مطالعه آزمایشگاهی و عددی امواج ضربهای در تبدیلهای همگرا

محمد رضا نيک پور (*، داود فرساديزاده '، على حسينزاده دلير "، جواد بهمنش " و فريناز شجاع "

۴- نویسنده مسئول، دانشجوی دکترای 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 دریافت: ۹۲/۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۳

چکیدہ

امواج ضربهای عمدتاً در هنگام عبور جریان فوق بحرانی در کانالهای غیر منشوری بهوجود می آیند. 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)، اندازه گیری شد. همچنین به منظور شبیه سازی سه بعدی از مدلهای آشفتگی RNG و ۲۱/۳ استفاده گردید. میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدلهای آشفتگی مذکور به -آزای عدد فرود ۷ در مدل یک به تر تیب ۲۸/۲ درصد و ۲۰/۶ درصد و در مدل دو به ترتیب ۲۶۴ درصد و ۲۶/۷ درصد بدست آمد. ازای عدد فرود ۷ در مدل یک به ترتیب ۲۸/۲ درصد و ۶۰/۱ درصد و در مدل دو به ترتیب ۲۶۶ درصد و ۲۶/۷ درصد دو در مدل همچنین میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت موج به ازای شرایط فوق در مدل یک به ترتیب ۲۵/۳۵ درصد و ۱/۴ درصد و در مدل دو به ترتیب ۵۷/۵ درصد و ۳۲/۳ درصد حاصل شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل آشفتگی RSM در شبیه سازی امواج ضربه ای عملکرد بهتری به همراه دارد.

كليدواژهها: امواج ضربه اى، تبديل همگرا، جريان فوق بحرانى، مدل أشفتكى.

Experimental and Numerical Study of Shock Waves in Contractions

M.R. Nikpoor^{1*}, D. Farsadizadeh², 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:7April2013 Accepted:4Sep2013

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 Fr₁=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

جریانهای فوق بحرانی در بسیاری از سازههای هیدرولیکی ساخت بشر از جمله شوت سرریزها، کانالهای انتقال آب و مجاری فاضلاب مشاهده می شوند. به علاوه، جریان های فوق بحرانی در بسیاری از کانالهای طبیعی مانند رودخانههای کوهستانی نیز رخ میدهند (جیمنز و چادری'، ۱۹۸۸). در جریان های فوق بحرانی امواج ضربهای ۲ در سطح جریان به وفور دیده می شوند و همین مسأله وجه اصلى تمايز جريان هاى فوق بحرانى و زيربحرانى است (هگر، 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 تـ أثیر مـی گـذارد (چـاو ، ۱۹۵۹). پیش بینی محل های احتمالی وقوع امواج ضربه ای و تخمين ارتفاع أنها بهمنظور محاسبه ارتفاع مورد نياز ديواره كانال با استفاده از مدلهای آزمایشگاهی و عددی، همواره مورد توجه محققین قرار گرفته است. کروگر و راتشمان⁶ (۲۰۰۶) با حل معادلات كلاسيك و توسعه يافته أبهاى كمعمق 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 (۲۰۰۸) با به کارگیری دادههای آزمایشـگاهی مزامـدر و هگـر[•] (۱۹۹۳) جریـان فـوق بحرانـی را در تبدیل واگرای کانال مستطیلی با استفاده از نرمافزار FLOW-3D به صورت سه بعدی شبیه سازی 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 محيط نرم افزار FLUENT، از مدل حجم سيال و مدل أشفتكي استاندارد استفاده کردند. یروفیل سطح امواج تشکیل شده در k- ε قوس خارجی و داخلی خم در مقایسه با داده های آزمایشگاهی با دقت مناسبی شبیه سازی شده بود. جعف زاده و همک اران (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. در مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته توسط محققین به اندازه گیری و ممگرا 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 تشکیل شده در تبدیل های نقاط مختلف امواج ضربهای بهازای چهار عدد فرود مختلف در دو تبدیل همگرا با دیواره مستقیم و با زوایای همگرایی ۶/۶ و ۲۱/۳ درجه اندازه گیری و تحلیل شده است. علاوه بر آن، شبیه سازی عددی جریان فوق بحرانی در تبدیل های همگرا با استفاده از نرم-افزار FLUENT انجام گرفت.

مواد و روشها

مدل آزمایشگاهی

کلیـه مطالعـات آزمایشـگاهی تحقیـق حاضـر در آزمایشـگاه 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، عـرض ۱/۶۵ متـر و ارتفـاع ۱/۲۰ متـر نصب شده بود. آب از مخزن زیرزمینی به داخل مخزن هـد پمپاژ شده و پس از عبور از تبدیل مخزن وارد فلوم می گردید. لازم به ذکر است که دبی ورودی به مخزن هد توسط شیر فلکهای که بـر 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 تخلیـه^{. (} برای هدایت آب به کانال زهکش و سپس مخزن زیرزمینی آزمایشگاه طراحی شده بود. در طی آزمایش ها 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 میلی متر، طول ۱/۵ متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده گردید. به منظور نصب دیوارههای تبدیل و همچنین کانالهای بالادست و پایین دست، یک کف کاذب از جنس پلی اتیلن فشرده به ضخامت ۱ سانتیمتر، طول ۳/۵ متر و عرض ۱ متر در ابتدای فلوم کار گذاشته شد. به منظور ایجاد جریان فوق بحرانی در تبدیلهای همگرا، در کلیه آزمایشها میزان بازشدگی دریچه کشویی ۲ سانتیمتر و عرض کانالهای بالادست و پائیندست به

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				
19/1	• /٧٩	٣/٢				
۳۲/۴	•/٩•	۵/۴				
۳۸/۶	•/٩٨	٧/٠				
48/3	١/•٨	٩/١				



شکل ۱- تبدیل مدل یک



شکل ۲- تبدیل مدل دو

ترتیب برابر ۸۰ و ۴۰ سانتی متر (نسبت همگرایی برابر ۲۰/۵) در نظر گرفته شد. اندازه گیری دبی جریان عبوری از فلوم با استفاده از یک دستگاه دبی سنج صوتی مدل UFM610P، با دقت ۲۰/۰± لیتر بر ثانیه که حسگرهای آن بر روی لوله آبرسان فلوم نصب شده بود، انجام گرفت. برای اندازه گیری ارتفاع سطح امواج از عمق سنج نقطهای با دقت اندازه گیری ۲۰۱± میلی متر استفاده شد. همچنین به منظور اندازه گیری سرعت جریان در نقاط مختلف موج از سرعت سنج الکترومغناطیسی دو بعدی سطح افق با دقت فرود ۲/۳، ۲/۵، ۲۰۷ و ۲/۱ 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 مخرن، H: ارتفاع

آب مخزن و Fr₁: عدد فرود متناظر با آن در کانال بالادست می باشد.

به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی امواج ضربه ای، دو تبدیل همگرا با دیواره مستقیم و با زوایای همگرایی ۶/۷ و ۲۱/۳ درجه به کار گرفته شد (مدلهای ۱ و ۲). شکلهای ۱ و ۲ نمایی 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 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. در شکل (۳) نحوه تشکیل و برخورد اولین امواج ضربه ای نمایش داده شده است. در این شکل، β: نیک پور و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی و عددی امواج ضربهای در



شکل ۳- نحوه تشکیل و برخورد اولین امواج ضربهای



شکل ٤- تشکیل امواج ضربهای در تبدیل مدل یک به ازای Fr₁= ۷



شکل ۵- تشکیل امواج ضربهای در تبدیل مدل دو به ازای Fr1= ۷

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 Fr₁=۷ نشان میدهد.

مقادیر سرعت لحظهای در طول حرکت جبهـه مـوج از فاصـله ۱۰ سانتیمتری ابتدای تشکیل موج در پنج مقطع به فواصل طولی ۳۰ سانتیمتر در مدل یک و ۱۰ سانتیمتر در مدل دو توسط سـرعت سنج اندازه گیری و ثبـت گردیـد. همچنـین در مـدل یـک در هـر راستای قائم، از فاصله ۵ میلیمتری سبتر تا ۵ میلـیمتـری سـطح موج در فواصل قائم ۵ میلیمتری سرعت اندازه گیری شد. در مـدل دو نیز برداشت قائم سـرعت از فاصـله ۵ میلـیمتـری انجام گرفت.

لازم به ذکر است که مدت زمان برداشت دادههای سـرعت در هـر نقطه، پنج ثانیه درنظر گرفته شده بود که در طی زمان مذکور ۱۰۰ مؤلفه لحظهای سرعت در جهتهای طولی و عرضی موج ($\mathbf{u} \in \mathbf{V}$ در شکل ۳) اندازهگیری شده و میانگین آنها ($\overline{u} \in \overline{v}$) بـهعنـوان مؤلفههای سرعت نقطه مورد نظر ثبت می گردیـد. پروفیـل سـطح امواج نیز در طول حرکت جبهه موج با استفاده از عمقسنج نقطه-ای اندازهگیری گردید. با توجه به آشفتگی بالای جریان و اخـتلاط آب و هوا، احتمال بروز خطا در هنگـام قرائـت پروفیـل سـطح آب وجود داشت. بهمنظور به حداقل رساندن خطای مذکور در هر نقطه چندین بار مقدار عمق اندازهگیری شده و میانگین آنها بـه عنـوان ارتفاع موج نقطه مورد نظر ثبت می گردید.



شکل ۲- هندسه شبکهبندی شده مدل ۱ در محیط GAMBIT



شکل ۲- هندسه شبکهبندی شده مدل ۲ در محیط *GAMBIT*

مدل عددی

در تحقیق حاضر بهمنظور شبیه سازی سه بعدی جریان از نرمافزار FLUENT استفاده گردید. در محیط این نرمافزار برای شبیه سازی حرکت سیال معادله های ناویر – استوکس ⁽ در حالت کامل به همراه معادلات آشفتگی و مدل شبیه سازی جریان چند فازی با استفاده از تکنیک حجم محدود، گسسته سازی و حل می شوند. برای تحلیل آشفتگی از مدل های $FNG^{~}$ می شوند. برای تحلیل آشفتگی از مدل های $FNG^{~}$ مح می شوند. برای تحلیل آشفتگی از مدل های SMT استفاده شد. مدل SMT استفاده شد. مدل s-k که شامل سه نوع می شوند. برای تحلیل آشفتگی از مدل های تامل سه نوع معرف انرژی جنبشی اغتشاش و s معرف نرخ تلفات انرژی معرف انرژی جنبشی اغتشاش و s معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش s می باشد. در مدل SM ملاوه بر معادله های معرف انرژی جنبشی اغتشاش و SM معرف نرخ تلفات انرژی معرف انرژی جنبشی اغتشاش و s معرف نرخ تلفات انرژی معرف انرژی جنبشی اغتشاش و s معرف نرخ تلفات انرژی معرف انرژی جنبشی اغتشاش و s معرف نرخ تلفات انرژی معرف انرژی جنبشی می افته نیز برای تحلیل تنش های رینولدز حل می گردد. برای شبیه سازی جریان چند فازی با توجه به اختلاط آب و هوا در سطح موج از مدل اختلاط⁶ استفاده شد. همچنین برای

شبیهسازی جریان در نزدیکی دیواره، تابع دیواره غیرمتعادل^{² به کار} کار گرفته شد. قبل از ورود به محیط FLUENT هندسه مـدل توسط نرمافزار GAMBIT شبکهبندی شد. بهمنظور مستقل از شبکه شدن هندسه مدل طی چهار مرحله بـه ازای شـرایط مـرزی يكسان، شبكه مدل ريزتر و تعداد المان ها افزايش يافت كه در نهایت با بررسی رفتار خطای شبیهسازی، برای شبکهبندی مدل های یک و دو به ترتیب ۴۷۳۲۰۰ و ۳۶۵۴۰۰ المان ۶ وجهی درنظر گرفته شد. شکلهای (۶) و (۲) هندسه شبکهبندی شده مدل های یک و دو را در محیط GAMBIT نشان می دهد. آرایش شبکهها به گونهای طراحی شد که بسته به میزان حساسیت نواحی حل از المان ها با اندازه های متفاوت استفاده گردید. با توجه به اینکه FLUENT از این قابلیت برخوردار میباشد که در نقطهای معین از مدل شبیه سازی شده پارامترهای هیدرولیکی از قبيل فشار، سرعت جريان و ... را بر اساس گام زمانی تعيين شده برداشت کند، لذا مختصات نقاط اندازه گیری سرعت لحظهای و عمق جریان در مدل های آزمایشگاهی جهت استخراج نتایج به نرمافزار معرفی شد. در نهایت به منظور بررسی کارآیی مدل های عددی پارامتر درصد خطای نسبی به ازای عمق و سرعت

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

محاسباتی در مقایسه با مقادیر اندازهگیری شده با استفاده از رابط ه (۱) بهصورت مجزا محاسبه گردید.

نتايج و بحث

نتایج مدل آزمایشگاهی

در شکلهای (۸) و (۹) پروفیلهای سرعت در امتداد حرکت امواج ضربهای به عنوان نمونه به ازای اعداد فرود ۲/۳ و ۷/۰، 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 می باشد. شکلهای (۱۰) و (۱۱) نیز تغییرات ارتفاع جبهه موج را در امتداد حرکت آن به ازای اعداد فرود مختلف در مدلهای مذکور نشان می دهند.



شکل ۸- پروفیلهای سرعت موج ضربهای در جهت u در مدل یک به ازای اعداد فرود مختلف (الف): Fr₁= ۷/۷ (ب): ۲/۱ Fr₁= ۳/۲



شکل ۹- پروفیلهای سرعت موج ضربهای در جهت u در مدل دو به ازای اعداد فرود مختلف $\mathbf{Fr_{i}}= \mathbf{V}/\mathbf{0}$ (ب): ۲۰/۱ $\mathbf{Fr_{i}}= \mathbf{V}/\mathbf{0}$

131





شکل ۱۳- امواج ضربهای شبیه سازی شده توسط مدل عددی در مدل دو به ازای Fr₁= ۷

پروفیلهای به دست آمده برای کلیه مدلها نشان میدهند که توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربهای یکنواخت نمی باشد. همان گونه که مشاهده می شود مقدار سرعت با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار حداکثر، شروع به کاهش می کند. در واقع اختلاط آب و هوا در سطح موج باعث کاهش سرعت آن می شود، به عبارت دیگر هوا به عنوان مانعی برای سرعت عمل میکند. بر این اساس برای هر پروفیل سرعت می توان دو ناحیه مجزا در نظر گرفت، ناحیه افزایش سرعت (ناحیه اول) و ناحیه کاهش سرعت (ناحیه دوم). از سوی دیگر در طول حركت جبهه موج، سرعت موج كاهش و ارتفاع أن افزايش يافته است. برخورد اولین موج مورب با جریان اصلی کانال باعث استهلاک انرژی جنبشی اغتشاش و افزایش ارتفاع موج شده و کاهش سرعت موج را بهدنبال داشته است. با مقایسه شکلهای (۸) و (۹) ملاحظه می شود 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 ضربه ای در جریان های فوق بحرانی کاهش عرض کانال می باشد و از سوی دیگر در مدل دو کاهش عرض جریان نسبت به مدل یک در فاصله کوتاهتری انجام گرفته است لذا تغيير رفتار سيال در ايـن مـدل شـديدتر بـوده و ارتفـاع و سرعت امواج تشکیل شده نیز بیشتر میباشد. به همین خاطر در امواج ضربهای تشکیل شدهٔ مدل دو اختلاط آب و هوا بسیار

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 *ک*ه در امدل دو پس از تشکیل موج ضربهای ارتفاع آن بهصورت ناگهانی افزایش یافته و پس از جدا شدن جبهه موج از دیواره تبدیل تا محل تلاقی امواج، افزایش ارتفاع آن بهطور ملایم صورت گرفته است. با توجه به اینکه در مدل یک کاهش عرض کانال بهصورت تدریجی و در مسیر طولانی تری 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

شـکلهـای (۱۲) و (۱۳) خروجـیهـای گرافیکـی نـرمافـزار FLUENT را پـس از شـبیهسـازی جریـان فـوق بحرانـی در مدلهای یک و دو به ازای Fr_I=۷ نشان میدهد. در شکلهای (۱۴) و (۱۵) پروفیل سطح موج حاصل از مـدلهـای آشـفتگی KSM و (۱۵) پروفیل سطح موج حاصل از مـدلهـای آزمایشگاهی یک و دو به ازای Fr_I=۷ نمـایش داده شـده است. همان گونه که مشاهده می شود بـا پیشـروی جبهـه مـوج بـهعلـت افزایش اختلاط آب و هوا در سطح موج، خطای محاسباتی مدلها

¹⁻ Dissipation of turbulence kinetic energy

نیکپور و همکاران: مطالعه آزمایشگاهی و عددی امواج ضربهای در



جدول ۲- درصد میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت توسط مدلهای آشفتگی *k-E RNG و RSM*

	x=•/١	X=•/۴	x=•/V	x=1	x=1/Y	ميانگين		
k-ε RNG	1/47	١/٨۴	۲/۲۶	۲/۸۵	٣/٣٩	۲/۳۵		
RSM	•///	1/14	1/67	1/94	۲/۰۰	1/44		

جدول ۳- میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت توسط مدلهای آشفتگی *k-ɛ RNG و RSM*

به ازای Fr₁=۷ در مدل دو

ميانگين	x=•/۵	X=•/۴	x=•/٣	x=•/Y	x=•/\	
۵/۷۵	٧/٢۶	۶/۵۲	۵/۷۶	۵/۰۷	4/18	k-e RNG
۳/۲۳	4/41	۳/۷۸	٣/١٩	۲/۶۸	۲/•۶	RSM

در برآورد ارتفاع موج اندکی افزایش یافته است. که در مدل دو بهعلت اختلاط شدیدتر آب و هوا خطای مذکور بیشتر است. لازم به ذکر است که میانگین خطای نسبی محاسبه پروفیل سطح موج $Fr_1 = v$ و RSM و k- ε RNG توسط مدل های آشفتگی k- ε RNG و در مدل یک بهترتیب ۱/۸۲درصد و ۱/۰۶درصد و در مدل دو بهترتیب ۳/۴۶درصد و ۲/۶۷درصد بدست آمد. در شکلهای (۱۶) تا (۲۱) پروفیلهای سرعت به دست آمده از مدلهای آشفتگی و RSM و k- ε RNG در مقایسه با مدل های آزمایشگاهی یک و k- ε دو در مکانهای مختلف امواج ضربهای به ازای $Fr_1 = v$ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود 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 شبیه سازی مدل های آشفتگی کاسته شده است. از سوی دیگر همان گونه که ملاحظه می گردد مقادیر سرعت محاسباتی توسط مدل RSM با مقادیر اندازه گیری 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 RNG در جداول (۲) ع و RSM در مدلهای یک و دو به ازای ۲ =Fr در جداول (۲) افزایش تلاطم، خطای نسبی مدلهای آشفتگی نیز در محاسبه سرعت افزایش یافته است. همچنین مقادیر گزارش شده نشان می دهد که شبیه سازی عددی مدل دو با درصد خطای بیشتری می دهد که شبیه سازی عددی مدل دو با درصد خطای بیشتری شده در مدل دو از تلاطم و اختلاط آب و هوای شدیدتری نسبت به مدل یک برخوردار هستند و همین موضوع می تواند عامل اصلی افزایش خطای شبیه سازی باشد. 188



نتيجه گيري

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل های 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 (مدل های یک و دو)، مقادیر عمق و سرعت لحظه ای در نقاط مختلف امواج ضربهای به ازای چهار عدد فرود مختلف انـدازهگیـری شـد. نتـایج نشان داد که در هر دو مدل توزیع سرعت در راستای قائم امواج ضربهای یکنواخت نمی باشد به طوری که مقدار سرعت با فاصله گرفتن از بستر افزایش یافته و پس از رسیدن به مقـدار حـداکثر در اثر اختلاط آب و هوا در سطح موج شروع به كاهش مىكند. 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 مدل های 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

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- ε RNG بحرانی در تبدیلهای و kRSM استفاده گردید. نتایج نشان داد که با پیشروی جبهه موج و افزایش تلاطم، خطای محاسباتی مدل های آشفتگی در برآورد ارتفاع و سرعت موج افزایش می یابد. همچنین با افزایش فاصله از بستر، تطابق بین نتایج عددی با آزمایشـگاهی در بـرآورد سـرعت کاهش یافت. از سوی دیگر به علت 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 محاسبه پروفیل سطح موج توسط مدل های آشفتگی مذکور به ازای $Fr_1 = \gamma$ در مدل یک بهترتیب ۱/۸۲درصد و ۱/۰۶درصد و در مدل دو بهترتیب ۳/۴۶درصد و ۲/۶۷درصد بدست آمد. میانگین خطای نسبی محاسبه سرعت موج به ازای شرایط فوق نیز در مدل یک بهترتیب ۲/۳۵درصد و ۱/۴۴درصد و در مدل دو بهترتیب ۵/۷۵درصد و ۳/۲۳درصد حاصل شد. نتایج کلی حاکی از آن بود که مدل آشفتگی RSM در محاسبه مقادیر ارتفاع و سرعت امواج ضربهای عملکرد بهتری به همراه دارد.

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 shallowwater approach. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(9): 916-926.
- 6- Montazeri-Namin, M., Ghazanfari-Hashemi, R. and M. Ghaeini-Hessaroeyeh. 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.