

شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در سرریز جانبی با استفاده از مدل آشفتگی $k - e$ و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی

پیمان ورجاوند^{1*}، داود فرسادی‌زاده²، علی حسین‌زاده دلیر² و علی اشرف صدرالدینی²

تاریخ دریافت: 88/3/24 تاریخ پذیرش: 88/4/20

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

2- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه E-mail: pvarjavand84@gmail.com

چکیده

سرریزها سازه‌هایی هستند که برای تخلیه سیلاب از مخزن سد در مواقع اضطراری استفاده می‌شوند. یکی از رایج‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین این سازه‌ها، سرریز جانبی می‌باشد. در تحقیق حاضر، هیدرولیک جریان در مدل فیزیکی سازه کنترل سیلاب سد و نیار واقع در استان آذربایجان شرقی که شامل سرریز جانبی، کانال جمع‌آوری، تبدیل، سرریز اوجی و تندآب می‌باشد، به صورت سه‌بعدی و با استفاده از مدل عددی Fluent شبیه‌سازی گردید و نتایج شامل عمق جریان و فشار هیدرواستاتیکی در 110 نقطه بین مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. از مدل آشفتگی $k - e$ و مدل شبیه‌سازی جریان چندفازی حجم سیال (VOF)، برای تحلیل جریان استفاده گردید، سپس به تحلیل پارامترهای آشفتگی جریان در کانال جمع‌آوری و توسعه لایه مرزی بر روی تندآب پرداخته شد. نتایج حاصل بیانگر تطابق مناسب نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بخصوص مدل $k - e$ استاندارد برای فشار هیدرواستاتیکی و مدل RNG $k - e$ برای پروفیل سطح آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی، لایه مرزی، مدل آشفتگی $k - e$ ، Fluent، VOF

3D Simulation of Flow in Side Spillway with k-ε Turbulence Model and Comparing the Results with Physical Model

P Varjavand^{1*}, D Farsadizadeh², A Hosseinzadeh Dalir² and AA Sadraddini²

Received: 14 June 2009 Accepted: 11 July 2009

¹ MSc Student, Dept. of Water Engin. University of Tabriz, Iran

² Assoc. Prof., Dept. of Water Engin. University of Tabriz, Iran

* Corresponding author : E-mail: pvarjavand84@gmail.com

Abstract

Spillways are structures used for releasing the surplus floodwater in necessary conditions from storage dams. Side spillway is one of the most common and complicated structures. In this research, hydraulics of the flow in the physical model of flood control structure for Vanyar dam which consists of side spillway, lavok, transition, ogee spillway and chute is three dimensionally simulated, using fluent numerical model and the results consisting of flow depth and hydrostatic pressure at 110 points were compared with experimental data. For flow analysis, k-ε model for turbulence and volume of fluid (VOF) model for multiphase flow simulation were applied. The analysis of turbulence parameters in lavok channel and boundary layer development on chute was also provided. Results show that there is a good agreement between numerical and experimental results, especially standard k-ε model for hydrostatic pressure and RNG k-ε model for water surface profile.

Keywords: Boundary layer, Fluent, k-ε turbulence model, Side spillway, VOF

مقدمه

مشخصی نسبت به مدل اصلی¹ استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر بدلیل ابداع روش‌های پیشرفته و دقیق حل عددی معادلات و بوجود آمدن رایانه های قوی برای انجام محاسبات، می‌توان در طراحی این سازه‌های پیچیده از روش‌های حل عددی نیز بهره جست. توسعه اولیه علم دینامیک سیالات محاسباتی² در دهه 60 و 70 براساس نیازی بود که در صنعت هوا-فضا احساس می‌شد. اما امروزه CFD هر جا که جریان سیال اهمیت پیدا کند، جای خود را باز کرده و به کمک مهندسين و طراحان آمده است (مهراییان 1386).

سویچ و همکاران (2001) جریان بر روی سرریز اوجی استاندارد را با استفاده از مدل عددی و فیزیکی

سدها سازه‌هایی هستند که در مسیر رودخانه ساخته شده و باعث تشکیل مخزن و بالا آمدن سطح آب در بالادست می‌شوند. یکی از سازه‌های مهم سدها که پایداری سد و مناطق پایین‌دست را در زمان وقوع سیلاب تضمین می‌کند، سرریزها هستند. سرریز عبارت است از سازه‌ایی که آب اضافی را خصوصا در زمان سیلاب که جریان آب به بدنه سد و تاسیسات وابسته صدمه می‌زند و ممکن است باعث خرابی آنها شود، دفع می‌کند. از میان سرریزهای رایج در ساخت سدها، سرریزهای جانبی دارای کاربرد وسیع و درعین حال پیچیدگی خاص هیدرولیکی هستند. در طراحی این سرریزها، تشکیل جریان های سه بعدی و دشواری حل معادلات حاکم بر آن، از مدل فیزیکی تحت مقیاس

¹ Prototype

² Computational fluid dynamic (CFD)

و فیزیکی، مدل RNG با تابع دیواره نامتعادل بهترین همخوانی را در مورد سرعت متوسط داشتند.

یه و همکاران (2006) سرریز با جریان آزاد را بطوری که از پلان دارای شکل S مانند باشد، بصورت عددی مدل کردند. مدل آشفتگی $k - e$ و مدل جریان چندفازی VOF برای شبیه‌سازی استفاده شد. مقادیر سرعت، بردارهای سرعت، پروفیل سطح آب، توزیع انرژی جنبشی اغتشاش و توزیع نرخ استهلاك انرژی جنبشی در مدل عددی و فیزیکی با هم مقایسه شد و همخوانی مناسبی را نشان داد.

سی و همکاران (2007) راه‌ماهی با شکاف قائم³ را بصورت عددی مدل‌سازی کردند. برای واسنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی پرتاس و همکاران (2004) که مدل راه‌ماهی را در فلومی با طول 12 و عرض 1 متر و با شیب 10% ساختند، استفاده شد. شبیه‌سازی عددی با روش حجم محدود انجام یافت. نتایج مدل عددی و فیزیکی شامل پروفیل سرعت طولی، سرعت اصطکاکی دیواره⁴، عمق جریان، انرژی اغتشاش، تولید انرژی اغتشاش و تنش رینولدز در جهت افقی با هم مقایسه شد و نتایج همخوانی خوبی با هم داشتند.

در تحقیق حاضر جریان آب در سازه کنترل سیلاب سد (مطالعه موردی مدل فیزیکی سرریز سد ونیار)، بصورت عددی با استفاده از مدل Fluent شبیه‌سازی گردید و نتایج عددی با نتایج مدل فیزیکی مقایسه شد. سازه مذکور از نوع سرریز جانبی است که دارای پیچیدگی خاص هیدرولیکی بوده و طبق منابع موجود تاکنون به صورت عددی شبیه‌سازی نشده است. هدف از این تحقیق بررسی این نکته است که آیا مدل عددی می‌تواند شرایط جریان در سرریز جانبی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نماید یا خیر؟ چرا که در این صورت بجای صرف هزینه زیاد برای مدل فیزیکی می‌توان از این مدل با هزینه کمتر و سریعتر جریان را شبیه‌سازی نمود.

شبیه‌سازی کرده و مقایسه نمودند. مدل‌های فیزیکی برای ده شرایط مختلف جریان اجرا شد و پیژومتر برای اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف سرریز نصب گردید. در کنار نتایج آزمایشگاهی از استانداردهای دفتر عمران اراضی آمریکا¹ و مهندسین مشاور ارتش آمریکا² استفاده شد. شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از مدل Flow-3D، بروش حجم محدود انجام گرفت. نتایج مدل عددی با مدل فیزیکی، استاندارد دفتر عمران اراضی آمریکا و مهندسین مشاور ارتش آمریکا مقایسه شد و همخوانی خوبی را باهم نشان داد.

چن و همکاران (2002) جریان برروی سرریز پلکانی را با استفاده از مدل عددی و فیزیکی شبیه‌سازی کردند. مدل فیزیکی بکاربرده شده دارای ارتفاع 78/9، هد طراحی 9/7 و عرض 30 سانتیمتر شامل 13 پلکان بوده است. شرط مرزی ورودی از نوع سرعت و شرط مرزی خروجی و بالای فضای محاسبات از نوع فشار با مقدار صفر استفاده گردید. نتایج مدل عددی شامل مقادیر و بردارهای سرعت در پلکان 7، مقادیر و خطوط هم‌تراز فشار در پلکان‌های حاوی پیژومتر، نیم‌رخ سطح آب و نوع جریان عبوری از سرریز با مدل فیزیکی مقایسه گردید و تطابق مناسبی را نشان داد.

درگاهی (2006) جریان برروی سرریز اوجی را بصورت عددی و فیزیکی شبیه‌سازی کرد. مدل آزمایشگاهی وی براساس استاندارد مهندسین مشاور ارتش آمریکا با هد طراحی 0/1 متر و ارتفاع 0/2 متر، در فلومی به عرض 0/403، طول 2/4 و ارتفاع 0/6 متر ساخته شد. برای حل عددی جریان از مدل Fluent با شبکه‌بندی منظم و برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از روش VOF با شمای گسسته‌سازی QUICK استفاده شد. سطح آب نقطه‌ای با $VOF = 0.5$ فرض شد. نتایج مدل فیزیکی در مورد نیم‌رخ سطح آب تطابق مناسبی با مدل عددی و استاندارد دفتر مهندسین مشاور ارتش آمریکا داشت. با مقایسه نتایج مدل عددی

³ Vertical slot fish way

⁴ Wall friction velocity

¹ U.S. Bureau of Reclamation

² U.S. Army Corps of Engineers

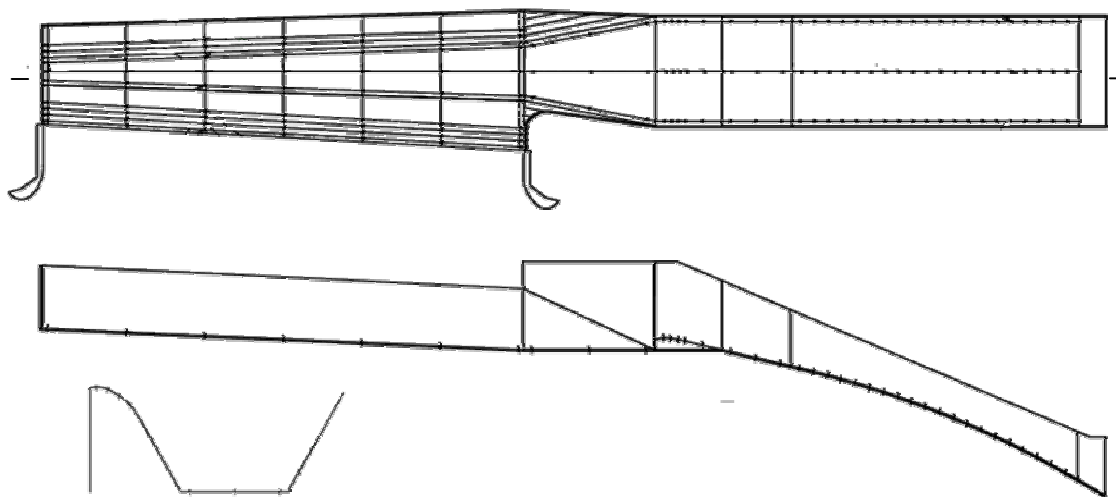
مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی

سد مخزنی شهید مدنی (ونیار) به منظور تامین آب مورد نیاز اراضی دشت تبریز بر روی شاخه اصلی رودخانه آجی‌چای و در 5 کیلومتری شمال شرقی تبریز احداث می‌گردد. بمنظور مطالعه دقیق سیستم تخلیه سیلاب سد و نیار مدل فیزیکی آن با مقیاس 1:40 در بخش سازه‌های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وابسته به وزارت نیرو ساخته شد و متغیرهای هیدرولیکی شامل فشار هیدرواستاتیکی و عمق جریان در طول سرریز در 110 نقطه اندازه‌گیری شده است، شکل 1 موقعیت نقاط اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی مدل را نشان می‌دهد. برای ساختن مدل فیزیکی از پلکسی گلاس استفاده گردید، مشخصات مدل

فیزیکی ساخته شده بدین قرار می‌باشد: عرض شوت 0/7، عرض در ابتدا و انتهای کانال جمع‌آوری بترتیب

0/18 و 0/37، طول تبدیل 0/75، طول کانال جمع‌آوری 2/75 و طول مدل تا ابتدای حوضچه آرامش 6 متر. عمق جریان در مدل با استفاده از لیمینیمتر با دقت 0/1 میلیمتر و فشار هیدرواستاتیک با استفاده از پیژومتر با دقت 0/1 میلیمتر آب اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری عمق جریان در بخش کانال جانبی مدل سازه مورد مطالعه (شکل 1) بدلیل تلاطم بسیار زیاد جریان و برای حصول دقت مورد نظر در هر نقطه، عمق جریان گزارش شده متوسط 5 عمق اندازه‌گیری شده در طول 10 ثانیه پس از ماندگار شدن جریان می‌باشد(بی-نام 1383).



شکل 1- محل اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی در مدل فیزیکی

مدل Fluent

معادله مومنتوم ناویر - استوکس متوسط رینولدزی بصورت زیر ارائه شده است (اندرسون و همکاران 1997):

$$(2) \quad \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(u + \bar{u}) + (\bar{p} + p') - \tau_{xx}] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(v' + \bar{v})] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} [(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')(w' + \bar{w}) - \tau_{zx}] = 0 \end{aligned}$$

مدل k-ε: مدل k-ε بر سه نوع استاندارد⁸، RNG⁹ و Realizable¹⁰ می‌باشد. این مدل‌ها دارای دو معادله اضافه براساس k, ε هستند. در این مدل k معرف انرژی جنبشی اغتشاش¹¹ و ε معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش¹² می‌باشد.

در جریان‌های آشفته، جریان و در نتیجه آن تشکیل پروفیل سرعت بشدت تحت تاثیر دیواره می‌باشد، لذا تحلیل مناسب جریان در نزدیکی دیواره دارای اهمیت است. روش‌های شبیه‌سازی جریان در نزدیکی دیواره بر دو نوع است. در روش اول لایه درونی تحلیل نمی‌شود بلکه بوسیله روابط نیمه تجربی از نزدیک دیواره به لایه بیرونی تعمیم داده شده، که این روش تابع دیواره¹³ نام دارد. در روش دوم لایه درونی تحلیل شده و پس از آن به تحلیل لایه بیرونی پرداخته می‌شود، که این روش مدل نزدیک دیواره¹⁴ نامیده شده است (کیم و چادری 1995، چن و پتل 1998). در روش دوم چون نیاز به تعدادی المان در زیر لایه لزج است، زمان و هزینه محاسبات را به شدت بالا می‌برد، به همین دلیل

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل Fluent بر اساس معادلات پیوستگی و مومنتوم، مدل‌های آشفتگی k-ε، روش‌های بررسی جریان چندفازی¹، روش حل عددی حجم محدود² و الگوریتم‌های حل همزمان سرعت-فشار (SIMPLE³، SIMPLEC⁴ و PISO⁵) هیدرولیک جریان در مدل فیزیکی سرریز سد و نیار شبیه‌سازی گردید. برای شبیه‌سازی جریان چند فازی از مدل حجم سیال⁶ و برای شبیه‌سازی جریان آشفته از روش آشفتگی k-ε و مدل‌های RNG، Standard، Realizable و برای تحلیل جریان در کنار دیواره از مدل Non-Equilibrium wall Function استفاده گردید.

روش حجم سیال: اگر نسبت حجمی سیال q در سلول بصورت a_q نشان داده شود پس یکی از سه شرایط زیر وجود دارد (بی‌نام 2005):

$$I. \quad a_q = 0, \text{ سلول از سیال } q \text{ خالی می باشد.}$$

$$II. \quad a_q = 1, \text{ سلول پر از سیال } q \text{ می باشد.}$$

$$III. \quad 0 < a_q < 1, \text{ سلول حاوی سطح مشترک بین}$$

سیال q و یک یا چند سیال دیگر است.

در روش حجم سیال مرز بین دو فاز نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود که مقدار عددی پارامتر کسر حجمی⁷ در آن 0/5 باشد (درگاهی 2006).

معادله کلی حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر - استوکس می‌باشد.

معادله پیوستگی رینولدز بصورت زیر می‌باشد:

$$(1) \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{r}u_j + \bar{r}'u'_j) = 0$$

⁸Standard k-ε model

⁹Renormalization-group k-ε model (RNG)

¹⁰Realizable k-ε model

¹¹Turbulent kinetic energy

¹²Dissipation rate of turbulent kinetic energy

¹³Wall function method

¹⁴Near wall treatment model

¹Multi phase flow

²Finite volume method

³Semi-implicit method for pressure-linked equations

⁴Semi-implicit method for pressure-linked equations consistent

⁵Pressure-implicit with splitting of operators

⁶Volume of fluid (VOF)

⁷Volume fraction

تعداد تقریبی المان‌ها 50000، 60000، 90000، 170000 و 270000 منظور شد. نتایج نشان داد که سازه با تعداد المان 76000، بهترین جواب را با حداقل تعداد شبکه دارا می‌باشد.

در زمان شروع جریان (زمان صفر) مخزن مدل دارای آب می‌باشد، سپس با توجه به گام زمانی تعریف شده حل معادله جریان بصورت غیرماندگار و تکراری شروع می‌شود تا جریان به حالت ماندگار برسد. انتخاب گام زمانی کوچک باعث طولانی شدن و انتخاب گام زمانی بزرگ باعث واگرا شدن جوابها می‌شود. بهترین گام زمانی برای مدل Fluent، گام زمانی است که بواسطه آن همگرایی جوابها تضمین شده و تعداد تکرار برای رسیدن به همگرایی بین 5-10 تکرار باشد (بی‌نام 2005). بنابراین گام زمانی در تحقیق حاضر از مقدار 0/0001 ثانیه برای شروع حل تا مقدار 0/01 ثانیه در انتهای حل متغیر بود. البته در ابتدای حل، بدلیل واگرایی زیاد گام زمانی کوچک در نظر گرفته شد و با گذشت زمان حل و پایداری نسبی جوابها، گام زمانی بمرور افزایش یافت. با توجه به هدف این تحقیق که همان تحلیل جریان آب است و قابل صرفنظر بودن چگالی هوا در مقابل چگالی آب ($1/225 \text{ kg/m}^3$ نسبت به kg/m^3 998/2) و همچنین با توجه به اینکه در همه سازه و در کل مدت زمان حل، سرعت انتقال موج در آب بسیار کمتر از سرعت انتقال صوت در آب می‌باشد، پس می‌توان جریان را غیرقابل تراکم در نظر گرفت. در مدل Fluent معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر-استوکس حل می‌شوند. به منظور حل، معادلات کمکی مختلفی برای شبیه‌سازی آشفتگی و جریان چندفازی استفاده می‌شوند. روش‌های آشفتگی و شبیه‌سازی جریان چندفازی بکاررفته در این تحقیق در جدول 1 آورده شده است. در این تحقیق از چهار نوع شرط مرزی برای مدل استفاده شد. شکل 2 شرایط مرزی بکاررفته در مدل و شمای کلی سرریز و دیواره‌های شبکه‌بندی شده را نشان می‌دهد. برای شرط مرزی دیواره (سطوح B)

برای تحلیل جریان کنار دیواره از مدل Non-equilibrium wall functions که زیر مجموعه روش اول می‌باشد، استفاده شد.

Fluent امروزه از کامل‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های CFD در دنیا است. که در آن معادلات بروش حجم محدود حل می‌شوند.

بدلیل پیچیدگی خاص هندسی سازه سرریز جانبی و بمنظور ایجاد یک شبکه منظم و قابل قبول جهت حل معادله جریان، حجم کل سازه موردنظر به 59 بلوک کوچکتر تقسیم شد. برای شبکه‌بندی مدل بطورکلی از المان‌های 5 و 6 وجهی استفاده گردید. اندازه تقریبی شبکه در مدل نهایی بین 0/16 متر در مخزن تا 0/002 متر در بخش شبکه لایه مرزی¹ متغیر بود. بمنظور کنترل مقدار عددی y^+ بین 30 تا 300، که در این بازه رابطه لگاریتمی سرعت قابل استناد می‌باشد (بی‌نام 2005) از شبکه لایه مرزی استفاده گردید. استفاده از شبکه لایه مرزی باعث افزایش چشمگیر تعداد المان و در نتیجه آن افزایش شدید زمان محاسبات می‌گردد. برای کاهش تعداد کل المان‌ها از ابزار الگوی تبدیل² با مقدار عددی 4:2 استفاده شد و با این کار تراکم شبکه بر روی سطح کف سازه دو برابر شده بدون اینکه تاثیر چندانی در تعداد کل المان‌های سازه داشته باشد. بمنظور بالابردن دقت شبیه‌سازی سطح آزاد جریان، در قسمت‌هایی از مدل که گمان می‌رفت پروفیل سطح آزاد جریان در آنجا تشکیل شود، با استفاده از ابزار نسبت متواتر دو طرفه³ تراکم شبکه با ثابت نگه‌داشتن تعداد کل شبکه، افزایش یافت. بمنظور مستقل کردن سازه از شبکه، مدل سازه برای یک دبی ثابت (دبی طراحی)، شرایط شبکه و پارامترهای حل کاملاً یکسان، مدل شماره 2 در جدول 1 با پنج المان اجرا گردید بطوری که المانها ابتدا کوچک فرض شده و بتدریج بزرگ شدند.

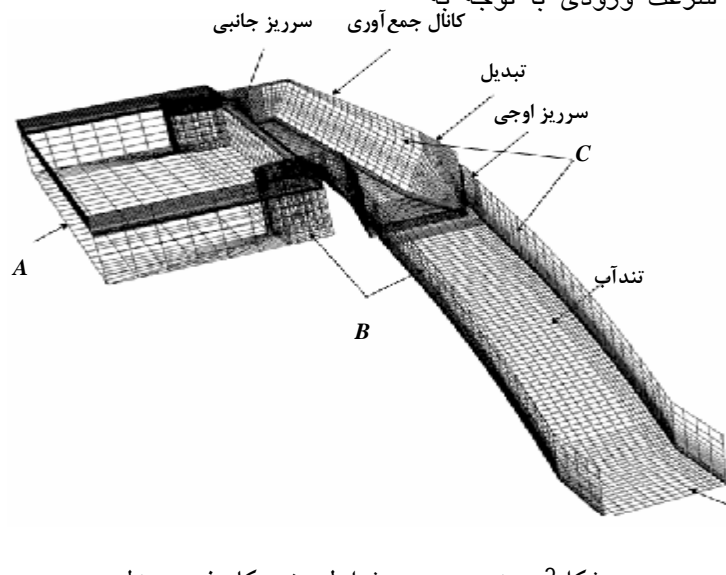
¹ Boundary layer mesh

² Transition pattern

³ Double sided successive ratio

اندازه هندسی شرط مرزی ورودی به مدل داده شد. شرط مرزی خروجی (سطح D) از نوع فشار خروجی با مقدار صفر و شرط مرزی بالای فضای محاسبات (سطوح C) از نوع فشار ورودی با مقدار فشار نسبی صفر تعریف شد.

بدلیل ساخته شدن مدل سرریز از جنس پلکسی‌گلاس و ناچیز بودن مقدار زبری مطلق، از آن صرف‌نظر گردید. برای تعریف شرط مرزی ورودی آب (سطح A)، دبی ورودی به مدل معادل دبی ورودی به مدل فیزیکی که تحت مقیاس 1:40 ساخته شد، تعیین گردید که مقدار آن 69/67 لیتربرثانیه بود و سرعت ورودی با توجه به



شکل 2- هندسه سرریز و شرایط مرزی بکاررفته در مدل

استخراج شد و با مدل فیزیکی مقایسه گردید. سطح آب در نقطه‌ای در نظر گرفته شد که در آن $VOF = 0.5$ باشد، برای یافتن این نقطه از روش میان‌یابی خطی استفاده گردید (درگاهی 2006). برای تعیین عمق جریان در کانال جمع‌آوری مانند مدل فیزیکی از متوسط 5 عمق جریان که طی 10 ثانیه پس از گذشت از ماندگار شدن جریان اندازه‌گیری شده بود استفاده گردید.

معیار ماندگار شدن جریان در مدل عددی، ثابت شدن تغییرات توزیع قائم سرعت و عمق جریان نسبت به زمان در نقطه C20 طبق شکل شماره 1 و برابر شدن تقریبی دبی ورودی به مدل و دبی خروجی از آن می-باشد، حداکثر اختلاف دبی ورودی و خروجی 0/05 درصد برای ماندگار شدن جریان در نظر گرفته شد. پس از اتمام اجرای مدل‌ها، نتایج در 110 نقطه از مدل عددی

جدول 1- روش‌های آشفتگی و شبیه‌سازی جریان چندفازی بکار رفته در مدل

مشخصات مدل	شماره مدل
Unsteady, VOF, k-e, Standard, Non-Equilibrium Wall Function, PISO, Second order Upwind, PRESTO	۱
Unsteady, VOF, k-e, RNG, Non-Equilibrium Wall Function, SIMLPE, Second order Upwind, PRESTO	۲
Unsteady, VOF, k-e, RNG, Non-Equilibrium Wall Function, SIMPLEC, Second order Upwind, PRESTO	۳
Unsteady, VOF, k-e, RNG, Non-Equilibrium Wall Function, PISO, Second order Upwind, PRESTO	۴
Unsteady, VOF, k-e, Realizable, Non-Equilibrium Wall Function, PISO, Second order Upwind, PRESTO	۵

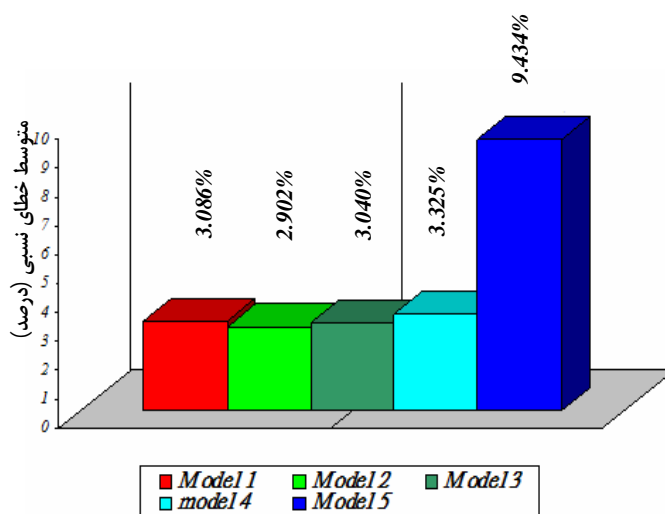
نتایج و بحث

در تحقیق حاضر جریان در سرریز جانبی، کانال جانبی، تبدیل، سرریز اوجی و تندآب بصورت عددی تحلیل گردید و نتایج عددی با مدل فیزیکی مقایسه شد. با تطبیق مناسب نتایج مدل عددی با مدل فیزیکی، به تحلیل تغییرات انرژی جنبشی اغتشاش، شدت اغتشاش و ویسکوزیته اغتشاش در طول کانال جانبی و بررسی روند توسعه لایه مرزی در طول تندآب پرداخته شد.

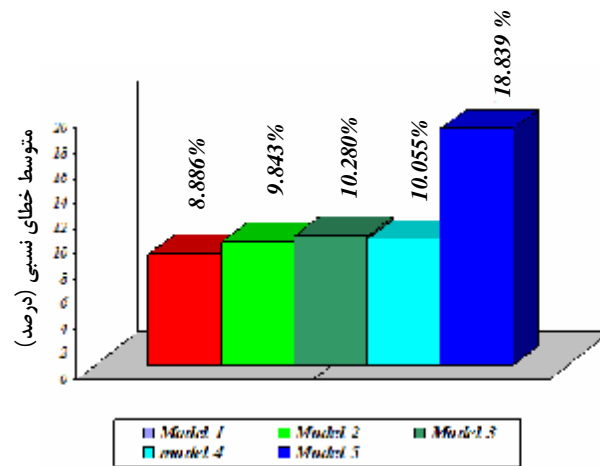
مقایسه نتایج عددی و فیزیکی: شکل 3 نشان دهنده متوسط خطا در شبیه سازی عمق جریان برای مدل 5 مورد استفاده می باشد، با توجه به شکل مشاهده می شود که مدل 2 کمترین و مدل 5 بیشترین خطای نسبی را در برآورد عمق جریان دارد. تغییر در الگوریتم فشار-سرعت با توجه به نتایج بدست آمده از مدل های 2، 3 و 4 تاثیر چندانی در شبیه سازی پروفیل سطح آب ندارد، بنابراین بکاربردن روش SIMPLEC و PISO با توجه به اینکه زمان محاسبات بیشتری نسبت به روش SIMPLE بویژه در تحقیق حاضر که به فضای محاسبات بزرگ و پیچیده ای احتیاج دارند، مقرون بصرفه نمی باشد.

شکل 4 نشان دهنده متوسط خطای نسبی در شبیه سازی فشار هیدرواستاتیکی برای مدل 5 عددی می باشد. با توجه به این شکل مشاهده می شود که مدل 1 کمترین و مدل 5 بیشترین خطا را در برآورد فشار دارد. رفتار الگوریتم های فشار-سرعت با توجه به شکل مشابه نتایج حاصل از عمق جریان می باشد.

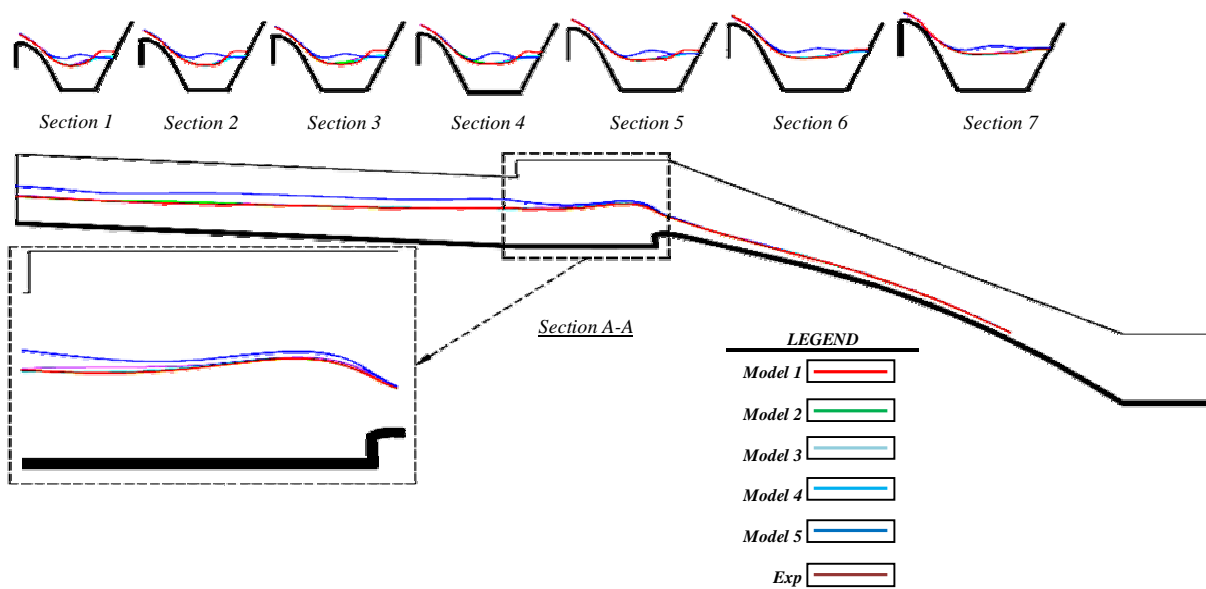
شکل 5 نمایانگر پروفیل سطح آب برای نتایج آزمایشگاهی و عددی مدل 5 در 7 مقطع عرضی کانال جانبی و مقطع طولی کل سرریز (شکل 1) است. با توجه به شکل مذکور مشاهده می شود که مدل 5 همانطور که قبلا بیان شد، بیشترین خطا را دارد. حال چهار مدل دیگر نتایج بسیار نزدیک بهم و نزدیک به مدل دارند. شکل 6 گرادیان هیدرولیکی در مقاطع عرضی کانال جمع آوری و مقطع طولی کل سازه برای نتایج عددی و آزمایشگاهی را نشان می دهد. براساس شکل 6 خطای برآورد گرادیان هیدرولیکی بیشتر از پروفیل سطح آب می باشد که مربوط به افزایش خطای کلیه مدل ها در شبیه سازی فشار است.



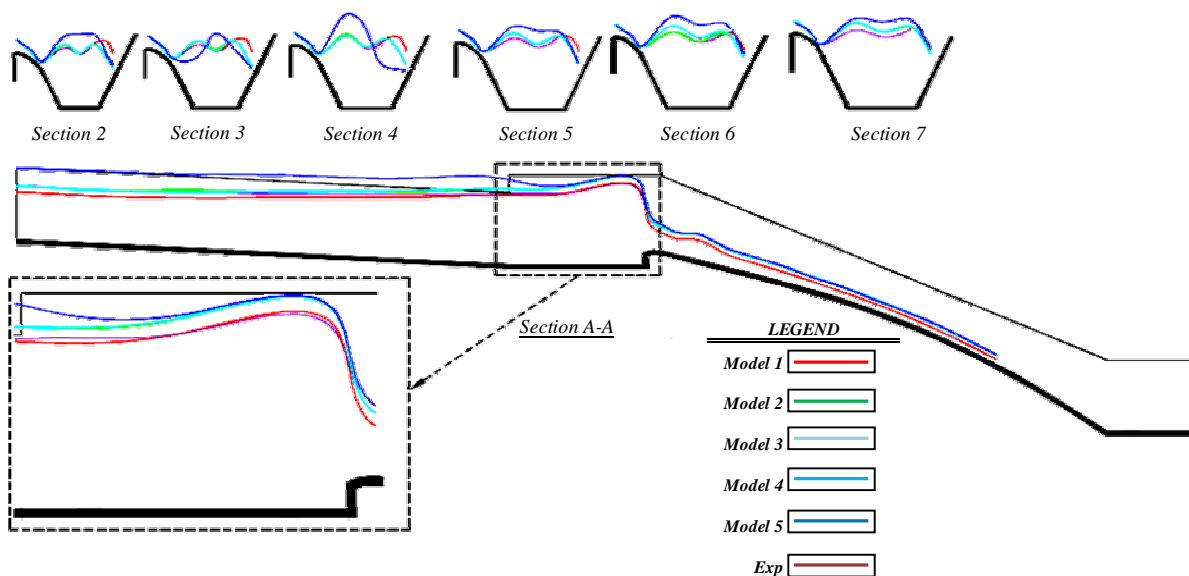
شکل 3- متوسط خطای نسبی برآورد عمق جریان با مدل های عددی



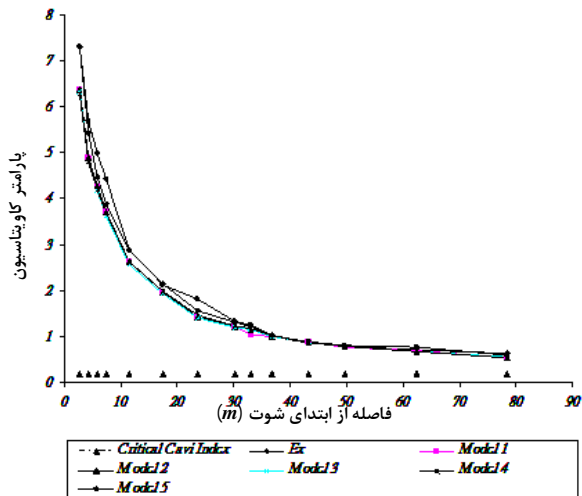
شکل 4- متوسط خطای نسبی برآورد فشار با مدل‌های عددی



شکل 5- پروفیل سطح آب در کانال جانبی برای مدل عددی و فیزیکی



شکل 6- گرادیان هیدرولیکی در کانال جانبی برای مدل عددی و فیزیکی

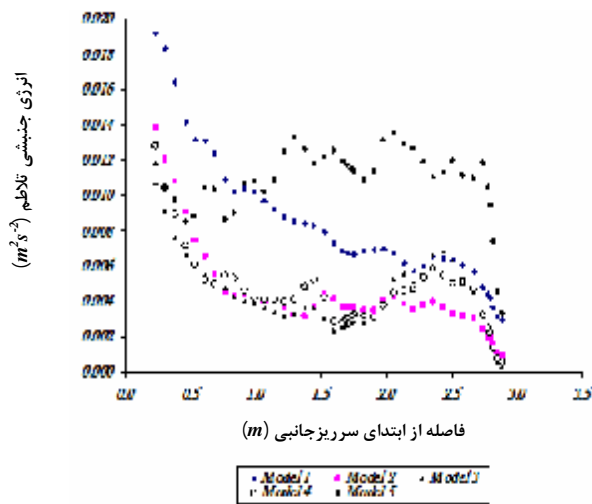


شکل 7- پارامتر کاویتاسیون در طول تندآب

برداشت اطلاعات در طول کانال تشخیص داد. این فاصله را می‌توان فاصله‌ای در نظر گرفت که در آن مقدار ویسکوزیته اغتشاش حداکثر باشد. با توجه به شکل 8 مشاهده می‌شود که حداکثر ویسکوزیته

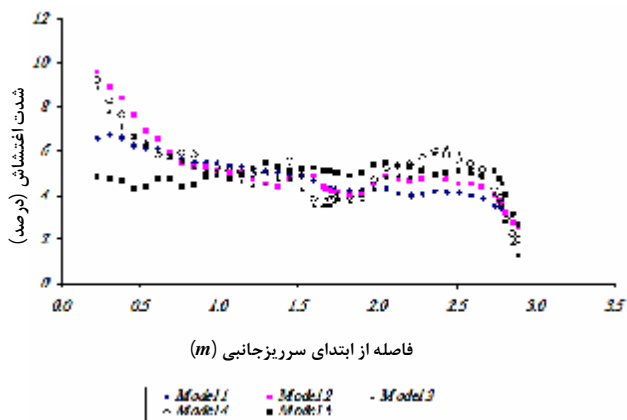
بررسی کاویتاسیون: کاویتاسیون یکی از مهمترین پارامترها در طراحی تندآب می‌باشد. از آنجایی که اهمیت این پارامتر در سازه اصلی بسیار زیاد است لذا این پارامتر در نمونه اصلی سازه بررسی گردید. شکل 7 نشان دهنده تغییرات شاخص کاویتاسیون از ابتدای سرریز اوجی تا انتهای تندآب می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود در دبی طراحی، سرریز احتیاج به هوادهی نداشته و شاخص کاویتاسیون همواره بزرگتر از مقدار بحرانی 0/2 است. در این شکل تطابق مناسب مدل عددی و فیزیکی نیز مشاهده می‌شود.

تحلیل پارامترهای اغتشاش: در کانال‌های جانبی با افزایش دبی یکی از مهمترین پارامترهای جریان آشفتگی و اغتشاش می‌باشد که اندازه‌گیری آن در آزمایشگاه بسیار مشکل بوده و مستلزم صرف هزینه زیاد می‌باشد. برای تحلیل اغتشاش در طول کانال جمع-آوری ابتدا باید فاصله مناسب از کف کانال را برای



شکل 9- تغییرات k در طول کانال جانبی

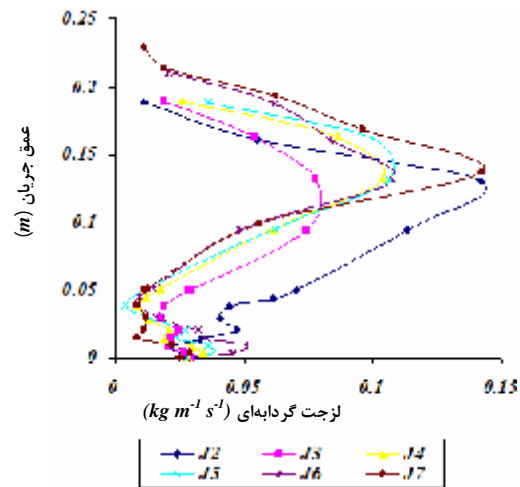
شکل 10 نشان‌دهنده تغییرات شدت اغتشاش جریان در طول کانال جانبی می‌باشد. کلیه مدل‌ها جزء مدل 5 روند تقریباً یکسانی از این پارامتر را نشان می‌دهند. این روند مشابه تغییرات k بوده و در ابتدا بدلیل حضور دیواره شدید و به دنبال آن روند تغییرات آرامتر شده و در انتها نیز بصورت نسبتاً شدید کاهش می‌یابد. در این شکل نیز نتایج مدل‌های 3 و 4 نزدیک به هم می‌باشند.



شکل 10- تغییرات شدت اغتشاش در طول کانال جانبی

شکل 11 نشان‌دهنده تغییرات ویسکوزیته اغتشاش در طول کانال جانبی می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که روند تغییرات برای مدل‌های 1 تا 4 مشابه

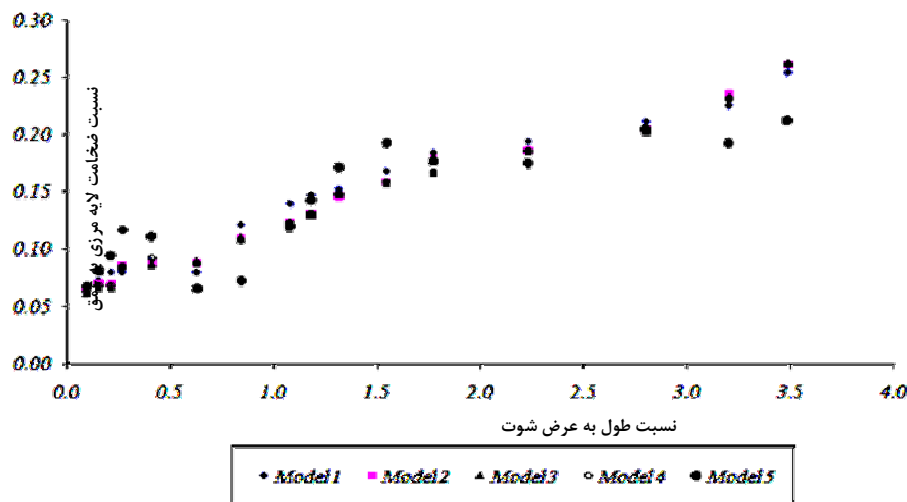
اغتشاش در فاصله 13 سانتی‌متر از کف می‌باشد، در این شکل مقادیر ویسکوزیته اغتشاش در خطوط قائم تعریف شده در z2 تا z7 با توجه به شکل 1 آورده شده است. لذا تغییرات پارامترهای اغتشاش جریان در فاصله 13 سانتی‌متر از کف کانال بررسی گردید.



شکل 8- محل وقوع حداکثر ویسکوزیته اغتشاش در کانال جانبی

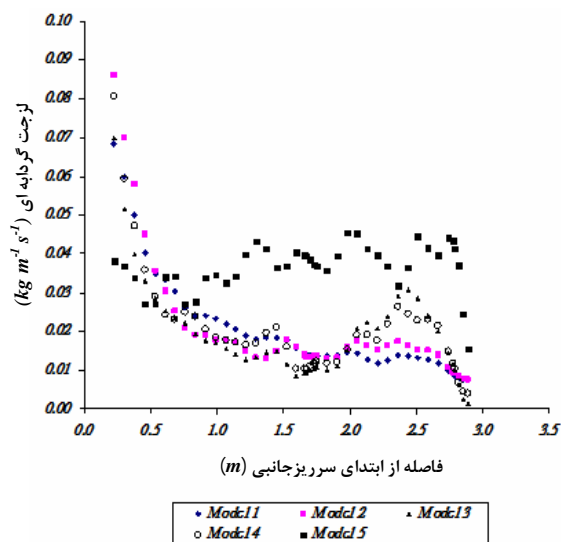
شکل 9 نشان‌دهنده روند تغییرات انرژی جنبشی اغتشاش در طول کانال جانبی می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که تغییرات نتیجه شده برای مدل‌های 1 تا 4 دارای روند مشابه بوده ولی برای مدل 5 این روند بشدت تغییر کرده که ناشی از خطای نسبی زیاد این مدل است. در کل با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در ابتدا بدلیل وجود دیوار بالادست کانال جمع‌آوری مقدار k بسیار زیاد بوده و با فاصله گرفتن از آن در طول کانال مقدار k با نرخ بسیار شدید کاهش می‌یابد و پس از آن روند تغییرات کندتر و آرامتر می‌گردد و تا انتهای کانال جانبی بدلیل نزدیک شدن به تبدیل و سرریز اوجی مقدار k بشدت کاهش می‌یابد. در کل مدل شماره 1 مقدار k را در طول کانال جانبی بیشتر از مدل‌های 2، 3 و 4 برآورد کرده است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل‌های 3 و 4 بسیار نزدیک بهم هستند.

نقطه‌ای از کف در نظر گرفته شد که در آن مقدار سرعت $0/99$ سرعت متوسط جریان می‌باشد (درگاهی (2006)). با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نتایج 5 مدل نزدیک به هم بوده و در طول سازه لایه مرزی در حال توسعه یافتن است بجزء در نقطه‌ای بفاصله $0/44$ متر از ابتدای سرریز اوجی که در آن ضخامت لایه مرزی بصورت موضعی کاهش می‌یابد، دلیل آن تغییر در انحنای کف سازه در فاصله بین انتهای اوجی و ابتدای تندآب است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود لایه مرزی در انتهای تندآب توسعه کامل نیافته است و مقدار توسعه یافتگی آن حداکثر 27% است، که دلیل آنرا می‌توان کوتاه بودن طول تندآب و وجود گرادیان فشار منفی بر روی تندآب دانست، به‌طوریکه این امر باعث کمتر شدن میزان توسعه یافتگی جریان در مقایسه با جریان‌های یکنواخت زیرجرانی که در آنها مقدار فشار ثابت بوده و گرادیان فشار وجود ندارد، می‌شود. همانطور که در شکل 12 مشاهده می‌شود ضخامت لایه مرزی در ابتدای سرریز اوجی بدلیل اینکه در بالادست سرریز سرعت نزدیک شونده صفر نبوده و حالت مخزن وجود ندارد و جریان بصورت متلاطم به سرریز نزدیک می‌شود، صفر نیست.



شکل 12- روند توسعه لایه مرزی در طول تندآب

بوده و بصورت کاهشی است، ولی در مورد مدل 5 روند تغییرات نامنظم می‌باشد. در این مورد نیز جواب‌های مدل 3 و 4 نزدیک به هم می‌باشند.



شکل 11- تغییرات ویسکوزیته اغتشاش در طول کانال جانی بررسی لایه مرزی در تندآب: شکل 12 نشان‌دهنده روند تغییرات لایه مرزی در طول تندآب و سرریز اوجی ابتدای آن می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، محور y شامل نسبت بدون بعد ضخامت لایه مرزی نسبت به عمق جریان و محور x نشان‌دهنده نسبت بدون بعد فاصله از ابتدای سرریز اوجی نسبت به عرض سازه است. ضخامت لایه مرزی (Delta) فاصله

نتیجه‌گیری

- روند تغییرات پارامترهای اغتشاش در کانال جمع‌آوری برای مدل‌های 1 تا 4 مشابه بوده ولی برای مدل 5 اختلاف زیادی وجود دارد.

- نتایج حاصل از مدل‌های 3 و 4 برای پارامترهای اغتشاش بسیار نزدیک بهم بوده و این نمایانگر یکی بودن نتایج الگوریتم‌های فشار-سرعت SIMPLEC و PISO می‌باشد.

بررسی‌های انجام شده در تحقیق حاضر نتایج زیر را بدست داد:

- با توجه به تطابق مناسب نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی، می‌توان از مدل عددی Fluent در طراحی این نوع سرریزها بهره جست.

- در این تحقیق از بین مدل‌های $k-e$ ، مدل RNG برای پروفیل سطح آب با خطای نسبی متوسط 2/9% و مدل استاندارد برای فشار هیدرواستاتیکی با خطای متوسط نسبی 8/9% بهترین جواب را داشتند. خطای نسبی مدل‌های 2، 3 و 4 در برآورد فشار و عمق جریان نزدیک بهم بوده و با توجه به زمان محاسبات بیشتر برای مدل‌های 3 و 4 می‌توان از مدل 2 بجای آنها استفاده نمود.

تقدیر و تشکر

از دفتر فنی سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و بخش سازه‌های هیدرولیکی سازمان تحقیقات منابع آب بخصوص مهندس کرمی‌نژاد و مهندس خراسانی که در ارائه نتایج آزمایشگاهی این تحقیق همکاری صمیمانه نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

- بی‌نام، 1383. مدل هیدرولیکی سرریز سد و نیار. موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو، گزارش شماره C8202-PR.
- مهرابیان، مظفرعلی (ترجمه). 1386. دینامیک سیالات محاسباتی، اصول و کاربردها. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- Anderson A, Tannehill J and Pletcher R, 1997. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Taylor and Francis Publishers, London, UK.
- Anonymous, 2005. Fluent 6.2 User's Guide. Fluent Inc. Group.
- Cea L, Pena L, Puertas J, Vazquez-Cendon ME and Pena E, 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. J Hydr Engin, ASCE 133(2): 160-172.
- Chen HC, and Patel VC, 1998. Near-wall turbulence models for complex flows including separation. AIAA Journal 26(6): 641-648.
- Chen Q, Dai G and Liu H, 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway over flow. J Hydr Engin, ASCE 128(7): 683-688.
- Dargahi B, 2006. Experimental study and 3D numerical simulations for a free-overflow spillway. J Hydr Engin, ASCE 132(9): 899-907.

- Kim SE, and Choudhury D, 1995. A Near-wall treatment using wall functions sensitized to pressure gradient. ASME FED Separated and Complex Flows. ASME 217: 273-279.
- Puertas J, Pena L and Teijeiro T, 2004. An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. J Hydr Engin, ASCE 130(1): 10-23.
- Savage BM, Johnson MC and Members ASCE, 2001. Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study. J Hydr Engin, ASCE 127(8): 640-649.
- Ye M, Wu C, Chen Y and Zhou Q, 2006. Case study of an S-shaped spillway using physical and numerical models. J Hydr Engin, ASCE 132(9): 892-898.