

مطالعه آزمایشگاهی و عددی امواج ضربه‌ای در تبدیل‌های همگرا

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

* - نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز E-mail: rezanikpoor@yahoo.com

۲ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۳ - استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

۴ - دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۵ - کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۱۸

چکیده

امواج ضربه‌ای عمدتاً در هنگام عبور جریان فوق بحرانی در کانال‌های غیر منشوری به وجود می‌آیند. در تحقیق حاضر مقادیر ارتفاع و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای به‌ازای چهار عدد فرود مختلف در دو تبدیل با نسبت همگرایی ثابت و با زوایای همگرایی ۷/۶ و ۲۱/۳ درجه (مدل‌های یک و دو)، اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی سه بعدی از مدل‌های آشفتگی *k-ε RNG* و *RSM* استفاده گردید. میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدل‌های آشفتگی مذکور به ازای عدد فرود ۷ در مدل یک به ترتیب ۱/۸۲ درصد و ۱/۰۶ درصد و در مدل دو به ترتیب ۳/۴۶ درصد و ۲/۶۷ درصد بدست آمد. همچنین میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت موج به ازای شرایط فوق در مدل یک به ترتیب ۲/۳۵ درصد و ۱/۴۴ درصد و در مدل دو به ترتیب ۵/۷۵ درصد و ۳/۲۳ درصد حاصل شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل آشفتگی *RSM* در شبیه‌سازی امواج ضربه‌ای عملکرد بهتری به همراه دارد.

کلیدواژه‌ها: امواج ضربه‌ای، تبدیل همگرا، جریان فوق بحرانی، مدل آشفتگی.

Experimental and Numerical Study of Shock Waves in Contractions

M.R. Nikpoor^{1*}, D. Farsadzadeh², A. Hosseinzadeh Dalir³, J. Behmanesh⁴ and F. Shoja⁵

- 1- Ph.d. Student, Water Engineering Department, University of Tabriz, Iran.
- 2- Associated Professor, Water Engineering Department, University of Tabriz, Iran.
- 3- Professor, Water Engineering Department, University of Tabriz, Iran.
- 4- Associated Professor, Water Engineering Department, University of Urmia, Iran.
- 5- M.Sc. Water Engineering Department, University of Tabriz, Iran.

Received: 7 April 2013

Accepted: 4 Sep 2013

Abstract

Shock waves are often occurring during passage of supercritical flow in the non-prismatic channels. In the present study, values of height and instantaneous velocities were measured in various points of shock waves observed in two contractions with fixed convergence ratio and convergence angles of 7.6 and 21.3 degrees for four Froude Numbers (models 1 and 2). *RNG k-ε* and *RSM* turbulence models were used for 3-D simulation. The average relative errors of wave profile calculation for $Fr_1=7.0$ using the mentioned turbulence models were 1.82% and 1.06% for the model 1, 3.46% and 2.67% for the model 2, respectively. Also, wave velocity values were 2.35% and 1.44% for the model 1, 5.75% and 3.23% for the model 2, respectively. The results showed that the *RSM* model performed slightly better than *RNG k-ε* model in simulating of shock waves.

Keywords: Shock waves, Contraction, Supercritical flow, Turbulence model.

مقدمه

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 پایین دست استفاده کردند. 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. در تحقیق حاضر بر اساس کار آزمایشگاهی انجام گرفته مقادیر ارتفاع و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای به‌ازای چهار عدد فرود مختلف در دو تبدیل همگرا با دیواره مستقیم و با زوایای همگرایی ۷/۶ و ۲۱/۳ درجه اندازه‌گیری و تحلیل شده است. علاوه بر آن، شبیه‌سازی عددی جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا با استفاده از نرم-افزار FLUENT انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

کلیه مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه، در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع دیواره‌های ۰/۷ متر انجام گرفت. در بالادست فلوم یک مخزن به طول ۱/۷۵ متر، عرض ۱/۶۵ متر و ارتفاع ۱/۲۰ 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 لوله رانش پمپ نصب شده بود، تنظیم می‌شد. در ورودی فلوم یک دریچه کشویی فولادی لبه‌تیز به ضخامت ۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱/۲ متر به‌منظور تنظیم سطح آب ورودی و کنترل عدد فرود نصب شده بود. در قسمت خروجی فلوم، یک مخزن تخلیه^۱ برای هدایت آب به کانال زهکش و سپس مخزن زیرزمینی آزمایشگاه طراحی شده بود. در طی آزمایش‌ها از ۴ ورق پلگسی-گلاس به ضخامت ۶ میلی‌متر، طول ۱ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به‌منظور ایجاد کانال‌های بالادست و پایین دست تبدیل‌ها استفاده شد. برای دیواره‌های تبدیل‌ها نیز از ۴ ورق پلگسی-گلاس به ضخامت ۶ میلی‌متر، طول ۱/۵ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده گردید. به منظور نصب دیواره‌های تبدیل و همچنین کانال‌های بالادست و پایین دست، یک کف کاذب از جنس پلی‌اتیلن فشرده به ضخامت ۱ سانتی‌متر، طول ۳/۵ متر و عرض ۱ متر در ابتدای فلوم کار گذاشته شد. به‌منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا، در کلیه آزمایش‌ها میزان بازشدگی دریچه کشویی ۲ سانتی‌متر و عرض کانال‌های بالادست و پایین دست به

جریان‌های فوق بحرانی در بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی ساخت بشر از جمله شوت سرریزها، کانال‌های انتقال آب و مجاری فاضلاب مشاهده می‌شوند. به علاوه، جریان‌های فوق بحرانی در بسیاری از کانال‌های طبیعی مانند رودخانه‌های کوهستانی نیز رخ می‌دهند (جیمنز و چادری^۱، ۱۹۸۸). در جریان‌های فوق بحرانی امواج ضربه‌ای^۲ در سطح جریان به وفور دیده می‌شوند و همین مسأله وجه اصلی تمایز جریان‌های فوق بحرانی و زیربحرانی است (هگر^۳، ۱۹۸۹). 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 اثر بروز این امواج یک الگوی آشفتگی تشکیل می‌شود که در مسافت‌های قابل توجهی در پایین دست تأثیر می‌گذارد (چاو^۴، ۱۹۵۹). پیش‌بینی محل‌های احتمالی وقوع امواج ضربه‌ای و تخمین ارتفاع آنها به‌منظور محاسبه ارتفاع مورد نیاز دیواره کانال با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. کروگر و راتشمان^۵ (۲۰۰۶) با حل معادلات کلاسیک^۶ و توسعه یافته آب‌های کم‌عمق^۷ 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^۸ (۲۰۰۸) با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی مزامدر و هگر^۹ (۱۹۹۳) 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 به ازای چهار عدد فرود مختلف، پروفیل سطح آب استخراج و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید که از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار بودند. منتظری نمین و همکاران (۲۰۱۲) 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 (۲۰۱۲) به‌منظور کاهش ارتفاع امواج ضربه‌ای در خم‌ها، یک گوشه محدب در ورودی یک خم آزمایشگاهی ایجاد کردند. امواج منفی تشکیل

- 1- Jimenz and Chaudhry
- 2- Shock waves
- 3- Hager
- 4- Chow
- 5- Kruger and Rutschmann
- 6- Classic Shallow Water
- 7- Extended Shallow Water Equations
- 8- Stamo et all
- 9- Mazumder and Hager

10- Tail tank

جدول ۱- مشخصات آزمایش

Q (lit/s)	H (m)	Fr ₁
۱۹/۱	۰/۷۹	۳/۲
۳۲/۴	۰/۹۰	۵/۴
۳۸/۶	۰/۹۸	۷/۰
۴۶/۳	۱/۰۸	۹/۱



شکل ۱- تبدیل مدل یک



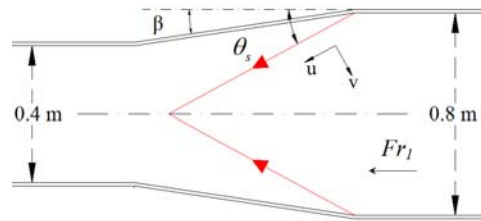
شکل ۲- تبدیل مدل دو

آب مخزن و Fr_1 : عدد فرود متناظر با آن در کانال بالادست می‌باشد.

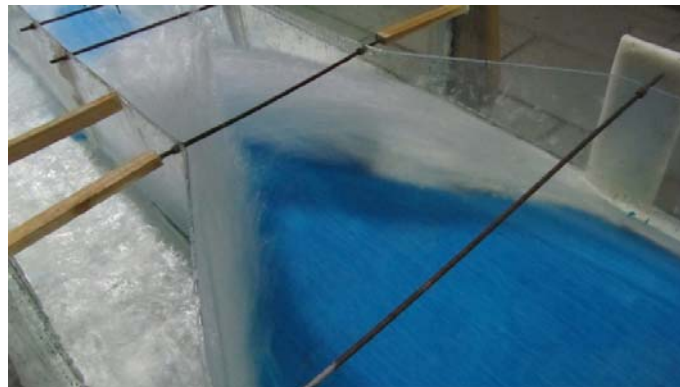
به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه‌ای، دو تبدیل همگرا با دیواره مستقیم و با زوایای همگرایی $۷/۶$ و $۲۱/۳$ درجه به کار گرفته شد (مدل‌های ۱ و ۲). شکل‌های ۱ و ۲ نمایشی از تبدیل‌های همگرای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

پس از تنظیم و تثبیت ارتفاع آب در مخزن هد (با استفاده از اشل دیواره مخزن) به ازای اعداد فرود مذکور در جدول (۱)، با عبور آب از زیر دریچه کشویی جریان فوق بحرانی در داخل کانال برقرار می‌گردد. 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. در شکل (۳) نحوه تشکیل و برخورد اولین امواج ضربه‌ای نمایش داده شده است. در این شکل، β :

ترتیب برابر ۸۰ و ۴۰ سانتی‌متر (نسبت همگرایی برابر ۰/۵) در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری دبی جریان عبوری از فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی سنج صوتی مدل $UFM610P$ ، با دقت ± 0.2 لیتر بر ثانیه که حسگرهای آن بر روی لوله آبرسان فلوم نصب شده بود، انجام گرفت. برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح امواج از عمق سنج نقطه‌ای با دقت اندازه‌گیری ± 0.1 میلی‌متر استفاده شد. همچنین به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در نقاط مختلف موج از سرعت سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق با دقت ± 0.5 سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد. آزمایش‌ها به ازای چهار عدد فرود $۳/۲$ ، $۵/۴$ ، $۷/۰$ و $۹/۱$ انجام گرفت. لازم به ذکر است که تغییر عدد فرود در طی آزمایش‌ها از طریق تغییر ارتفاع آب در مخزن هد حاصل شد که در جدول (۱) مقادیر آن آورده شده است. در این جدول، Q نشان‌دهنده دبی ورودی به مخزن، H : ارتفاع



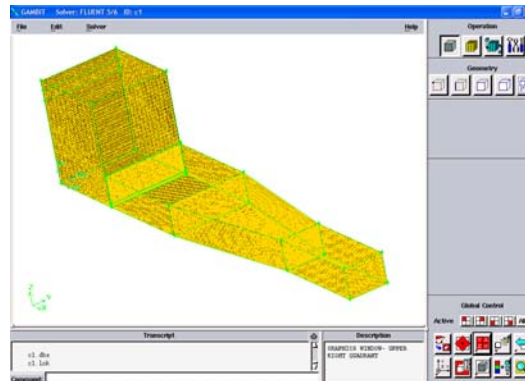
شکل ۳- نحوه تشکیل و برخورد اولین امواج ضربه‌ای

شکل ۴- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل مدل یک به ازای $Fr_1=7$ شکل ۵- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل مدل دو به ازای $Fr_1=7$

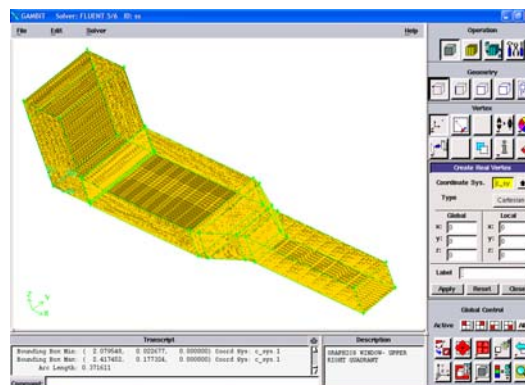
لازم به ذکر است که مدت برداشت داده‌های سرعت در هر نقطه، پنج ثانیه در نظر گرفته شده بود که در طی زمان مذکور ۱۰۰ مؤلفه لحظه‌ای سرعت در جهت‌های طولی و عرضی موج (u و v در شکل ۳) اندازه‌گیری شده و میانگین آنها (\bar{u} و \bar{v}) به‌عنوان مؤلفه‌های سرعت نقطه مورد نظر ثبت می‌گردید. پروفیل سطح امواج نیز در طول حرکت جبهه موج با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری گردید. با توجه به آشفتگی بالای جریان و اختلاط آب و هوا، احتمال بروز خطا در هنگام قرائت پروفیل سطح آب وجود داشت. به‌منظور به حداقل رساندن خطای مذکور در هر نقطه چندین بار مقدار عمق اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به‌عنوان ارتفاع موج نقطه مورد نظر ثبت می‌گردید.

نشان‌دهنده زاویه همگرایی تبدیل و θ_s : زاویه تشکیل امواج نسبت به امتداد دیوار کانال بالادست می‌باشد. شکل‌های (۴) و (۵) نیز نمونه‌ای از امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرا را به ازای $Fr_1=7$ نشان می‌دهد.

مقادیر سرعت لحظه‌ای در طول حرکت جبهه موج از فاصله ۱۰ سانتی‌متری ابتدای تشکیل موج در پنج مقطع به فواصل طولی ۳۰ سانتی‌متر در مدل یک و ۱۰ سانتی‌متر در مدل دو توسط سرعت‌سنج اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین در مدل یک در هر راستای قائم، از فاصله ۵ میلی‌متری بستر تا ۵ میلی‌متری سطح موج در فواصل قائم ۵ میلی‌متری سرعت اندازه‌گیری شد. در مدل دو نیز برداشت قائم سرعت از فاصله ۵ میلی‌متری بستر تا ۱ سانتی‌متری سطح موج در فواصل قائم ۱ سانتی‌متری انجام گرفت.



شکل ۶- هندسه شبکه‌بندی شده مدل ۱ در محیط GAMBIT



شکل ۷- هندسه شبکه‌بندی شده مدل ۲ در محیط GAMBIT

مدل عددی

شبیه‌سازی جریان در نزدیکی دیواره، تابع دیواره غیرمتعادلی^۶ به کار کار گرفته شد. قبل از ورود به محیط *FLUENT* هندسه مدل توسط نرم‌افزار *GAMBIT* شبکه‌بندی شد. به منظور مستقل از شبکه شدن هندسه مدل طی چهار مرحله به ازای شرایط مرزی یکسان، شبکه مدل ریزتر و تعداد المان‌ها افزایش یافت که در نهایت با بررسی رفتار خطای شبیه‌سازی، برای شبکه‌بندی مدل‌های یک و دو به ترتیب ۴۷۳۲۰۰ و ۳۶۵۴۰۰ المان ۶ وجهی در نظر گرفته شد. شکل‌های (۶) و (۷) هندسه شبکه‌بندی شده مدل‌های یک و دو را در محیط *GAMBIT* نشان می‌دهد. آرایش شبکه‌ها به گونه‌ای طراحی شد که بسته به میزان حساسیت نواحی حل از المان‌ها با اندازه‌های متفاوت استفاده گردید. با توجه به اینکه *FLUENT* از این قابلیت برخوردار می‌باشد که در نقطه‌ای معین از مدل شبیه‌سازی شده پارامترهای هیدرولیکی از قبیل فشار، سرعت جریان و... را بر اساس گام زمانی تعیین شده برداشت کند، لذا مختصات نقاط اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای و عمق جریان در مدل‌های آزمایشگاهی جهت استخراج نتایج به نرم‌افزار معرفی شد. در نهایت به منظور بررسی کارایی مدل‌های عددی پارامتر درصد خطای نسبی به ازای عمق و سرعت

در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی سه بعدی جریان از نرم‌افزار *FLUENT* استفاده گردید. در محیط این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی حرکت سیال معادله‌های ناویر-استوکس^۱ در حالت کامل به همراه معادلات آشفتگی و مدل شبیه‌سازی جریان چند فازی با استفاده از تکنیک حجم محدود، گسسته‌سازی و حل می‌شوند. برای تحلیل آشفتگی از مدل‌های $k-\varepsilon$ RNG^۲ و $k-\varepsilon$ RSM^۳ استفاده شد. مدل $k-\varepsilon$ که شامل سه نوع *STANDARD*، *RNG* و *REALIZABLE* می‌باشد، دارای دو معادله مستقل براساس k و ε می‌باشد. در این مدل k معرف انرژی جنبشی اغتشاش و ε معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش^۴ می‌باشد. در مدل *RSM* علاوه بر معادله‌های K و ε سه معادله اضافه نیز برای تحلیل تنش‌های رینولدز حل می‌گردد. برای شبیه‌سازی جریان چند فازی با توجه به اختلاط آب و هوا در سطح موج از مدل اختلاط^۵ استفاده شد. همچنین برای

- 1- Navier-Stokes equations
- 2- Renormalization-group k- ε model (RNG)
- 3- Reynolds stress model
- 4- Dissipation rate of turbulent kinetic energy
- 5- Mixture

6- Non-Equilibrium Wall Function

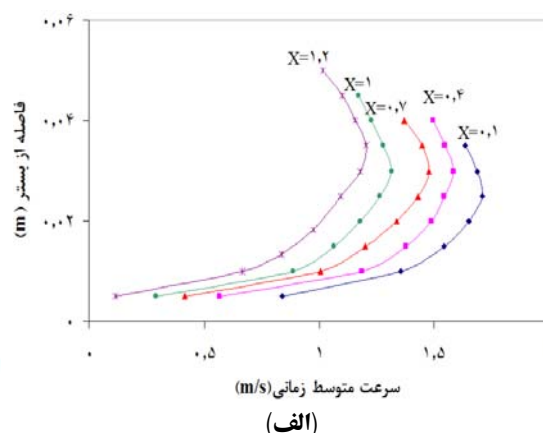
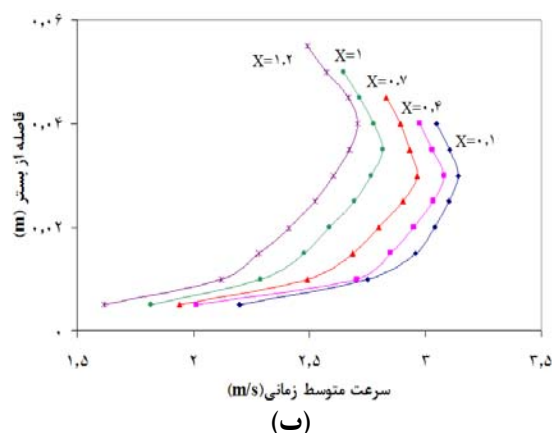
نتایج و بحث

نتایج مدل آزمایشگاهی

در شکل‌های (۸) و (۹) پروفیل‌های سرعت در امتداد حرکت امواج ضربه‌ای به عنوان نمونه به ازای اعداد فرود $Fr_1 = 3/2$ و $Fr_1 = 7/0$ در مدل‌های یک و دو نمایش داده شده است. در شکل‌های مذکور منظور از X فاصله طولی بر حسب متر نسبت به مبدأ تشکیل موج (ابتدای تبدیل) و در امتداد حرکت جبهه موج می‌باشد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نیز تغییرات ارتفاع جبهه موج را در امتداد حرکت آن به ازای اعداد فرود مختلف در مدل‌های مذکور نشان می‌دهند.

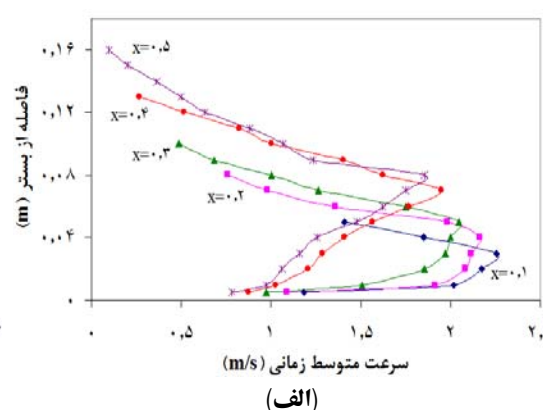
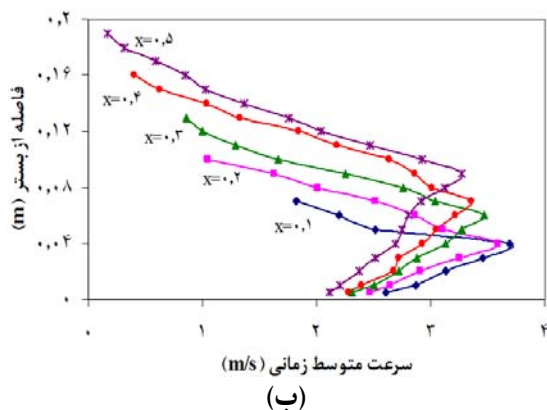
محاسباتی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه (۱) به صورت مجزا محاسبه گردید.

$$(1) \quad \left| \frac{\text{محاسباتی} - \text{اندازه‌گیری شده}}{\text{اندازه‌گیری شده}} \right| \times 100 = \text{خطای نسبی (\%)}$$



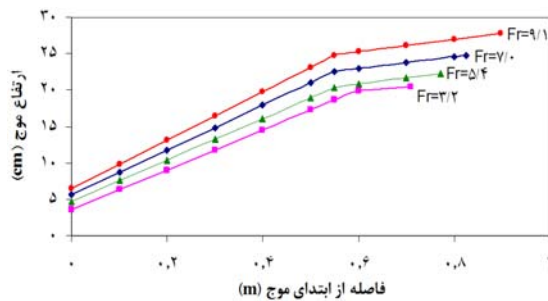
شکل ۸- پروفیل‌های سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل یک به ازای اعداد فرود مختلف

(الف): $Fr_1 = 3/2$ (ب): $Fr_1 = 7/0$

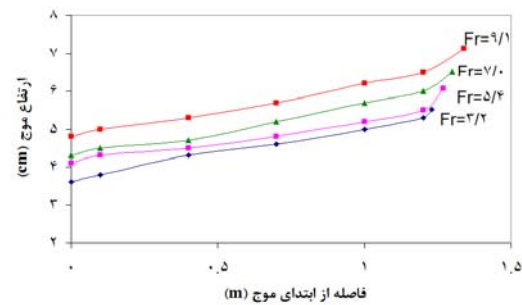


شکل ۹- پروفیل‌های سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل دو به ازای اعداد فرود مختلف

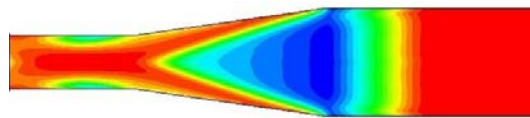
(الف): $Fr_1 = 3/2$ (ب): $Fr_1 = 7/0$



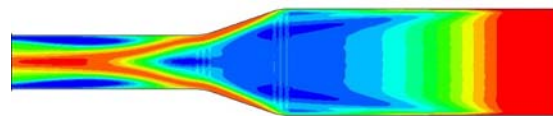
شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع امواج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل دو



شکل ۱۰- تغییرات ارتفاع امواج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل یک



شکل ۱۲- امواج ضربه‌ای شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی در مدل یک به ازای $Fr_1=7$



شکل ۱۳- امواج ضربه‌ای شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی در مدل دو به ازای $Fr_1=7$

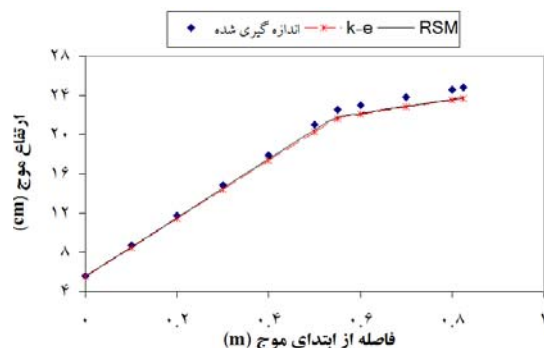
شدیدتر از مدل یک بوده و همین عامل، کاهش شدید سرعت را در ناحیه دوم آن به همراه داشته است. با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌شود که ارتفاع جبهه موج در مسیر حرکت آن در مدل یک با شیب ملایمی افزایش یافته است در صورتی که در مدل دو پس از تشکیل موج ضربه‌ای ارتفاع آن به صورت ناگهانی افزایش یافته و پس از جدا شدن جبهه موج از دیواره تبدیل تا محل تلاقی امواج، افزایش ارتفاع آن به طور ملایم صورت گرفته است. با توجه به اینکه در مدل یک کاهش عرض کانال به صورت تدریجی و در مسیر طولانی‌تری نسبت به مدل دو انجام گرفته است لذا امواج تشکیل شده در مدل یک از ارتفاع و سرعت و به عبارت دیگر انرژی کمتری نسبت به امواج مدل دو برخوردار می‌باشند.

نتایج مدل عددی

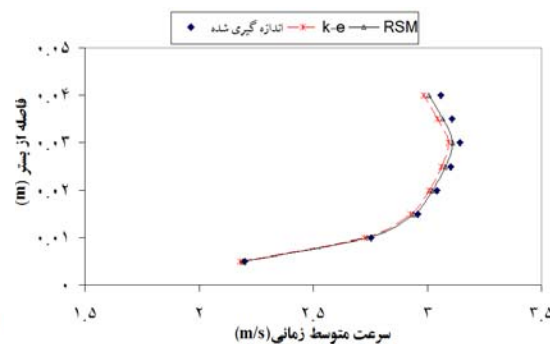
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) خروجی‌های گرافیکی نرم‌افزار *FLUENT* را پس از شبیه‌سازی جریان فوق بحرانی در مدل‌های یک و دو به ازای $Fr_1=7$ نشان می‌دهد. در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) پروفیل سطح موج حاصل از مدل‌های آشفتگی *k-ε RNG* و *RSM* در مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی یک و دو به ازای $Fr_1=7$ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با پیشروی جبهه موج به علت افزایش اختلاط آب و هوا در سطح موج، خطای محاسباتی مدل‌ها

پروفیل‌های به دست 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 می‌کند. در واقع اختلاط آب و هوا در سطح موج باعث کاهش سرعت آن می‌شود، به عبارت دیگر هوا به عنوان 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). 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^۱ و افزایش ارتفاع موج شده و کاهش سرعت موج را به دنبال داشته است. با مقایسه شکل‌های (۸) و (۹) ملاحظه می‌شود که میزان کاهش سرعت در ناحیه دوم مدل دو به مراتب از مدل یک 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 دو کاهش عرض جریان نسبت به مدل یک در فاصله کوتاهتری انجام گرفته است لذا تغییر رفتار سیال در این مدل شدیدتر بوده و ارتفاع و سرعت امواج تشکیل شده نیز بیشتر می‌باشد. به همین خاطر در امواج ضربه‌ای تشکیل شده مدل دو اختلاط آب و هوا بسیار

1- Dissipation of turbulence kinetic energy



شکل ۱۵- تغییرات ارتفاع موج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل دو به ازای $Fr_1=7$



شکل ۱۴- تغییرات ارتفاع موج در امتداد حرکت جبهه موج در مدل یک به ازای $Fr_1=7$

جدول ۲- درصد میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت توسط مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM به ازای $Fr_1=7$ در مدل یک

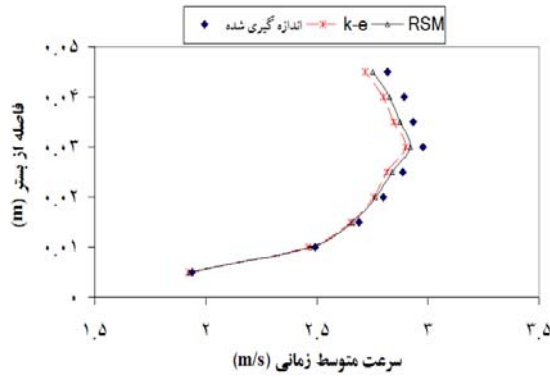
میانگین	$X=1/2$	$X=1$	$X=0.7$	$X=0.4$	$X=0.1$	
۲/۳۵	۳/۳۹	۲/۸۵	۲/۲۶	۱/۸۴	۱/۴۲	$k-\epsilon$ RNG
۱/۴۴	۲/۰۰	۱/۶۴	۱/۵۷	۱/۱۲	۰/۸۶	RSM

جدول ۳- میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت توسط مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM به ازای $Fr_1=7$ در مدل دو

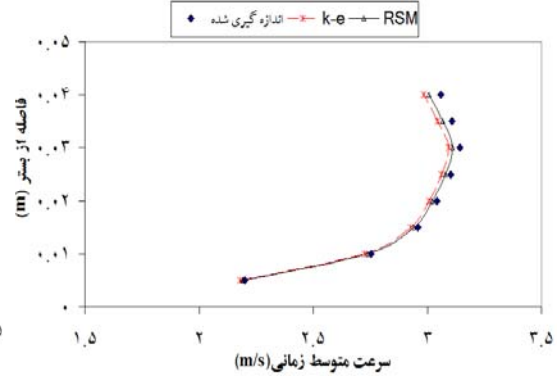
میانگین	$X=0.5$	$X=0.4$	$X=0.3$	$X=0.2$	$X=0.1$	
۵/۷۵	۷/۲۶	۶/۵۲	۵/۷۶	۵/۰۷	۴/۱۶	$k-\epsilon$ RNG
۳/۲۳	۴/۴۲	۳/۷۸	۳/۱۹	۲/۶۸	۲/۰۶	RSM

رینولدز در راستای قائم و نظر به اینکه مدل RSM نسبت به مدل RNG سه معادله اضافی برای تحلیل تنش‌های رینولدز حل می‌کند، این مدل عملکرد بهتری از خود نشان داده است. میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت توسط مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM در مدل‌های یک و دو به ازای $Fr_1=7$ در جداول (۲) و (۳) آورده شده است. در هر دو مدل با پیشروی جبهه موج و افزایش تلاطم، خطای نسبی مدل‌های آشفتگی نیز در محاسبه سرعت افزایش یافته است. همچنین مقادیر گزارش شده نشان می‌دهد که شبیه‌سازی عددی مدل دو با درصد خطای بیشتری همراه بوده است. همان‌گونه که اشاره شد امواج ضربه‌ای تشکیل شده در مدل دو از تلاطم و اختلاط آب و هوای شدیدتری نسبت به مدل یک برخوردار هستند و همین موضوع می‌تواند عامل اصلی افزایش خطای شبیه‌سازی باشد.

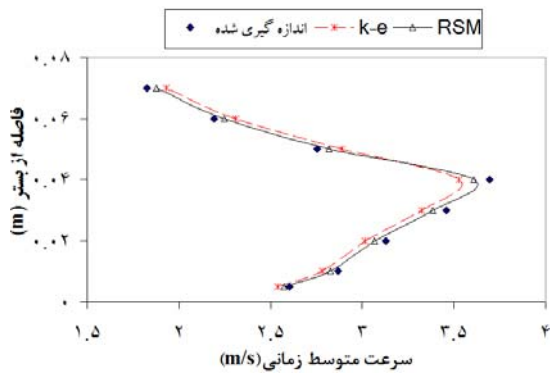
در برآورد ارتفاع موج اندکی افزایش یافته است. که در مدل دو به علت اختلاط شدیدتر آب و هوا خطای مذکور بیشتر است. لازم به ذکر است که میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM به ازای $Fr_1=7$ در مدل دو به ترتیب ۱/۸۲ درصد و ۱/۰۶ درصد و در مدل دو به ترتیب ۳/۴۶ درصد و ۲/۶۷ درصد بدست آمد. در شکل‌های (۱۶) تا (۲۱) پروفیل‌های سرعت به دست آمده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM در مقایسه با مدل‌های آزمایشگاهی یک و دو در مکان‌های مختلف امواج ضربه‌ای به ازای $Fr_1=7$ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از بستر، تطابق بین نتایج عددی با آزمایشگاهی کاهش یافته است. در واقع با فاصله گرفتن از بستر بر تلاطم موج و اختلاط آب و هوا افزوده شده و از دقت شبیه‌سازی مدل‌های آشفتگی کاسته شده است. از سوی دیگر همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر سرعت محاسباتی توسط مدل RSM با مقادیر اندازه‌گیری شده هم‌خوانی بیشتری دارد. با توجه به تغییرات سرعت و همچنین تنش‌های



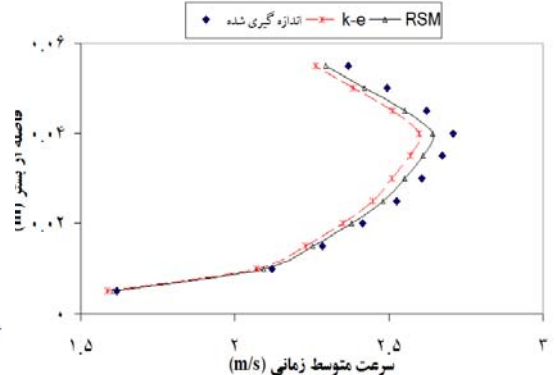
شکل ۱۷- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل یک به ازای $Fr_1=7$ و $X=0.7$



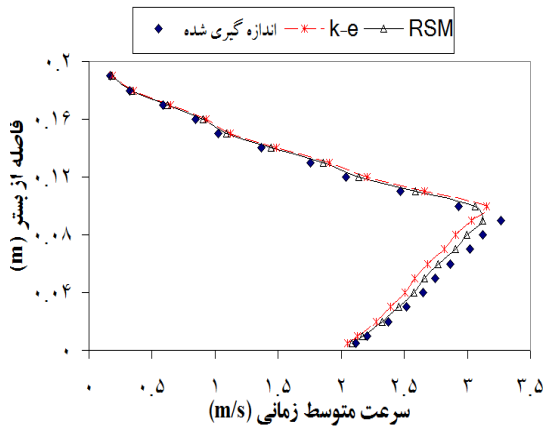
شکل ۱۶- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل یک به ازای $Fr_1=7$ و $X=0.1$



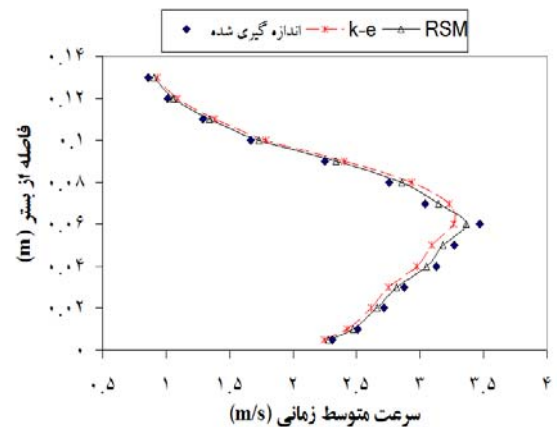
شکل ۱۹- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل دو به ازای $Fr_1=7$ و $X=0.1$



شکل ۱۸- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل یک به ازای $Fr_1=7$ و $X=1/2$



شکل ۲۱- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل دو به ازای $Fr_1=7$ و $X=0.5$



شکل ۲۰- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در جهت u در مدل دو به ازای $Fr_1=7$ و $X=0.3$

نتیجه‌گیری

با دیواره‌های تبدیل و تشدید اختلاط آب و هوا همراه بود، باعث اختلاف‌های مذکور شده و با افزایش عدد فرود بر میزان اختلاف‌ها افزوده شد. همچنین به‌منظور شبیه‌سازی عددی جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ و RSM استفاده گردید. نتایج نشان داد که با پیشروی جبهه موج و افزایش تلاطم، خطای محاسباتی مدل‌های آشفتگی در برآورد ارتفاع و سرعت موج افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از بستر، تطابق بین نتایج عددی با آزمایشگاهی در برآورد سرعت کاهش یافت. از سوی دیگر به‌علت اینکه امواج ضربه‌ای تشکیل شده در مدل دو از تلاطم و اختلاط آب و هوای شدیدتری نسبت به مدل یک برخوردار بود، شبیه‌سازی عددی آن نیز با درصد خطای بیشتری همراه بود. میانگین خطای نسبی پروفیل سطح موج توسط مدل‌های آشفتگی مذکور به ازای $Fr_1=7$ در مدل یک به ترتیب ۱/۸۲ درصد و ۱/۰۶ درصد و در مدل دو به ترتیب ۳/۴۶ درصد و ۲/۶۷ درصد بدست آمد. میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت موج به ازای شرایط فوق نیز در مدل یک به ترتیب ۲/۳۵ درصد و ۱/۴۴ درصد و در مدل دو به ترتیب ۵/۷۵ درصد و آشفتگی RSM در محاسبه مقادیر ارتفاع و سرعت امواج ضربه‌ای عملکرد بهتری به همراه دارد.

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی به تحلیل هیدرولیکی امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل‌های همگرای کانال روباز با دیواره مستقیم پرداخته شد. بدین منظور پس از برقراری جریان فوق بحرانی در دو تبدیل با نسبت همگرایی ثابت و با زوایای همگرایی ۷/۶ و ۲۱/۳ درجه (مدل‌های یک و دو)، مقادیر عمق و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای به ازای چهار عدد فرود مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در هر دو مدل توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربه‌ای یکنواخت نمی‌باشد به طوری که 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. همچنین در هر دو 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 یک و دو مشاهده گردید که ارتفاع و سرعت امواج تشکیل شده در مدل دو به مقدار قابل ملاحظه‌ای از مدل یک بزرگتر بود و علاوه بر آن میزان کاهش سرعت موج در ناحیه دوم مدل دو به مراتب از مدل یک بیشتر بود. کاهش ناگهانی عرض کانال در مدل دو که با برخورد سریع خطوط جریان

منابع

- 1- Chow, V.T. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Publisher, Michigan. 680 pp.
- 2- Hager, W. H. 1989. Supercritical flow in channel junction. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(5): 595-616.
- 3- Jaefarzadeh, M. R., Shamkhalchian, A. and M. Jomehzadeh. 2012. Supercritical flow profile improvement by means of a convex corner at a bend inlet. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 50(6): 623-630.
- 4- Jimenez, O. F. and M. H. Chaudhry. 1988. Computation of supercritical free-surface flows. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 114(4): 377-395.
- 5- Krüger, S. and P. Rutschmann. 2006. Modeling 3D supercritical flow with extended shallow-water approach. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(9): 916-926.
- 6- Montazeri-Namin, M., Ghazanfari-Hashemi, R. and M. Ghaeini-Hessaroeeyeh. 2012. 3D numerical simulation of supercritical flow in bends of channel. International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering, Jan. 7-8, Dubai, pp. 167-171.
- 7- Mazumder, S. K. and W. H. Hager. 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 G. Christodoulou. 2008. 3-D numerical modeling of supercritical flow in gradual expansions. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 46(3): 402-409.