/۳۴۸	۲/۱۹۳	x=۰/۲	
۲/۶۹۱	۲/۴۴۳	۲/۲۱۷	۲/۰۲	x=۰/۳	
۲/۶۴۷	۲/۳۵۵	۲/۰۹۳	۱/۸۶۸	x=۰/۴	
۳/۲۱۴	۳/۰۱۴	۲/۸۴۹	۲/۷۱۲	x=۰/۱	۷۰
۳/۱۳۸	۲/۹۰۴	۲/۷۰۹	۲/۵۴۸	x=۰/۲	
۳/۰۸۷	۲/۸۰۱	۲/۵۵۶	۲/۳۴۹	x=۰/۳	
۳/۰۲۲	۲/۶۸۹	۲/۴۲۵	۲/۱۸۶	x=۰/۴	
۳/۸۵	۳/۶۲۴	۳/۴۵۱	۳/۳۰۴	x=۰/۱	۹۰
۳/۷۴	۳/۴۸	۳/۲۷۹	۳/۱۰۷	x=۰/۲	
۳/۵۷۳	۳/۲۷	۳/۰۲۳	۲/۸۰۵	x=۰/۳	
۳/۳۷	۳/۰۲	۲/۶۴۴	۲/۴۱۱	x=۰/۴	

و سرعت امواج ضربه‌ای به ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ و اعداد فرود مشابه ۷/۲۶ و ۹/۲۳ مقایسه شده است. دیده می‌شود که برای کاهش بیشینه ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای، وجود شیب جانبی دیواره تبدیل مؤثرتر از انحنا دیواره است.

در پژوهش نیک‌پور (Nikpour, 2013)، مقدار کاهش بیشینه ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا با دیواره انحنا دار، نسبت به دیواره مستقیم، به‌ازای اعداد فرود مختلف بررسی شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تأثیر شیب جانبی و انحنا دیواره تبدیل بر بیشینه ارتفاع



شکل ۱۰- مقایسه درصد کاهش سرعت بیشینه امواج در مقاطع دوزنقه‌ای و انحنا دار نسبت به مقطع مستطیلی به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲ و اعداد فرود مختلف



شکل ۱۱- مقایسه درصد کاهش سرعت بیشینه امواج در مقاطع دوزنقه‌ای و انحنا دار نسبت به مقطع مستطیلی به‌ازای نسبت همگرایی ۱ به ۲. الف) $Fr_1=7/26$ و ب) $Fr_1=9/23$

نتیجه‌گیری

اما تغییر عدد فرود تأثیر چندانی بر تغییرات ارتفاع امواج در تبدیل‌های همگرا ندارد.

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

- مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج تحقیق (Nikpour, 2013) نشان می‌دهد که برای کاهش ارتفاع و بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای، شیب‌دار کردن دیواره‌های تبدیل مؤثرتر است تا انحنادار کردن آنها.

- بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر، توصیه می‌شود که در هنگام طراحی تبدیل‌های همگرا در حالت عبور جریان فوق بحرانی به‌منظور به حداقل رساندن ارتفاع امواج ضربه‌ای و تأثیرات مخرب آن، کوچک‌ترین زاویه شیب جانبی ممکن برای دیواره تبدیل انتخاب شود و اگر در انتخاب متغیرهای هندسی، قبل از اجرای مدل واقعی، محدودیتی باشد با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی یا عددی، پدیده تشکیل امواج بررسی شود.

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل آزمایشگاهی به تحلیل هیدرولیکی امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرای کانال روباز با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی پرداخته شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

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

- افزایش زاویه شیب جانبی علاوه بر افزایش ارتفاع امواج ضربه‌ای موجب تسریع روند افزایشی آن در طول حرکت جبهه موج می‌شود. ضمناً، تغییرات مذکور بر مقادیر بیشینه سرعت امواج ضربه‌ای و میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم پروفیل سرعت موج تأثیر افزایشی دارد.

- به‌ازای طول یکسان دیواره تبدیل، کاهش نسبت همگرایی اگر به بروز پدیده انسداد نینجامد، بر ارتفاع امواج ضربه‌ای و سیر صعودی آن تأثیر افزایشی دارد.

- به‌ازای متغیرهای هندسی یکسان، متناسب با افزایش عدد فرود جریان، ارتفاع امواج ضربه‌ای نیز افزایش می‌یابد.

مراجع

- Beltrami, G. M., Del Guzzo, A. and Repetto, R. 2007. A simple method to regularize supercritical flow profiles in bends. *J. Hydraul. Res.* 45(6): 773-786.
- Causon, D. M., Mingham, C. G. and Ingram, D. M. 1999. Advances in calculation methods for supercritical flow in spillway channels. *J. Hydraul. Eng.* 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. *J. Hydraul. Res.* 53(2): 274-281.
- Jafarzadeh, M. R. and Alamatian, A. 2009. Investigation of turbulence models in simulation of shock waves in channels with supercritical flows. *Proceedings of the 8th Hydraulic Conference of Iran.* Nov. 17-19. Tehran, Iran. (in Persian)
- Jafarzadeh, M. R., Shamkhalchian, A. and Jomehzadeh, M. 2012. Supercritical flow profile improvement by means of a convex corner at a bend inlet. *J. Hydraul. Res.* 50(6): 623-630.
- Jan, C. D., Chang, C. J., Lai, J. S. and Guo, W. D. 2009. Characteristics of hydraulic shock waves in an inclined chute contraction-experiments *J. Mech.* 25(2): 129-136.
- Kolarević, M., Savić, L., Kapor, R. and Mladenović, N. 2013. Supercritical flow in circular pipe bends. *FME. Trans.* 42(2): 128-133.

- Krüger, S. and Rutschmann, P. 2006. 3D modeling supercritical flow with extended shallow-water approach. *J. Hydraul. Eng.* 132(9): 916-926.
- Montazeri-Namin, M., Ghazanfari-Hashemi, R. and Ghaeini-Hessaroeeyeh, M. 2012. 3D numerical simulation of supercritical flow in bends of channel. *International Conference on Mechanical Automotive and Materials Engineering*. Jan. 7-8. Dubai United Arab Emirates.
- Nikpour, M. R. 2013. Experimental and numerical investigation of supercritical flows in open-channels contraction. Ph. D Thesis. Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. (in Persian)
- Reinauer, R. and Hager, W.H. 1997. Super critical bend flow. *J. Hydraul. Eng.* 123(3): 208-218.
- Shamkhalchian, A., Jomehzadeh, M. and Jafarzadeh, M. 2010. Inhibition of shock waves of supercritical flow in curved with obstacles. *International Conference of Civil Eng.* May. 14-16. University of Firdausi, Mashhad, Iran. (in Persian)
- Ya-kun, L. and Han-gen, N. 2008. Abrupt deflected supercritical water flow in slopped channels. *J. Hydrodynamics.* 20(3): 293-298.



Experimental Investigation of Super Critical Flows in Open-Channels Contraction with Trapezoidal and Rectangular Sections

F. Shoja-Talatapeh*, D. Farsadizadeh, A. Hosseinzadeh-Dalir, J. Behmanesh
and M. R. Nikpour

*Corresponding Author: Ph. D. Student, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
Email: farinaz4433@yahoo.com

Received: 18 April 2017, Accepted: 30 July 2017

Abstract

In the present research, height and velocity of shock waves in contractions of open-channel with trapezoidal and rectangular sections was investigated using experimental models. For this purpose, length of transition (0.5m), convergence ratio (1/2, 1/3 and 1/4) and side slope angle (45°, 60°, 70° and 90°) were considered as geometric variables of the experiments. Also 4 Froude number was assumed as a hydraulic variable of the experiments in the range of 3.25-9.23. Analysis of free surface and velocity profiles of shock waves showed that in general, the increasing of side slope angle of the transition wall, reduction of convergence ratio, and increasing of Froude number have a direct relationship with the increasing height and velocity of shock waves. The results showed that in the contraction with trapezoidal section with the convergence ratio (1/2) and side slope angle (45°, 60° and 70°) compared with rectangular cross-section, on average maximum height of shock waves respectively decreased to: 59.34, 44.27 and 24.04. In the same condition, the maximum velocity of shock waves respectively decreased to: 37.51, 25.23 and 14.67. As Executive channels mainly with a trapezoidal cross-section are building and operating, so the findings of this study can be very useful for design engineers.

Keywords: Convergence Ratio, Shock Waves, Side Slope Angle