

## تحلیل امواج ضربه‌ای در تبدیل همگرا با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

محمد رضا نیک‌پور<sup>1\*</sup>، داود فرسادی‌زاده<sup>2</sup>، علی حسین‌زاده دلیر<sup>3</sup>، جواد بهمنش<sup>4</sup> و فرزین سلماسی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 91/11/07 تاریخ پذیرش: 92/04/12

<sup>1</sup> دانشجوی دکترای سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>2,3</sup> به ترتیب دانشیار و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>4</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [rezanikpoor@yahoo.com](mailto:rezanikpoor@yahoo.com)

### چکیده

در مطالعه جریان‌های فوق بحرانی تشکیل امواج ضربه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. این امواج عمدتاً در جریان فوق بحرانی در کانال‌های غیر منشوری دیده می‌شوند. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل آزمایشگاهی مقادیر عمق و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل همگرای کانال روباز با دیواره مستقیم به-ازای چهار عدد فرود مختلف اندازه‌گیری و تحلیل شده است. همچنین به منظور شبیه‌سازی عددی جریان فوق بحرانی در تبدیل همگرا از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و RSM در محیط نرم‌افزار FLUENT استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌های مذکور و مقادیر اندازه‌گیری شده به‌ازای عدد فرود 7 با هم مقایسه شده و دقت مدل‌ها در تعیین عمق و سرعت موج بررسی گردید. میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدل‌های مذکور به ترتیب 1/82% و 1/06% و نیز میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت موج به ترتیب 2/35% و 1/44% بدست آمد. نتایج حاکی از آن بود که مدل آشفتگی RSM در شبیه‌سازی امواج ضربه‌ای عملکرد بهتری داشته است.

واژه‌های کلیدی: امواج ضربه‌ای، تبدیل همگرا، جریان فوق بحرانی، مدل آشفتگی

## Analysis of Shock Waves in Converging Transition using Experimental and Numerical Models

MR Nikpour<sup>1\*</sup>, D Farsadizadeh<sup>2</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>3</sup>, J Behmanesh<sup>4</sup> and F Salmasi<sup>2</sup>

Received: 26 January 2013 Accepted: 3 July 2013

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

<sup>2,3</sup>- Respectively, Assoc. Prof. and Prof. Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

<sup>4</sup>- Assoc. Prof. Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Urmia, Iran

\*Corresponding Author Email: [rezanikpoor@yahoo.com](mailto:rezanikpoor@yahoo.com)

### Abstract

Formation of shock waves has high importance in study of supercritical flows. These waves are often found during supercritical flow in the non-prismatic channels. In the present study, values of depth and instantaneous velocity were measured in various points of shock waves observed in the straight-wall contraction for four Froude Numbers. Numerical simulation of supercritical flow in the contraction was performed using *RNG k-ε* and *RSM* turbulence models of *FLUENT* software. In order to investigate the accuracy of the models in calculation of wave profile and wave velocity a comparison was also done between the results of numerical models and measured values for  $Fr_1=7.0$ . The average relative errors of the wave depth calculation using *RNG k-ε* and *RSM* turbulence models were 1.82% and 1.06%, respectively. Also, for the wave velocity, the values were 2.25% and 1.44%, respectively. The results showed that the *RSM* model performed slightly better than *RNG k-ε* model in simulating shock waves.

**Keywords:** Contraction, Shock wave, Supercritical flow, Turbulence model

### مقدمه

طراحی و استفاده می‌شوند (جیمنز و چادری 1988). از این‌رو جریان فوق بحرانی در مجاری روباز و تحت فشار از دیرباز مورد توجه محققین قرار گرفته است. اولین بار جریان فوق بحرانی در کانال‌ها توسط ایپن و ناپ<sup>1</sup> در سال 1936 مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. بعد از آن فون‌کارمن<sup>2</sup> در سال 1938 با به کارگیری معادلات کلاسیک آب‌های کم‌عمق<sup>3</sup> معادلات

جریان‌های فوق بحرانی در بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی ساخت بشر از جمله شوت سرریزها و کانال‌های انتقال آب مشاهده می‌شوند. به علاوه جریان‌های فوق بحرانی در بسیاری از کانال‌های طبیعی مانند رودخانه‌های کوهستانی نیز رخ می‌دهند. جریان فوق بحرانی در کانال‌ها سرعت انتقال و تخلیه سیلاب‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین بسیاری از کانال‌های با سرعت بالا به منظور اهداف زهکشی و کنترل آب‌های سطحی

<sup>1</sup> Ippen & Knapp

<sup>2</sup> Von karman

<sup>3</sup> Classic shallow water equations

استخراج و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردید که از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار بودند. جعفرزاده و علامتیان (1388) با حل معادلات دو بعدی متوسط گرفته شده آب‌های کم‌عمق در تبدیل‌ها با استفاده از روش‌های عددی مک‌کورمک (با شبکه ثابت و تطبیقی) و لاکس- وندروف<sup>5</sup> (با شبکه ثابت) و همچنین با استفاده از مدل آزمایشگاهی جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا را شبیه‌سازی کردند. در طی آزمایشات پروفیل سطح آب در امتداد دیواره و محور مرکزی تبدیل برداشت گردید. در نهایت روش مک‌کورمک با شبکه تطبیقی هم‌خوانی بیشتری در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. روش مذکور به خوبی قادر است پیشانی تیز امواج را شبیه‌سازی کند و همچنین زمان محاسباتی را نسبت به شبکه ثابت به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در مطالعه جریان‌های فوق بحرانی تشکیل امواج ضربه‌ای<sup>6</sup> از اهمیت بالایی برخوردار است. تشکیل این امواج نشان دهنده تأثیرات جاذبه گرانشی سطح آزاد روی جریان می‌باشد و عمدتاً در هنگام عبور جریان فوق بحرانی در کانال‌های غیر منشوری یافت می‌شوند. در اثر بروز امواج ضربه‌ای یک الگوی آشفتگی تشکیل می‌شود که در مسافت‌های قابل توجهی در پایین‌دست تأثیر می‌گذارد (چاو و 1959). از سوی دیگر 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. هدف از تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی مقادیر عمق و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای جریان فوق بحرانی در تبدیل همگرا با دیواره مستقیم به‌ازای اعداد فرود مختلف و شبیه‌سازی عددی آن با استفاده از نرم‌افزار *FLUENT* می‌باشد.

حاکم بر جریان‌های فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا را در حالت دو بعدی بدست آورد (هگر 1989). بالامادی و چادری (1992) به منظور تحلیل جریان در تبدیل‌های همگرا و واگرا معادلات دو بعدی متوسط گرفته شده جریان غیرماندگار در آب‌های کم‌عمق را با استفاده از روش عددی مک‌کورمک<sup>1</sup> با شمای صریح<sup>2</sup> مرتبه دوم گسسته و حل نمودند. آنها در تحقیق خود از داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی سایر محققین استفاده کردند. مقایسه نتایج نشان داد هر کجا توزیع فشار به‌صورت هیدرواستاتیک است بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مطابقت وجود دارد. در بقیه مناطق و به‌خصوص در مناطقی که جداسازی جریان وجود دارد مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق پروفیل سطح آب نمی‌باشد. رحمان و چادری (1997) در ادامه کار تحقیقاتی بالامادی و چادری (1992) معادلات جریان دو بعدی آب‌های کم-عمق در تبدیل‌های تنگ شونده و عریض شونده را با به کارگیری شبکه تطبیقی<sup>3</sup> در روش مک‌کورمک با شمای صریح مرتبه دوم گسسته و حل نمودند که در نهایت شبکه تطبیقی نسبت به شبکه ثابت نتایج بهتری به همراه داشت. کروگر و راتشمان (2006) با حل معادلات کلاسیک (*CSW*) و توسعه یافته آب‌های کم‌عمق<sup>4</sup> (*ESW*) توسط نرم‌افزار *FEMTOOL* جریان فوق بحرانی در تبدیل‌های همگرا و واگرا و در تلاقی کانال‌ها را در حالت سه بعدی شبیه‌سازی کردند. در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در سازه‌های مذکور، معادلات *ESW* نسبت به *CSW* نتایج بهتری از خود نشان داد. استامو و همکاران (2008) با به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی مزامدر و هگر (1993) جریان فوق بحرانی را در تبدیل واگرای کانال مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار *FLOW-3D* به-صورت سه بعدی شبیه‌سازی کردند. پس از اجرای مدل عددی به‌ازای چهار عدد فرود مختلف، پروفیل سطح آب

<sup>1</sup> MacCormack (MAC)

<sup>2</sup> Explicit

<sup>3</sup> Adaptive grid

<sup>4</sup> Extended shallow water equations

<sup>5</sup> Lax-Wendroff

<sup>6</sup> Shock wave

## مواد و روش‌ها

## مدل آزمایشگاهی

کلیه مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول 6 متر، عرض 1 متر و ارتفاع دیواره‌های 0/7 متر انجام گرفت. در بالادست فلوم یک مخزن هد<sup>1</sup> به طول 1/75 متر، عرض 1/65 متر و ارتفاع 1/20 متر نصب شده بود. آب از مخزن زیرزمینی به داخل مخزن هد پمپاژ شده و پس از عبور از تبدیل مخزن وارد کانال 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 کانال یک دریچه کشویی فولادی لبه‌تیز به ضخامت 3 میلی‌متر و ارتفاع 1/2 متر به منظور تنظیم هد ورودی و کنترل عدد فرود نصب شده بود. در قسمت خروجی فلوم، یک مخزن تخلیه<sup>2</sup> برای هدایت آب به کانال زهکش و سپس مخزن زیرزمینی آزمایشگاه طراحی شده بود. در طی آزمایشات از 4 ورق پلگسی‌گلاس به ضخامت 6 میلی‌متر، طول 1 متر و ارتفاع 30 سانتی‌متر به منظور ایجاد کانال‌های بالادست و پایین دست تبدیل‌ها استفاده شد. برای دیواره‌های تبدیل نیز از دو ورق پلگسی‌گلاس به ضخامت 6 میلی‌متر، طول 1/5 متر و ارتفاع 30 سانتی‌متر استفاده گردید. به منظور نصب دیواره‌های تبدیل و همچنین کانال‌های بالادست و پایین دست، یک کف کاذب از جنس پلی‌اتیلن فشرده به ضخامت 1 سانتی‌متر، طول 3/5 متر و عرض 1 متر در ابتدای فلوم کار گذاشته شد. به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در تبدیل همگرا، در کلیه آزمایشات میزان بازشدگی دریچه کشویی 2 سانتی‌متر و عرض کانال‌های بالادست و پایین دست به ترتیب برابر 80 و 40 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری دبی جریان در 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 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 مدل *ACM2-RS* با دقت 0/5± سانتی‌متر بر ثانیه استفاده شد. بر روی بدنه سرعت سنج نقطه مشخصه‌ای وجود داشت که برای اندازه‌گیری سرعت هر مقطع باید میله حسگر به‌گونه‌ای وارد جریان می‌شد که نقطه مذکور در خلاف جهت جریان واقع شود. شکل 1 نمایی از تبدیل همگرای مورد استفاده در این تحقیق را به همراه ابزار اندازه‌گیری عمق و سرعت نشان می‌دهد.



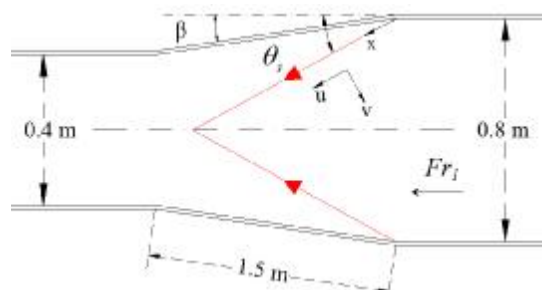
شکل 1- تبدیل همگرا با دیواره‌های مستقیم (الف): نما از بالادست (ب): نما از پائین دست.

آزمایشات به‌ازای چهار عدد فرود جریان در بالادست تبدیل 3/2، 5/4، 7/0 و 9/1 انجام گرفت. لازم به ذکر است که تغییر عدد فرود در طی آزمایشات از طریق تغییر ارتفاع آب در مخزن هد حاصل شد که در جدول 1 مقادیر آن آورده شده است. در این جدول،  $Q$  نشان دهنده دبی ورودی به مخزن،  $H$  ارتفاع آب مخزن،  $y$  عمق آب خروجی بلافاصله از زیر دریچه کشویی و

<sup>1</sup> Head tank

<sup>2</sup> Tail tank

نشان‌دهنده زاویه همگرایی تبدیل و  $\theta_s$  زاویه تشکیل امواج نسبت به محور افق می‌باشد.



شکل 3- نحوه تشکیل و برخورد اولین امواج ضربه‌ای.

مقادیر سرعت لحظه‌ای در طول حرکت جبهه موج (در مسیر بردار  $x$ ، مطابق شکل 3) از فاصله 10 سانتی‌متری ابتدای تشکیل موج تا قبل از محل تلاقی امواج در فواصل طولی 30 سانتی‌متر توسط سرعت سنج اندازه‌گیری و ثبت گردید. همچنین در هر راستای قائم، از فاصله 5 میلی‌متری سطح موج تا 5 میلی‌متری بستر در فواصل عمودی 5 میلی‌متری اندازه‌گیری سرعت انجام شد. لازم به ذکر است که مدت زمان برداشت داده‌های سرعت در هر نقطه، 5 ثانیه در نظر گرفته شده بود که در طی زمان مذکور 100 مؤلفه لحظه‌ای سرعت در جهت‌های طولی و عرضی موج ( $u$  و  $v$  در شکل 3) 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 شدت بالای آشفتگی جریان و اختلاط آب و هوا، احتمال بروز خطا در هنگام قرائت پروفیل سطح آب وجود داشت. به منظور به حداقل رساندن خطای مذکور در هر نقطه چندین بار مقدار عمق اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان ارتفاع موج نقطه مورد نظر ثبت می‌گردید. همچنین به منظور تحلیل آشفتگی امواج ضربه‌ای مقدار انرژی جنبشی اغتشاش<sup>1</sup> در مناطق

$Fr_1$  عدد فرود متناظر با آن در کانال بالادست می‌باشد. لازم به ذکر است مقادیر  $Fr_1$  در جدول 1 توسط رابطه 1 محاسبه گردید. در رابطه مذکور،  $b$  عرض کانال بالادست و برابر 0/8 متر می‌باشد.

$$Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{Q}{A\sqrt{gy}} = \frac{Q}{by\sqrt{gy}} \quad [1]$$

جدول 1- مشخصات آزمایشات.

$Q$ (lit/s)	$H$ (m)	$y$ (m)	$Fr_1$
19/1	0/79	0/018	3/2
32/4	0/90	0/018	5/4
38/6	0/98	0/017	7/0
46/3	1/08	0/016	9/1

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



شکل 2- تشکیل امواج ضربه‌ای در تبدیل همگرا با دیواره مستقیم به‌ازای  $Fr_1=7$

در شکل 3 نیز نحوه تشکیل و برخورد اولین امواج ضربه‌ای نمایش داده شده است. در این شکل،  $\beta$

<sup>1</sup> Turbulence kinetic energy

غیرمتعادل<sup>6</sup> به‌کار گرفته شد. قبل از ورود به محیط *FLUENT* هندسه مدل توسط نرم‌افزار *GAMBIT* شبکه‌بندی شد. به‌منظور مستقل از شبکه شدن هندسه مدل طی چهار مرحله به‌ازای شرایط مرزی یکسان، شبکه مدل ریزتر و تعداد المان‌ها افزایش یافت که در نهایت با بررسی رفتار خطای شبیه‌سازی مدل، 473200 المان مربعی برای شبکه‌بندی در نظر گرفته شد. آرایش شبکه به گونه‌ای طراحی شد که بسته به میزان حساسیت نواحی حل از المان‌های با اندازه‌های متفاوت استفاده گردید. لازم به ذکر است برای شبکه‌بندی مدل در نزدیکی دیواره (به منظور به‌کارگیری تابع دیواره) از پنج ردیف مش لایه مرزی با ضریب رشد 1/2 استفاده شد. همچنین فاصله اولین ردیف مش لایه مرزی تا کف 0/001 متر در نظر گرفته شد. پارامترهای مذکور با کنترل  $y^+$  بین 30 تا 300 تعیین 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 مدل 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 محاسباتی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از رابطه 5 به‌صورت مجزا محاسبه گردید.

$$[5] \quad \left| \frac{\text{مقادیر محاسباتی} - \text{مقادیر اندازه‌گیری شده}}{\text{مقادیر اندازه‌گیری شده}} \right| = \text{خطای نسبی (\%)}$$

## نتایج و بحث

### نتایج مدل آزمایشگاهی

در شکل‌های 4 تا 7 پروفیل‌های سرعت در امتداد حرکت امواج ضربه‌ای و در راستاهای قائم به‌ازای اعداد

برداشت سرعت با استفاده از رابطه 2 محاسبه گردید (ورستیک و مالالاسکرا 1995):

$$k = 1.5 (\overline{UI})^2 \quad [2]$$

$$I = 0.16 (\text{Re}_{D_H})^{-1/8} \quad [3]$$

$$\text{Re}_{D_H} = \frac{r\overline{UD}_H}{m} \quad [4]$$

در روابط 2 تا 4 نشان‌دهنده انرژی جنبشی اغتشاش،  $\overline{U}$  سرعت متوسط در هر راستای قائم موج (میانگین مقادیر  $\overline{u}$ )،  $I$  شدت اغتشاش و  $D_H$  قطر هیدرولیکی (چهار برابر شعاع هیدرولیکی) می‌باشد. مدل عددی

در تحقیق حاضر به‌منظور شبیه‌سازی سه بعدی جریان از نرم‌افزار *FLUENT* استفاده گردید. در محیط این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی حرکت سیال معادلات ناویر-استوکس<sup>1</sup> 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  $k-\varepsilon$  و  $RNG$  استفاده شد. مدل  $k-\varepsilon$  که شامل سه نوع *Standard*، *Realizable* و *RNG* می‌باشد، دارای دو معادله مستقل براساس  $k$  و  $\varepsilon$  می‌باشد. در این مدل  $k$  معرف انرژی جنبشی اغتشاش و  $\varepsilon$  معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش<sup>4</sup> می‌باشد. در مدل *RSM* سه بعدی نسبت به مدل  $k-\varepsilon$ ، پنج معادله اضافی جهت تحلیل تنش‌های رینولدز حل می‌گردد (بی‌نام 2006). برای شبیه‌سازی جریان چند فازی با توجه به اختلاط آب و هوا در سطح موج از مدل اختلاط<sup>5</sup> استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی جریان در نزدیکی دیواره، تابع دیواره

<sup>1</sup> Navier-Stokes equations

<sup>2</sup> Renormalization-group k-ε model (RNG)

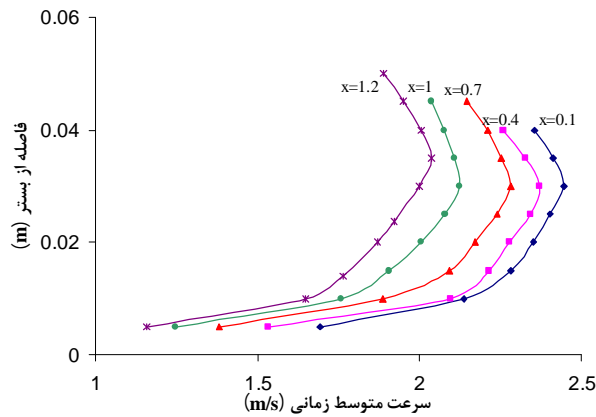
<sup>3</sup> Reynolds stress model

<sup>4</sup> Dissipation rate of turbulence kinetic energy

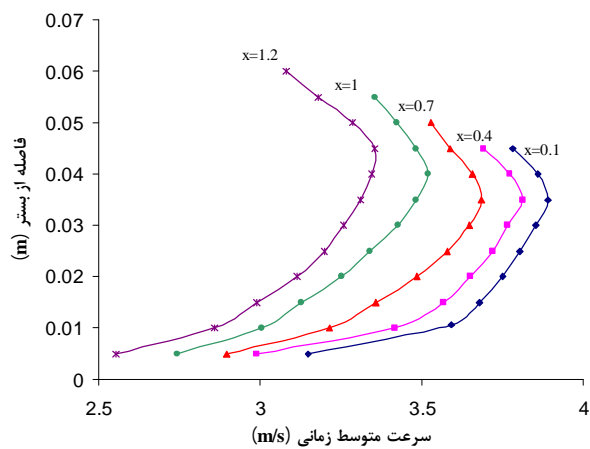
<sup>5</sup> Mixture

<sup>6</sup> Non-equilibrium wall function

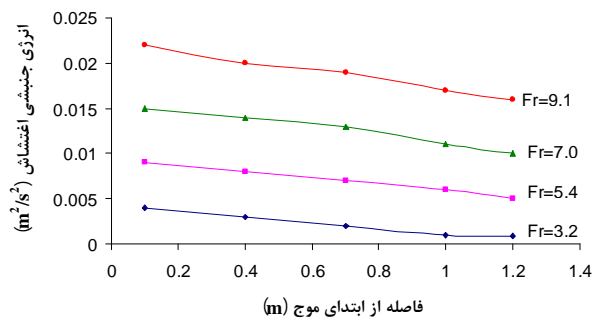
در شکل‌های 8 و 9 نیز تغییرات عمق موج و انرژی جنبشی اغتشاش در طول حرکت جبهه موج به‌ازای اعداد فرود مختلف نمایش داده شده است.



شکل 5- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای به‌ازای  $Fr_1 = 5/4$ .



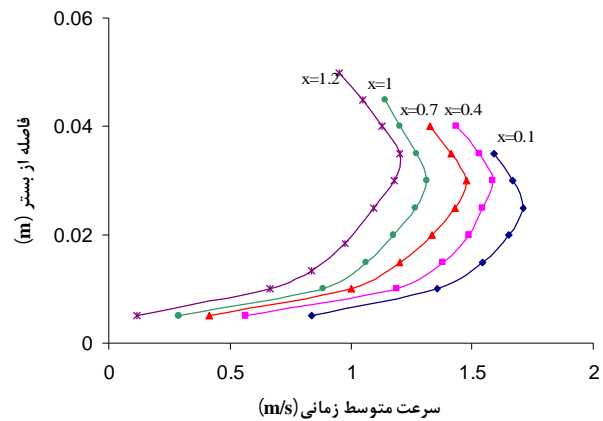
شکل 6- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای به‌ازای  $Fr_1 = 7/0$ .



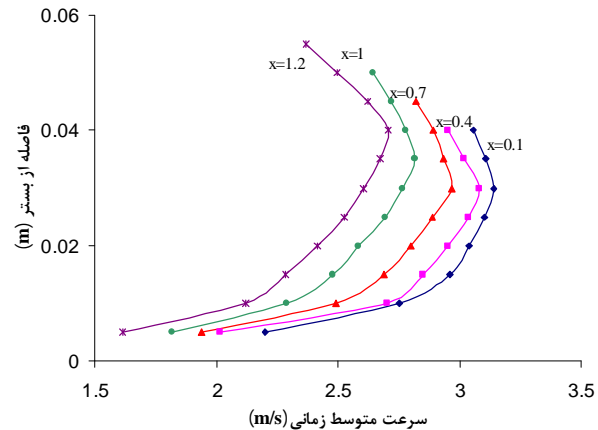
شکل 8- تغییرات انرژی جنبشی اغتشاش در طول حرکت جبهه موج.

باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار سرعت با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به

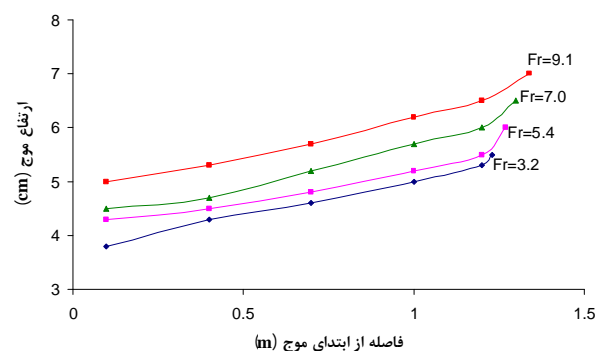
فرود آزمایشات نشان داده شده است. در شکل‌های مذکور منظور از X فاصله طولی بر حسب متر نسبت به مبدأ تشکیل موج و در امتداد حرکت جبهه موج می‌باشد.



شکل 9- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای به‌ازای  $Fr_1 = 3/2$ .



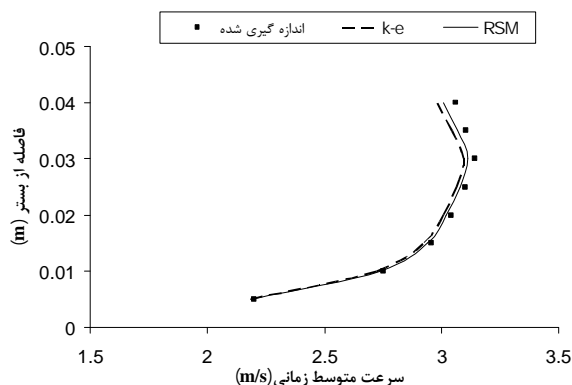
شکل 10- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای به‌ازای  $Fr_1 = 9/1$ .



شکل 11- تغییرات عمق امواج در امتداد حرکت جبهه موج.

پروفیل‌های بدست آمده نشان می‌دهند که توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربه‌ای یکنواخت نمی-

تطابق بین نتایج عددی با آزمایشگاهی کاهش یافته است. در واقع با فاصله گرفتن از بستر بر شدت تلاطم موج 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 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-εRNG* و *RSM* به‌ازای  $Fr_1 = 7$  در جدول 2 آورده شده است. با پیشروی جبهه موج خطای نسبی مدل‌های آشفتگی نیز در محاسبه سرعت افزایش یافته است. شکل 16 تغییرات انرژی جنبشی اغتشاش را در امتداد حرکت جبهه موج به‌ازای  $Fr_1 = 7$  نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد برخورد جریان اصلی کانال با موج ضربه‌ای استهلاك انرژی جنبشی اغتشاش را به دنبال داشته است. میانگین خطای نسبی محاسبه انرژی جنبشی اغتشاش موج توسط مدل‌های آشفتگی *k-εRNG* و *RSM* به‌ازای عدد فرود مذکور به‌ترتیب  $3/86\%$  و  $2/43\%$  بدست آمد.

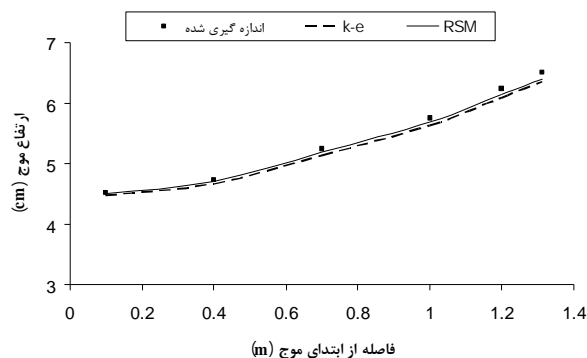


شکل 11- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در  $x=0/1$ .

مقدار حداکثر، شروع به کاهش می‌کند. در واقع اختلاط آب و هوا در نزدیکی سطح موج باعث کاهش سرعت می‌شود. از سوی دیگر مقدار سرعت و انرژی جنبشی اغتشاش در طول حرکت جبهه موج کاهش یافته است. برخورد اولین موج مورب تحت زاویه  $\theta_s$  با جریان اصلی کانال باعث افزایش عمق موج و استهلاك انرژی جنبشی اغتشاش شده و کاهش سرعت موج را به دنبال داشته است.

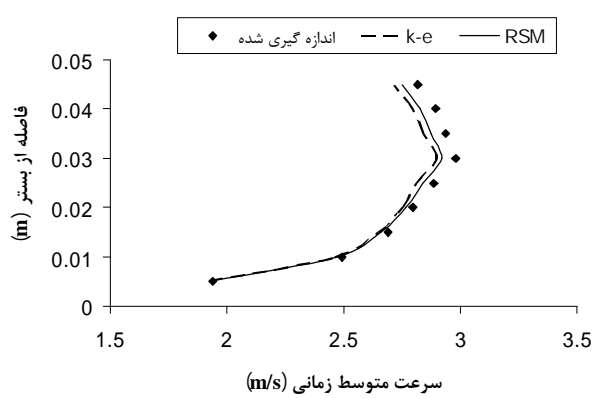
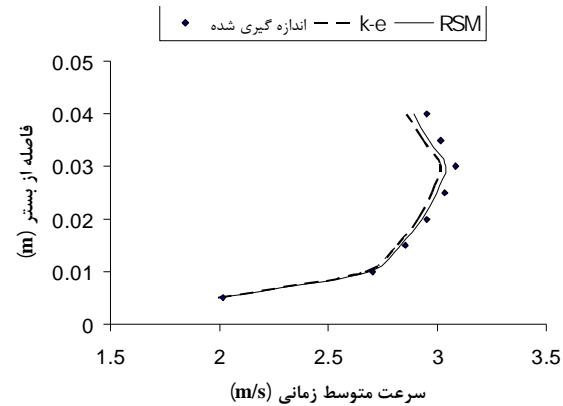
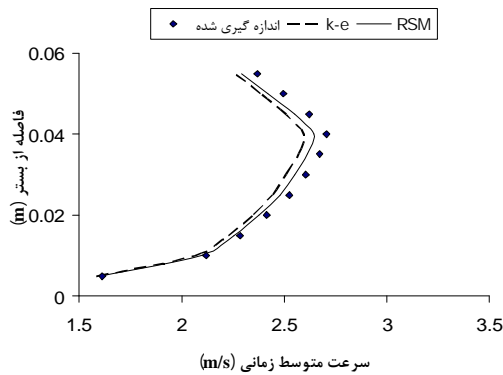
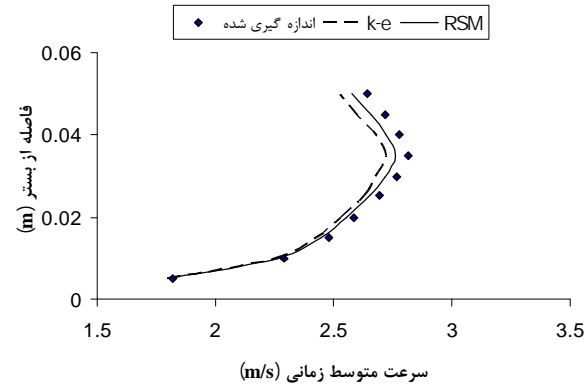
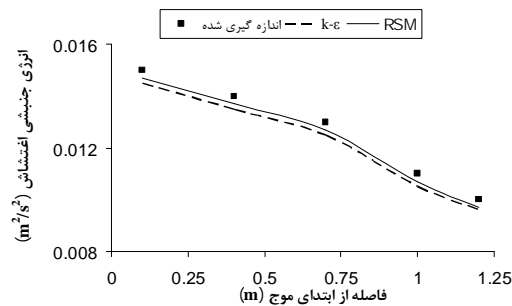
### نتایج مدل عددی

در شکل 10 پروفیل سطح موج حاصل از مدل‌های آشفتگی *k-εRNG* و *RSM* در مقایسه با مدل آزمایشگاهی به‌ازای  $Fr_1 = 7$  نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با پیشروی جبهه موج به علت افزایش اختلاط آب و هوا در سطح موج و نزدیک شدن به انتهای محدوده محاسباتی، خطای محاسباتی مدل‌ها در برآورد ارتفاع موج اندکی افزایش یافته است. لازم به ذکر است که میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدل‌های آشفتگی *k-εRNG* و *RSM* به‌ازای  $Fr_1 = 7$  به‌ترتیب  $1/82\%$  و  $1/06\%$  بدست آمد. در شکل‌های 11 تا 15 نیز پروفیل‌های سرعت بدست آمده از مدل‌های آشفتگی *k-εRNG* و *RSM* در مقایسه با مدل آزمایشگاهی در مکان‌های مختلف موج ضربه‌ای به‌ازای  $Fr_1 = 7$  نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از بستر،



شکل 10- تغییرات عمق موج در امتداد حرکت جبهه موج.



شکل 13- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در  $x=0/7$ .شکل 12- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در  $x=0/4$ .شکل 15- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در  $x=1/2$ .شکل 14- پروفیل سرعت موج ضربه‌ای در  $x=1$ .

شکل 16- تغییرات انرژی جنبشی اغتشاش در طول حرکت موج.

جدول 2- میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت توسط مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon RNG$  و  $RSM$  به‌ازای  $Fr_1=7$ 

	$x=0/1$	$x=0/4$	$x=0/7$	$x=1$	$x=1/2$	میانگین
$k-\epsilon RNG$	%1/42	%1/84	%2/26	%2/85	%3/39	%2/35
$RSM$	%0/86	%1/12	%1/57	%1/64	%2/00	%1/44

دیواره مستقیم پرداخته شد. بدین منظور مقادیر عمق و سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف امواج ضربه‌ای به‌ازای چهار عدد فرود مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربه‌ای

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی به تحلیل هیدرولیکی امواج ضربه‌ای تشکیل شده در تبدیل همگرای کانال روباز با

تعیین عمق و سرعت موج بررسی گردید. میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدل-های مذکور به ترتیب 1/82% و 1/06% و نیز میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت موج به ترتیب 2/35% و 1/44% بدست آمد. نتایج نشان داد که با پیشروی جبهه موج خطای محاسباتی مدل‌ها در برآورد ارتفاع و سرعت موج افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از بستر، تطابق بین نتایج عددی با آزمایشگاهی در برآورد سرعت کاهش یافته است. از سوی دیگر مدل *RSM* در محاسبه مقادیر عمق و سرعت موج ضربه‌ای نتایج بهتری از خود نشان داد.

غیریکنواخت بوده به طوری که با فاصله گرفتن از بستر، سرعت افزایش یافته و در نزدیکی سطح موج به علت اختلاط با هوا مقدار آن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر برخورد اولین موج ضربه‌ای مورب با جریان داخل تبدیل باعث افزایش عمق موج و استهلاك انرژی جنبشی اغتشاش شده و کاهش سرعت جبهه موج را در امتداد حرکت آن به دنبال داشته است. همچنین به منظور شبیه‌سازی عددی جریان فوق بحرانی در تبدیل همگرا از مدل‌های آشفتگی *k-ε RNG* و *RSM* استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌های مذکور و مقادیر اندازه‌گیری شده به ازای  $Fr_1 = 7$  با هم مقایسه شده و دقت مدل‌ها در

#### منابع مورد استفاده

جعفرزاده م و علامتیان الف، 1388. تحلیل عددی جریان در تبدیل‌ها با استفاده از شبکه تطبیقی. مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال پنجم، شماره سوم. صفحه‌های 48 تا 55.

- Anonymous, 2006. *Fluent 6.2 User's Guide*. Fluent Inc group, New York.
- Bhallamudi SM and Chaudhry MH, 1992. Computation of flows in open-channel transitions. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 30(1): 77-93.
- Chow VT, 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Publisher, Michigan.
- Hager WH, 1989. Supercritical flow in channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 115(5): 595-616.
- Jimenez OF and Chaudhry MH, 1988. Computation of supercritical free-surface flows. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 114(4): 377-395.
- Krüger S and Rutschmann P, 2006. Modeling 3D supercritical flow with extended shallow-water approach. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(9): 916-926.
- Mazumder SK and Hager WH, 1993. Supercritical expansion flow in Rouse modified and reversed transitions. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 119(2): 201-219.
- Rahman M and Chaudhry MH, 1997. Computation of flow in open-channel transitions. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 35(2): 243-256.
- Stamou A, Chapsas D and Christodoulou G, 2008. 3-D numerical modeling of supercritical flow in gradual expansions. *Journal of Hydraulic Research IAHR* 46(3): 402-409.
- Versteeg HK and Malalasekera W, 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. First edition, John Wiley Publisher, New York.