

شبیه‌سازی دوبعدی جریان در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های آشفتگی

و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی

محمد مهدی معیری¹، علی حسین زاده دلیر²، فرزین سلماسی³، داود فرسادی زاده⁴ و سید علی اشرف صدرالدینی⁵

تاریخ دریافت: 88/10/20 تاریخ پذیرش: 90/08/21

¹ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

² استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^{3,4,5} دانشجویان گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه: Email: Ferzin.salmasi@gmail.com; Salmasi@tabrizu.ac.ir

چکیده

سرریزهای پلکانی به دلیل تاثیر قابل توجه آن بر استهلاك انرژی جریان و به جهت قابلیت تطبیق ساخت آن با تکنولوژی بتن غلطکی کوبیده دارای اهمیت زیادی هستند. در طراحی این سرریزها معمولاً از مدل فیزیکی استفاده می‌شود که مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد. اما توسعه کامپیوترهای با سرعت بالا راه را برای انجام فعالیت در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی هموار کرده است و با استفاده از آن می‌توان از صرف هزینه و زمان زیاد جلوگیری نمود. در این تحقیق از داده‌های فیزیکی جهت شبیه‌سازی جریان در سرریزهای پلکانی استفاده شده است. مدل محاسباتی مورد استفاده نیز مدل کامپیوتری FLUENT می‌باشد. رژیم‌های جریان رویه‌ای و بینابینی برای این سرریز مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مدل شده شامل عمق مشخصه (y_{90}) ، سرعت مشخصه (V_{90}) و سرعت جریان آب زلال و غلظت متوسط هوا بودند. مدل‌های جریان چند فازي حجم سیال (VOF)، اختلاط و اولرین و همچنین مدل‌های تلاطم $k-\epsilon$ به صورت دوبعدی و سه بعدی به همراه الگوریتم‌های حل همزمان فشار - سرعت Simple و PISO مورد استفاده قرار گرفت. از بین مدل‌های جریان چندفازی، مدل اختلاط و از بین مدل‌های تلاطم، مدل RNG $k-\epsilon$ بهترین جواب را داشتند. نتایج بدست آمده، برای رژیم رویه‌ای جهت برآورد پارامترهای طراحی با در نظر گرفتن اختلاط حباب هوا مناسب‌تر و برای رژیم جریان بینابینی ضعیف است.

واژه‌های کلیدی: سرریزهای پلکانی، مدل آشفتگی، مدل‌های جریان چندفازی، FLUENT.

2D Simulation of Flow over Stepped Spillways with Turbulent Models and Comparing the Results with Physical Model

MM Moayeri¹, A Hosseinzadeh Dalir², F Salmasi^{3*}, D Farsadizadeh⁴ and SA Sadraddini⁵

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

²-Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.

^{3, 4 & 5}- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding author: Email: Ferzin.salmasi@gmail.com; Salmasi@tabrizu.ac.ir

Abstract

Stepped spillways have significant importance for their indisputable effect on energy dissipation and for compatibility with roller compact concrete method in construction. In order to design these spillways, physical models are commonly used in spite of spending great time and cost. Progress of high speed computers, however, permits to utilize computational fluid dynamic (CFD) method and therefore diminishing time and cost. In this research, some physical results are used for simulation of flow on stepped spillways, by applying FLUENT CFD package. Skimming and transitional regimes are investigated for the spillway. The simulated parameters were characteristic depth (y_{90}), characteristic velocity (V_{90}), clear water velocity and mean air concentration. Multiphase models consisting of volume of fluid (VOF), mixture and Eulerian and also turbulence models of k- ϵ , also coupling pressure-velocity algorithms of PISO and Simple were used both two and three dimensionally. Mixture and RNG k- ϵ for multiphase and turbulence models totally produced satisfactory results. The results were good for evaluation of the hydraulic parameters considering air bubble entrainment in skimming regime and relatively poor for transitional regime.

Keywords: FLUENT, Multiphase flow models, Stepped spillways, Turbulent model.

روزافزون سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامپیوترها، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی راه‌حلی مطمئن و ارزان جهت شبیه‌سازی جریان‌های مختلف شده است که جریان روی سرریزها از جمله این جریان‌ها است. برای اینکه CFD ابزار طراحی قابل اعتمادتر و قابل قبول‌تری شود، مطالعات عددی باید با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داده شود. چرا که طراحی

مقدمه

میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بیشتر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد است، به کارگیری مناسب این سرریزها می‌تواند تاثیر زیادی بر کاهش ابعاد سازه، از قبیل کاهش عمق حفاری حوضچه آرامش پائین دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن داشته و باعث صرفه اقتصادی گردد (شمسایی و نونهال 1384). با پیشرفت

عددی بر اساس معادلات دو بعدی متوسط رینولدزی بود که سطح آب در آن با الگوریتم حجم سیال مدل شد. مدل آشفتگی مورد استفاده نوع RNG k-ε برای تخمین سرعت‌ها، فشارها، و نیروهای هیدرودینامیکی بر دیواره‌های آرام‌کننده و آب‌پایه‌ها بود.

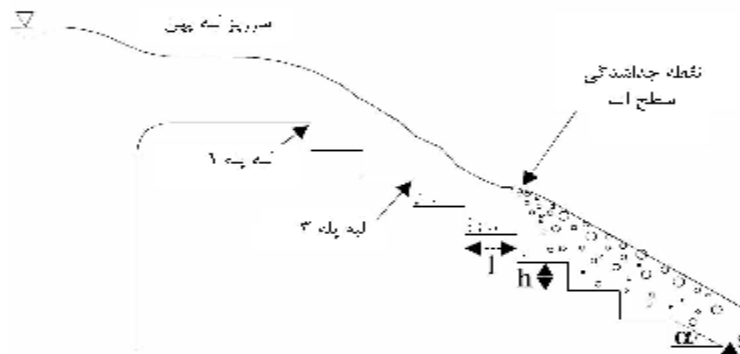
هدف از این تحقیق، بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی عمق مشخصه، سرعت مشخصه، سرعت جریان آب زلال و غلظت متوسط هوا در سرریزهای پلکانی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. برای این کار از اطلاعات حاصله از آزمایشات چانسون و تومبس (2001) استفاده شد. مدل CFD مورد استفاده نیز مدل کامپیوتری FLUENT می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایشات مدل فیزیکی مورد استفاده در این تحقیق، در دانشگاه کوئینزلند صورت گرفته است (چانسون و تومبس 2001). مطابق شکل 1 طول شوت 2/7 متر، عرض یک متر و شیب $21/8^\circ$ بود. سرریز شامل یک سرریز لبه پهن با عرض یک متر، طول 0/6 متر و گوشه گردشده در بالادست (شعاع 0/057 متر) همراه با 9 پله، طول افقی هر پله برابر 0/25 متر و ارتفاع هر پله برابر 0/1 متر از جنس تخته چندلا بود. شوت پله‌ای نیز با عرض 1 متر با دیوارهای جانبی از جنس پلکسی‌گلاس با کف افقی بتنی بود.

هیدرولیکی سرریزها یکی از کاربردهای جدید CFD است.

چن و همکاران (2002) از مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی عددی جریان متلاطم در سرریز پلکانی استفاده کردند. مدل آشفتگی k-ε برای شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار گرفت. شبکه نامنظم برای مرزهای غیر منظم به کار برده شد. سرعت‌ها و فشار بر روی سرریز پلکانی با مدل عددی به دست آمد. تکنیک حجم کنترل برای تبدیل معادلات حاکم به معادلات جبری که به صورت عددی قابل حل باشد، مورد استفاده قرار گرفت و از روش ضمنی استفاده شد. فضای محاسباتی به حجم کنترل‌های مجزا با شبکه غیرمنتظم تقسیم شد که انطباق‌پذیری زیادی مانند روش عناصر محدود با هندسه و مرز دارند. مطابق نتایج شبیه‌سازی روشن شد که گردابه‌ای در کنج هر پله اتفاق می‌افتد که می‌تواند مورد ارزیابی قرار گیرد. سرعت محاسبه شده در ورودی و انتهای سرریز می‌تواند برای محاسبه استهلاک انرژی سرریز به کار رود. کاروالیو و مارتینز (2009) پرش هیدرولیکی در سرریزهای پلکانی را به صورت تحلیلی، فیزیکی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از فرمول‌های کلاسیک پرش هیدرولیکی، نمونه اصلی را به صورت تئوری طراحی کردند. مدلی با مقیاس بزرگ (1/10) برای مطالعه آزمایشگاهی با دیواره‌های آرام‌کننده و آب‌پایه در هر پله جهت کاهش طول پرش ساختند. مدل



شکل 1- نمایی از مدل فیزیکی در تحقیقات چانسون و تومبس (2001)

$$C_{\text{mean}} = \frac{d}{1 - y_{90}} \quad [3]$$

$$d = \int_0^{y_{90}} (1 - C) dy \quad [4]$$

معرفی مدل فلوئنت

فلوئنت مدل شبیه‌سازی کامپیوتری برای تحلیل و حل مسائل طراحی کاربردی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مانند بقای جرم، مومنتم و انرژی است. مدل سه بعدی CFD فلوئنت، معادلات ناویراستوکس را به طور کامل بر اساس روش حجم محدود در ابعاد و اندازه‌های واقعی حل می‌کند (بی‌نام 2006). از مدل‌های چند فازی آن به مدل اویلر با مجموعه‌ای از معادلات سیالات برای انتشار آنها یا فازها در هم می‌توان اشاره کرد. مدل حجم سیال برای سطح آزاد جریان جهت پیش‌بینی پروفیل جریان مورد نظر فراهم شده است (شجاعی فرد و نور پور هشتروندی 1379).

شبکه‌بندی: ابتدا محدوده هندسی دو بعدی سازه مورد نظر به جهت سهولت کار با نرم‌افزار AutoCad2007 با توجه به ابعاد مدل فیزیکی ایجاد شد و پس از وارد کردن فایل آن به محیط Gambit، تغییراتی روی آن انجام شد تا محدوده هندسی مناسب مدل ایجاد شود. محدوده هندسی سازه به بلوک‌های زیادی تقسیم شد که تعداد این بلوک‌ها در مدل دوبعدی 61 عدد بود. روند تجزیه نمودن سازه بدین شکل بود که لبه پله‌ها به 5 بلوک همانند شکل 2 و 3 تقسیم شد. به این ترتیب مشکل شبکه‌بندی لبه پله‌ها تا حدود زیادی تعدیل گردید.

دبی جریان برای شبیه‌سازی با نرم افزار فلوئنت 0/182 مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که نوع رژیم جریان برای این دبی، جریان رویه‌ای است. در این نوع رژیم همان‌طوری که در شکل 1 دیده می‌شود، تمام پله‌ها زیر سطح آب مستغرق هستند. لازم به ذکر است که در دبی سیل، این رژیم برای اکثر سرریزهای پله‌ای عملاً اتفاق می‌افتد و لذا اکثر محققان روی این رژیم به پژوهش پرداخته‌اند. (شمسایی و نونهال 1384)

پارامترهای مقایسه شده بین مدل‌های عددی و فیزیکی y_{90} عمق مشخصه (بر حسب متر): عمقی است که در آن غلظت هوا 90 درصد می‌باشد. در نتایج پارامتر بی‌بعد y_{90}/d_c که در آن d_c عمق بحرانی (بر حسب متر) بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید، مورد استفاده قرار گرفته است. در این رابطه q دبی در واحد عرض و g شتاب ثقل زمین می‌باشند.

$$d_c = \sqrt[3]{q^2/g} \quad [1]$$

V_{90} سرعت مشخصه (بر حسب متر بر ثانیه): سرعت در جایی است که غلظت هوا 90 درصد می‌باشد. در نتایج پارامتر بی‌بعد V_{90}/V_c که در آن V_c سرعت بحرانی بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید، مورد استفاده قرار گرفته است.

$$V_c = \sqrt[3]{g \cdot q} \quad [2]$$

U_w سرعت جریان آب زلال (بر حسب متر بر ثانیه) که در آن $U_w = q_w/d$. C_{mean} غلظت متوسط هوا در راستای عمق است و از رابطه 3 بدست می‌آید.

d عمق مشخصه بر حسب متر است که از رابطه 4 بدست می‌آید. در نتایج، پارامتر بی‌بعد U_w/V_c مورد استفاده قرار گرفته است.

همان‌طور که گفته شد، جهت مستقل از شبکه کردن (یا یافتن تعداد بهینه شبکه)، الگوهای متفاوتی آزمایش شد. مشخصات بهترین شبکه‌ای که انتخاب شد در جدول 1 آمده است.

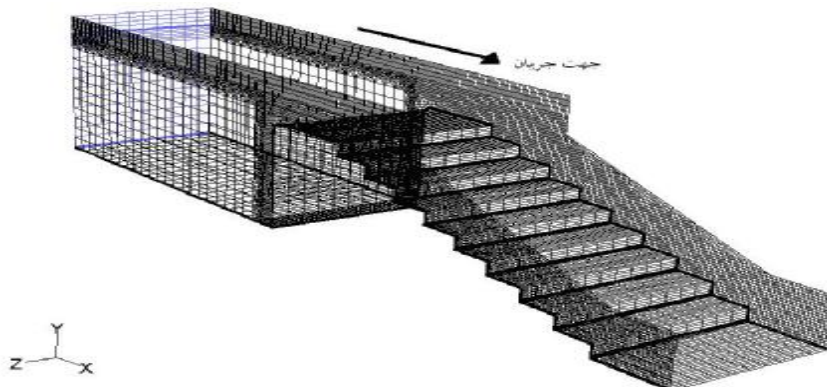
جدول 1- مشخصات بهترین شبکه

مدل دو بعدی	تعداد گره‌ها	تعداد وجوه	تعداد سلول‌ها
	20779	43339	20779

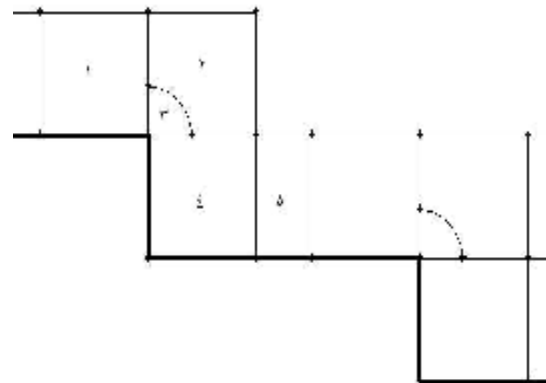
در انتها نوع مرزها در محیط گمبیت مشخص شد و فضای کار به عنوان فضای سیال تعریف گردید تا در مراحل بعد مشخصات دقیق‌تر آن در فلونت تعیین شود.

روند شبیه‌سازی در فلونت

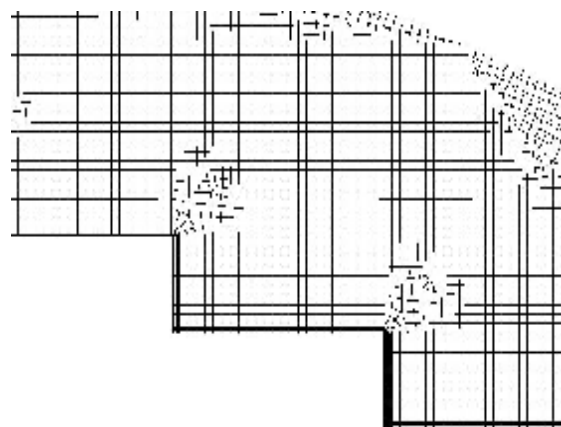
در ابتدای ورود به محیط فلونت، باید دوبعدی یا سه‌بعدی بودن مدل مورد نظر مشخص شود. در این تحقیق برای کلیه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، دقت مضاعف اعمال شد. دقت مضاعف، محاسبات را تا دقت بیشتری در ارقام اعشاری پارامترهای محاسباتی در گره‌ها انجام می‌دهد هرچند سرعت اجرای مدل را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. ولی با این وجود به دلیل حساسیت و خطای بالای مدل از این حالت استفاده گردید. در شکل 4 نمایی از فضای کاری وارد شده در محیط فلونت مشاهده می‌شود.



شکل 4- نمایی از شبکه‌بندی سه بعدی سرریز پلکانی



شکل 2- تقسیم سازه به بلوک‌ها در نزدیکی پله‌ها



شکل 3- قسمتی از شبکه‌بندی دو بعدی روی پله‌ها

شبکه لایه مرزی جهت کنترل رینولدز لایه مرزی (y^+ بین 30 تا 300) با مشخصات: ردیف اول شبکه لایه مرزی 0/001 متر، فاکتور رشد برابر 1/2 و تعداد شبکه‌های لایه مرزی برابر 8 استفاده شد.

مرزی فشار ورودی به دلیل شباهت آن با شرایط روباز بودن کانال در نظر گرفته می‌شود (چن و همکاران 2002)، اما از آنجا که تاثیر زیادی بر جریان ندارد در این تحقیق، در اکثر موارد شرط مرزی دیواره برای سقف (مانند درپوش برای سقف کانال) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است نوع مرز، مرز ثابت برای همه مرزهای دیوار در کلیه مدل‌ها انتخاب شد. از آنجا که در مدل‌های VOF امکانات اختصاصی برای مدل نمودن جریان در کانال‌های روباز موجود بود، برای شرایط مرزی ورودی دو حالت در نظر گرفته شد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

شرایط مرزی برای مدل‌های VOF به دلیل داشتن امکان مدل‌سازی جریان کانال‌های روباز، از یک مرز ورودی استفاده شد. دو نوع مرز ورودی برای حالت مدل‌سازی جریان کانال‌های روباز در مدل‌های VOF وجود دارد (هیرت و نیکلاس 1981): شرط مرزی فشار ورودی و شرط مرزی جرم ورودی جریان². در این تحقیق به دلیل معلوم بودن دبی ورودی، از شرط مرزی جرم ورودی جریان در حالت VOF استفاده شده است. در محیط فلوئنت، می‌توان با استفاده از VOF و شرط مرزی ورودی کانال روباز، سطح آزاد بین دو سیال را (سیال بالایی معمولاً اتمسفر) بخوبی مدل کرد. از آنجا که داده‌های سطح آب بالادست در اختیار نبود ابتدا با رابطه عمق بحرانی (رابطه 1) از روی دبی، عمق را محاسبه کرده و از روی آن انرژی مخصوص حداقل بدست می‌آید:

$$E_{\min} = 1.5 y_c \quad [5]$$

با اضافه کردن ارتفاع سرریز به انرژی مخصوص حداقل، ارتفاع آب بالادست تعیین گردید.

پارامتر دیگری که در شرط مرزی جرم ورودی جریان باید منظور شود، دبی جریان است که بر حسب کیلوگرم بر ثانیه داده می‌شود. در مدل‌های دیگر غیر از VOF، مرز ورودی به دو بخش تقسیم شد:

در بدو ورود شبکه به فلوئنت، شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. باید دقت نمود که حجم حداقل در این مرحله عددی مثبت گزارش شود. سپس مقیاس‌ها در مدل مورد نظر باید مشخص گردد که در این مدل مقیاس‌ها بر حسب متر تعیین شد. در مرحله بعد، ماندگار و غیرماندگار بودن جریان تعیین می‌شود که برای مدل مورد نظر در این تحقیق، حالت غیر ماندگار انتخاب می‌گردد که پس از اجرای مدل با توجه به شرایط مرزی و اولیه، پس از مدتی جریان به حالت ماندگار می‌رسد. سپس نوع رژیم جریان از لحاظ آرام یا آشفتگی بودن، تعیین می‌شود که با توجه به آشفتگی زیاد جریان در سرریزهای پلکانی، انواع مختلف مدل‌های آشفتگی انتخاب شد. در مرحله بعد، مدل جریان چند فازی باید انتخاب گردد که مدل‌های VOF، اختلاط مدل‌هایی هستند که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در حالت VOF که از الگوی صریح¹ با عدد کورانت 0/25 استفاده شد. هم از شرط شبیه‌سازی جریان در کانال‌های روباز و هم از نیروهای بدنه با روش ضمنی به دلیل تاثیر نیروهای ثقل و تنش‌های برشی، بهره گرفته شد. شرایط مرزی در کلیه مدل‌ها مشترک بود. شرط مرزی دیواره برای کف، جدار و سقف فلوم و شرط مرزی فشارخروجی صفر برای خروجی در نظر گرفته شد. برای شرط مرزی دیواره از آنجا که دیواره فلوم از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده، مقدار ارتفاع زبری مطلق 0/00001 متر و ارتفاع زبری مطلق برای شرط مرزی دیواره در کف کانال که از جنس تخته سه‌لا بود، 0/00005 متر و ارتفاع زبری مطلق برای شرط مرزی دیواره در سقف کانال صفر منظور گردید.

شرایط مرزی دیواره برای سقف به دلیل تاثیر بهتر در همگرایی و همچنین ارتفاع آزاد مناسب در نظر گرفته شد. هرچند در مراجع، معمولاً برای سقف فلوم، شرط

² Mass-flow inlet¹ Explicit scheme

در این رابطه، u_{avg} سرعت متوسط و I شدت آشفتگی می‌باشد. نرخ استهلاک آشفتگی ε در صورت معلوم بودن طول اختلاط l ، با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad [9]$$

در رابطه فوق، C_m ثابت تجربی است که برابر 0/09 در نظر گرفته می‌شود. طول اختلاط l ، با رابطه 10 بدست می‌آید:

$$l = 0.07 L \quad [10]$$

در این رابطه L ، طول مشخصه است که برابر قطر هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. برای کنترل راه حل و گسسته‌سازی، از دو روش Simple و PISO استفاده شده است که برای الگوریتم PISO تصحیح چولگی⁴ و تصحیح همسایگی⁵ برابر مقدار 2 قرار داده شده است. الگوریتم PISO امکان بالا بردن گام زمانی را برای جلوگیری از واگرایی می‌داد. هر چند این روش در جریان ناپایدار برای زوج کردن⁶ فشار- سرعت توصیه شده است. از روش Simple نیز استفاده نشد، زیرا در مدل‌های آزمایشی نتیجه مناسبی بدست نیامد. ضرایب تسریع همگرایی⁷ نیز در ابتدای حل کوچک‌تر از مقادیر پیش‌فرض آن‌ها در نظر گرفته شد و با جلو رفتن حل و پایداری بالاتر، این ضرایب به تدریج در حین حل افزایش داده می‌شد. گام زمانی بین 0/00005 تا 0/002 ثانیه برای مدل‌های مختلف در نظر گرفته شد. انتخاب گام زمانی بزرگ باعث واگرا شدن جواب‌ها می‌شود. گام زمانی کوچک نیز باعث طول کشیدن راه‌حل می‌گردد.

سرعت ورودی هوا و سرعت ورودی آب. سرعت ورودی هوا، مقدار صفر و سرعت ورودی آب بر حسب متر بر ثانیه، از روی دبی ورودی بدست آمد و قرار داده شد. در کلیه مدل‌ها، در مرز ورودی، شدت آشفتگی¹ و قطر هیدرولیکی محاسبه و به عنوان شرایط اولیه داده شد. شدت آشفتگی برابر میانگین مربعات نوسانات u' سرعت تقسیم بر سرعت متوسط جریان u_{avg} است. شدت آشفتگی زیر 1 درصد پایین و شدت آشفتگی بیشتر از 10 درصد بالا در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق شدت آشفتگی در محدوده 3-4 درصد بدست آمد. برای محاسبه شدت آشفتگی از رابطه تجربی زیر که در لوله‌ها کاربرد دارد، استفاده شد (بی- نام 2006):

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16 (Re_{D_H})^{-1/8} \quad [6]$$

در رابطه فوق، Re_{D_H} عدد رینولدز است که در این تحقیق از رابطه زیر استفاده گردید:

$$Re = \frac{4VR}{\nu} \quad [7]$$

در رابطه فوق R شعاع هیدرولیکی و u لزوجت سینماتیکی می‌باشند. قطر هیدرولیکی نیز چهار برابر شعاع هیدرولیکی در نظر گرفته شد.

حل معادلات را باید از مرز ورودی شروع نمود. در مرز ورودی باید برخی پارامترها داده شود. البته فلونتت بر اساس مرز ورودی، این پارامترها را محاسبه می‌نماید و یا می‌توان بر اساس روابط این پارامترها را قرار داد. فشار و سرعت ورودی سیال در مرز ورودی داده می‌شود. دیگر پارامترها، انرژی جنبشی آشفتگی² و نرخ استهلاک آشفتگی³ هستند. شدت آشفتگی k از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k = \frac{3}{2} u_{avg} I \quad [8]$$

⁴ Skew ness correction

⁵ Neighbors correction

⁶ Coupling

⁷ Under-relaxation

¹ Turbulence intensity

² Turbulent kinetic energy

³ Turbulent dissipation rate

معیار ارزیابی مدل‌ها

جهت بررسی و مقایسه مدل‌های عددی با مدل فیزیکی از شاخص میانگین خطای نسبی براساس رابطه زیر استفاده شد:

$$ARE = 100 * \frac{\sum \left(\text{abs} \left[\frac{N-E}{E} \right] \right)}{n} \quad [11]$$

در رابطه 11، N نتیجه مدل عددی، E نتیجه مدل فیزیکی و n تعداد کل داده‌ها می‌باشند.

مستقل از شبکه نمودن مدل

الگوهای مختلفی از شبکه‌بندی با الگوی ثابتی از مدل چندفازی اختلاط و مدل آشفتگی (k-ε RNG) مورد استفاده قرار گرفت که از نظر پارامتر غلظت متوسط هوا ارزیابی و مقایسه گردید. بهترین الگوی شبکه، برای حالت دو بعدی تعداد 8000، 20000 و 47000 المان مورد آزمون قرار داده شد که 20000 المان در نهایت به عنوان بهترین شبکه انتخاب گردید.

نتایج و بحث

در جدول 2 مشخصات مدل‌های مختلفی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند (7 مدل) با جزئیات آن آورده شده است. در ادامه نتایجی که از این مدل‌ها برای پارامترهای مختلف بدست آمده مورد بحث قرار گرفته است.

عمق مشخصه: شکل 5 خطای نسبی را برای پارامتر بی‌بعد y_{90} / y_c به ازای الگوهای مختلف نسبت به داده‌های حاصله از وسیله تک‌سوزنی¹ و دوسوزنی² (وسیله‌ای برای اندازه‌گیری غلظت حباب هوا) نشان می‌دهد. با توجه به شکل 2 مدل چند فازی حجم سیال به نسبت مدل اختلاط دارای خطای بالاتری بود. با توجه به این موضوع که مدل حجم سیال برای محاسبه سطح آزاد آب بیشتر به کار می‌رود و مرز بین دو فاز را

دقیق‌تر مشخص می‌سازد، بنابراین منطقی است که مدل چند فازی اختلاط در برآورد عمق مشخصه که محلی پایین‌تر از مرز بین آب و هواست نتیجه بهتری از مدل حجم سیال داشته باشد. بنابراین از بین مدل‌های چند فازی موجود در فلوئنت، مدل اختلاط به عنوان مناسب‌ترین الگو جهت محاسبه عمق مشخصه در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی در کلیه الگوها ملاحظه می‌شود که نتایج مدل عددی با نتایج تک سوزنی در آزمایشگاه هم‌خوانی بیشتری نسبت به دوسوزنی دارد. همچنین در کلیه الگوها مقادیر بدست آمده حاصل از مدل عددی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی می‌باشند.

برای محاسبه عمق مشخصه مدل استاندارد k-ε جواب بهتری نسبت به بقیه مدل‌ها داشت. از بین روندهای حل نیز روش Quick کمی بهتر از روش مرتبه دوم پیش رونده بود ولی حجم محاسبات را افزایش می‌داد. به همین دلیل در کلیه مدل‌ها برای محاسبه پارامتر نسبت پوکی³ به دلیل اهمیت زیاد این پارامتر و تاثیر به‌سزای آن بر پارامترهای بدست آمده، از روش Quick استفاده شد و بقیه پارامترها اگر در همگرایی مشکلی وجود نداشت با روش Quick و اگر در همگرایی تاثیر منفی داشت با روش مرتبه دوم پیش رونده خصوصاً برای پارامتر ε محاسبه شد. از بین الگوریتم‌های حل هم زمان فشار- سرعت PISO و Simple برای تعیین عمق مشخصه جواب‌های نزدیک به هم داشتند اما روش Simple تاثیر بهتری داشت و دارای خطای کمتری بود. الگوریتم Simple دارای زمان محاسبات کمتر می‌باشد ولی الگوریتم PISO احتیاج به تعداد تکرار کمتری برای همگرا شدن در هر گام زمانی دارد. بنابراین الگوریتم Simple جهت محاسبه عمق مشخصه به الگوریتم PISO ترجیح داده می‌شود.

سرعت مشخصه و سرعت جریان آب زلال

در شکل 6 خطای نسبی در برآورد V_{90}/V_c بین الگوهای مختلف برای حالت دوبعدی ملاحظه می‌شود، مدل اختلاط در بین مدل‌های چندفازی بهترین جواب را

¹ Single tip

² Double tip

³ Void fraction

در شکل 7 خطای نسبی در برآورد U_w/V_c بین الگوهای مختلف برای حالت دوبعدی آمده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل حجم سیال، ظاهراً جواب‌های بسیار خوبی را می‌دهد اما از آنجا که d کاملاً وابسته به توزیع C در یک مقطع است و نتایج ضعیفی که مدل حجم سیال با توجه به ماهیت آن برای C ارائه می‌کند، قابل اعتماد نمی‌باشد. مدل اختلاط خطای بیشتری نسبت به مدل حجم سیال دارد ولی با این وجود قابل اعتمادتر است. با مقایسه حالت تک سوزنی و دو سوزنی ملاحظه می‌شود که در حالت دو سوزنی که دقیق‌تر می‌باشند، مدل‌های اختلاط جواب بهتری را ارائه می‌دهند.

با خطای نسبی $7/47$ درصد برای V_{90} می‌دهد. مدل حجم سیال نیز بر خلاف محاسبه y_{90} جواب‌های مناسبی برای محاسبه سرعت دارد که می‌توان به عنوان یک مدل چندفازی مناسب در محاسبه V_{90} بکار رود. در بین مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ مدل‌های استاندارد و Realizable نتایج بهتری به نسبت مدل RNG داشتند که در مورد مدل استاندارد باز هم می‌توان بر اساس وابستگی V_{90} به y_{90} آن را توجیه نمود. از بین الگوریتم‌های حل هم‌زمان فشار-سرعت PISO و Simple روش Simple جواب بهتری به نسبت روش PISO داشت.

جدول 2- جزئیات مدل‌های دو بعدی اجرا شده برای یافتن بهترین مدل

T.D.D.S ¹	T.K.D.S ²	V.D.S ³	M.D.S ⁴	P.D.S ⁵	P.V.C ⁶	N.M.F ⁷	T.M ⁸	M.M ⁹	C.E.D.M ¹⁰	Model Number
S.O.U	S.O.U	Geo Reconstruct	S.O.U ¹¹	PRESTO!	Simple	S.W.F	k-e/RNG	VOF	1 st -order implicit	1
Quick	Quick	Geo Reconstruct	Quick	PRESTO!	Simple	S.W.F	k-e/RNG	VOF	1 st -order implicit	2
Quick	Quick	Geo Reconstruct	Quick	PRESTO!	Simple	S.W.F	k-e/RNG	Mixture	1 st -order implicit	3
Quick	Quick	Geo Reconstruct	Quick	PRESTO!	PISO	N.E.W.F	k-e/realizable	Mixture	1 st -order implicit	4
Quick	Quick	Geo Reconstruct	Quick	PRESTO!	PISO	N.E.W.F	k-e/RNG	Mixture	1 st -order implicit	5
Quick	Quick	Geo Reconstruct	Quick	PRESTO!	PISO	N.E.W.F	k-e/Std	Mixture	1 st -order implicit	6
Quick	Quick	Geo Reconstruct	Quick	PRESTO!	PISO	S.W.F	k- ω	Mixture	1 st -order implicit	7

¹ Turbulent dissipation rate discretization scheme

² Turbulent kinetic energy discretization scheme

³ Volume fraction discretization scheme

⁴ Momentum discretization scheme

⁵ Pressure discretization scheme

⁶ Pressure-velocity coupling

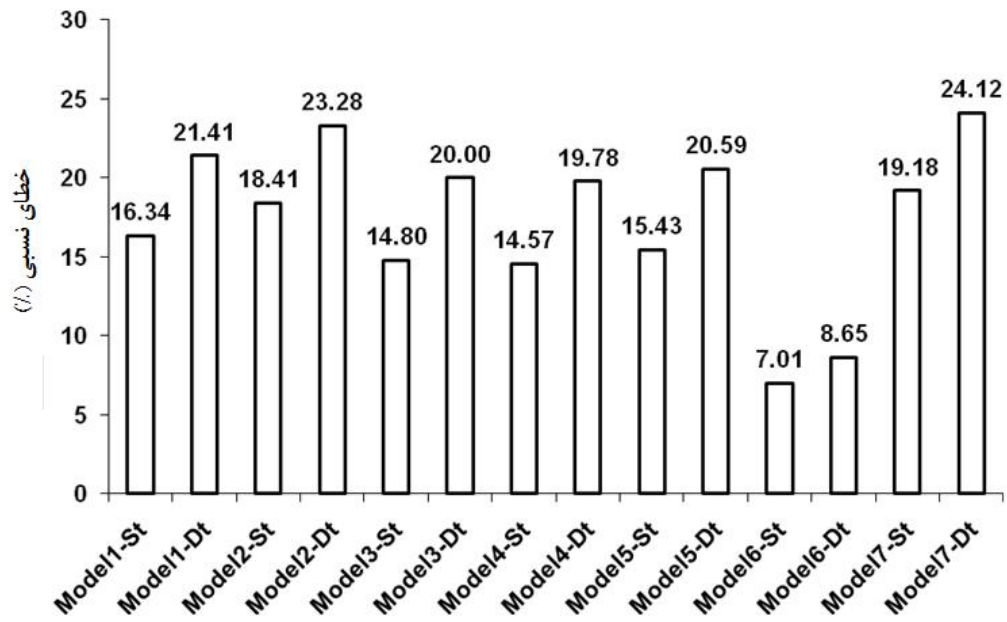
⁷ Near wall function

⁸ Turbulence model

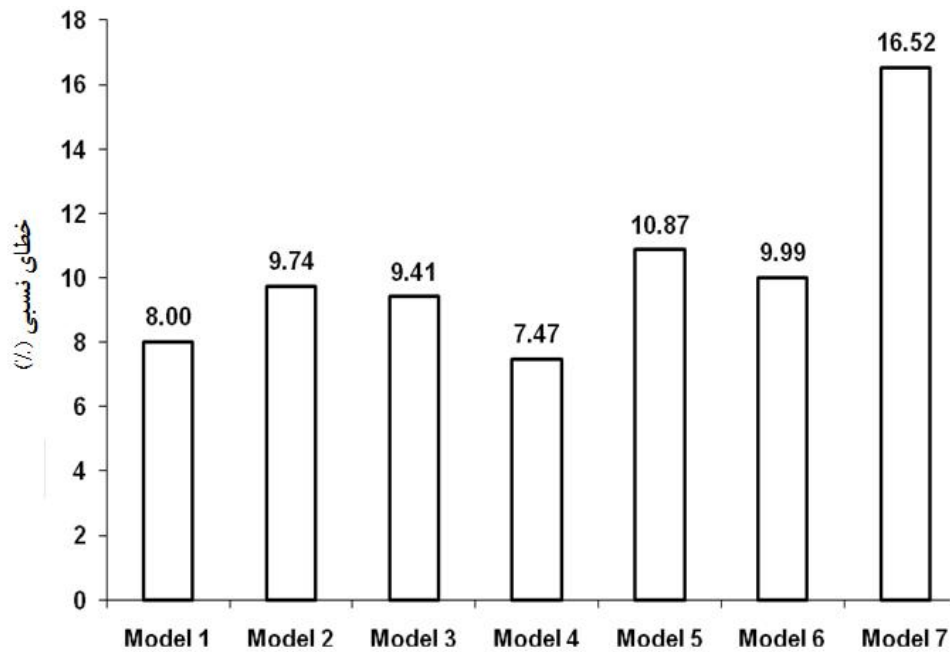
⁹ Multiphase model

¹⁰ Conservation equation discretization method

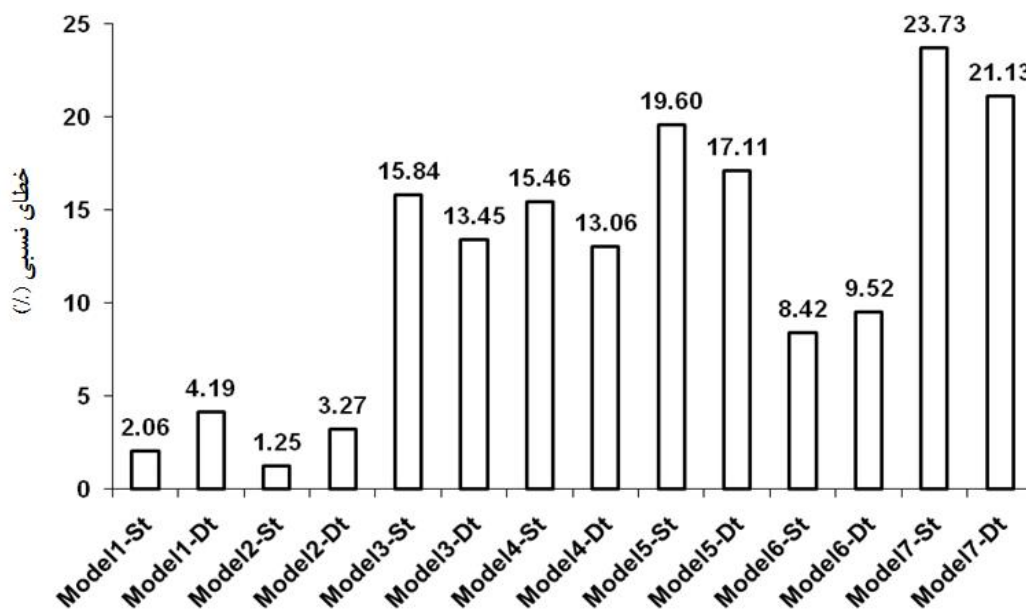
¹¹ Second-order upwind



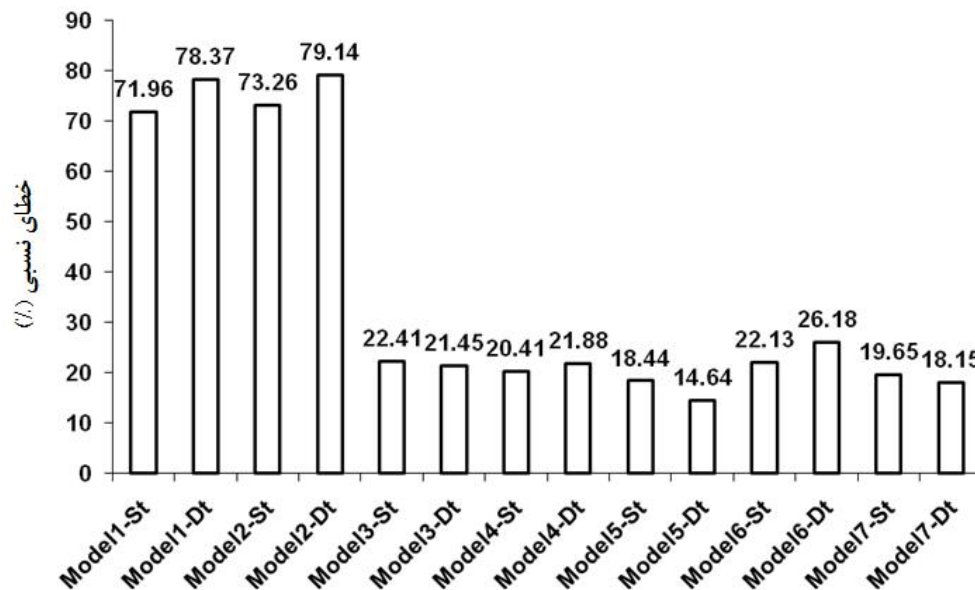
شکل 5- نمودار مقایسه خطای نسبی در برآورد V_{90}/y_c بین الگوهای مختلف



شکل 6- نمودار مقایسه خطای نسبی در برآورد V_{90}/V_c بین الگوهای مختلف برای حالت دوبعدی



شکل 7- نمودار مقایسه خطای نسبی در برآورد U_w/V_c بین الگوهای مختلف برای حالت دوبعدی



شکل 8- نمودار مقایسه خطای نسبی در برآورد C_{mean} بین الگوهای مختلف برای حالت دوبعدی

غلظت متوسط هوا

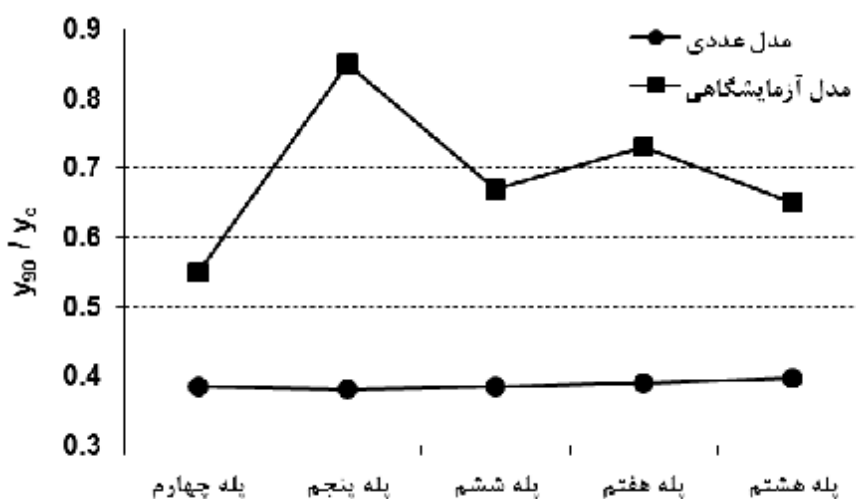
بسیار بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده آن در آزمایشگاه و همچنین روابط محققین مختلف بود. در حالی که در مورد مدل حجم سیال نیز که خطاها نسبتاً بالا بود، قضیه برعکس بود و مقادیر C_{mean} محاسباتی بسیار کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی آن بود.

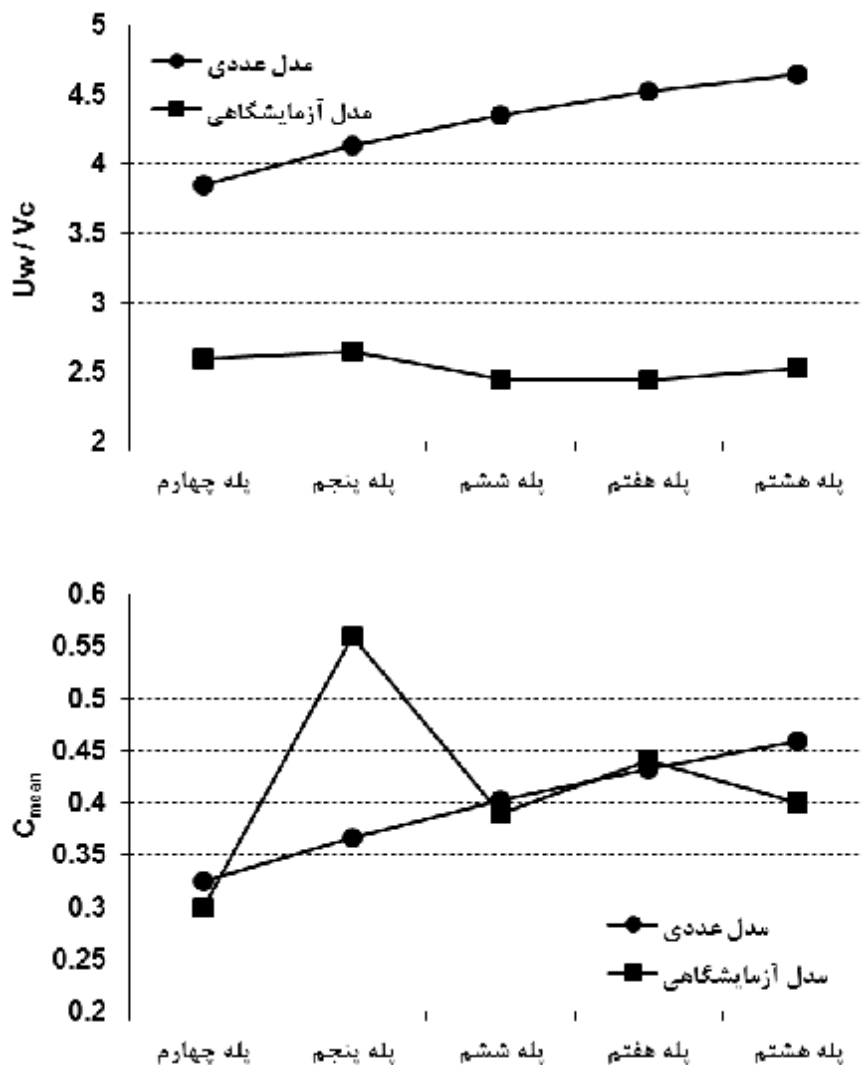
مقدار خطای نسبی برای محاسبه C_{mean} در شکل 8 ملاحظه می‌شود. مقایسه مدل‌های حجم سیال و اختلاط روی پله‌های 6، 7 و 8 صورت گرفته و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل چند فاز اولرین، دارای خطای زیادی در محاسبه C_{mean} بود. مقادیری از این پارامتر که با استفاده از مدل اولرین بدست می‌آید

همگی موارد، رژیم رویه‌ای است. برای خلاصه‌تر شدن مطالب، در شکل 9 فقط نتایج برای دبی 0/164 مترمکعب بر ثانیه ارائه می‌گردد. مطابق نتایج حاصله، در حالت رویه‌ای هرچه دبی جریان بالاتر باشد، پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه روند ثابت‌تری را از خود نشان می‌دهند که هرچه به جریان بینابینی نزدیک شویم نوسانات در پارامترها شدیدتر می‌شود. دلیل روند ثابت در دبی‌های بالاتر این است که اندازه‌گیری‌ها بعد از نقطه جدشدگی صورت گرفته که جریان در این ناحیه تعادل یافته یکنواخت می‌گردد. روند تغییرات پارامترها روی پله‌های مختلف برای نتایج حاصل از مدل عددی روند ثابت خود را حتی با کاهش دبی حفظ می‌کند و نوساناتی که برای حالت نزدیک به رژیم بینابینی ذکر شد چشم پوشی شده است و قادر به شبیه‌سازی این روند نیست. اما مقادیر میانگین پارامترها که در طراحی‌ها به کار می‌رود در حالت عددی نسبتاً به مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نزدیک می‌باشد.

همان‌طور که از شکل 8 ملاحظه می‌شود، از آنجا که مدل‌های شماره 3 تا 7 همگی از نظر چندفازی اختلاط هستند، مدل اختلاط نتایج بسیار منطقی‌تری از دو مدل دیگر (حجم سیال و اولرین) جهت محاسبه این پارامتر نتیجه داد که با توجه به اینکه دیگر پارامترها اعم از عمق، سرعت و فشار نیز وابسته به میزان اختلاط آب و هوا در جریان هوادهی شده در سرریز پلکانی هستند، بنابراین می‌توان این موضوع را تعمیم داده و مدل اختلاط را به عنوان مدل بهینه چندفازی جهت شبیه‌سازی جریان در سرریزهای پلکانی در نظر گرفت. اما از بین مدل‌های آشفتگی بهترین مدل، $k-\varepsilon$ از نوع RNG بود که با توجه به ماهیت جریان چرخشی موجود در پله‌ها این موضوع کاملاً قابل توجیه است. در مقایسه الگوریتم تصحیح سرعت - فشار PISO و Simple الگوریتم PISO برخلاف دیگر پارامترها نتیجه بهتری داشت.

بررسی دبی‌های مختلف مدل شده با الگوی بهینه پارامترهای مدل شده در این تحقیق، به ازای چهار دبی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. رژیم جریان در





شکل 9- مقایسه پارامتر U_w/V_c و C_{mean} به ازای دبی جریان 0/164 متر مکعب بر ثانیه

از بین مدل‌های جریان چندفازی، مدل اختلاط بهترین جواب را به‌طور کلی به نسبت مدل‌های حجم سیال و اولرین برای مدل‌سازی جریان در سرریزهای پلکانی از خود نشان داد.

از بین مدل‌های تلاطم $k-\epsilon$ ، مدل RNG به نسبت انواع دیگر مدل‌های تلاطم دیگر، نتایج بهتری را با توجه به در نظر گرفتن پارامترهای جریان چرخشی در این مدل، از خود نشان داد.

نتیجه‌گیری کلی

مدل فلوئنت به منظور تخمین پارامترهای طراحی برای نوع رژیم جریان رویه‌ای در سرریزهای پلکانی مناسب است و در مدل‌سازی پارامترهای اختلاط آب و هوا در این نوع رژیم از نتایج نسبتاً قابل قبولی برخوردار بود. رژیم‌های دیگر جریان حالت بینابینی و ریزشی، نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی با نتایج حاصل از فلوئنت تطابق مناسبی را نشان نداد.

با توجه به طبیعت پیچیده جریان از روی سرریز پلکانی، موضوع وجود خطا در اندازه‌گیری پارامترهای غلظت حباب هوا، سرعت جریان و فشار نیز مردود نبوده و لذا در آینده مقایسه نتایج مدل فلوئنت با داده‌های آزمایشگاهی سایر محققین نیز مفید خواهد بود.

منابع مورد استفاده

شجاعی فرد م و نورپور هشترودی ع، 1379. مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی (ترجمه). انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

شمسایی ا و نونهال ف، 1384. هیدرولیک شوت‌ها و سرریزهای پلکانی (ترجمه). انتشارات مؤسسه علمی دانشگاه صنعتی شریف.

Anonymous, 2006. Fluent 6.2 User's Guide. Fluent Inc group. Salt Lake City, Utah, US.

Carvalho RF and Martins R, 2009. Stepped spillway with hydraulic jumps: Application of a numerical model to a scale model of a conceptual prototype. J Hydraul Eng ASCE 135(7):615-619.

Chanson H and Toombes L, 2001. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. Application to embankment overflow stepped spillways. 74 pp. Research Report No. CE158, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.

Chen Q, Dai G and Liu H, 2002. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway over flow. J Hydraul Eng ASCE 128(7):683-688.

Hirt CW and Nichols BD, 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J Computer Phys 39:201-225.