

شبیه‌سازی عددی میدان جریان در حوضچه آرامش USBR VI با نرم‌افزار Flow3D

احسان بهنام طلب^{1*}، مسعود قدسیان²، امیررضا زراتی³، علی‌اکبر صالحی نیشابوری⁴

تاریخ دریافت: 1396/2/3 تاریخ پذیرش: 1396/5/10

چکیده

یکی از مستهلک‌کننده‌های انرژی رایج، حوضچه آرامش USBR VI است. این حوضچه از قدیمی‌ترین حوضچه‌هایی است که برای استهلاک انرژی جریان خروجی از لوله طراحی شده است. این حوضچه، سازه‌ای جعبه‌ای شکل به همراه یک دیوار میانی و یک آستانه انتهایی است. دیوار میانی طوری تعبیه شده است که انرژی جریان ورودی را در عرض حوضچه توزیع کند. یکی از مشخصه‌های مفید این حوضچه این است که نیازی به عمق پایاب برای استهلاک انرژی ندارد. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Flow3D مشخصات کیفی و کمی میدان جریان مورد بررسی قرار گرفت. مدل عددی موردنظر کاملاً مطابق با مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس توسط مولفین است. در این مدل، عرض حوضچه و کانال پایین‌دست ثابت هستند و برای بررسی اثر پارامتر W/D_e (عرض حوضچه و D_e عمق معادل جریان ورودی) از سه لوله ورودی به حوضچه با قطرهای مختلف استفاده گردید. با استفاده از تحلیل ابعادی و نیز به کمک تحقیقات پیشین مشخص گردید که این پارامتر بدون بعد، پارامتر بسیار مهم و تاثیرگذاری در میدان جریان حوضچه آرامش USBR VI است. صحت‌سنجی مدل عددی با مقایسه فشار برداشت شده بر روی دیوار میانی و عمق جریان روی آستانه انتهایی در مدل فیزیکی و نیز مقایسه پروفیل سرعت توسعه یافته در لوله ورودی به حوضچه انجام گرفت. بررسی میدان جریان نشان داد در طول حوضچه و روی آستانه خروجی، توزیع دبی در عرض حوضچه غیریکنواخت و در کناره‌های آن بیش‌تر است. همچنین میزان پخش و استهلاک سرعت جت ورودی به حوضچه تابعی از W/D_e است. اندرکنش جت ورودی که به سمت پایین‌دست در حرکت است و جریان‌هایی که به سمت بالادست و در خلاف جهت جریان ورودی در حرکت هستند باعث می‌شود که پدیده پخش جت با سرعت بیش‌تری رخ دهد. در نسبت‌های W/D_e پایین‌تر، این پدیده با شدت کم‌تری رخ می‌دهد. همچنین بررسی جریان روی آستانه انتهایی نشان داد که با افزایش نسبت W/D_e توزیع جریان روی آستانه خروجی، غیریکنواخت‌تر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، حوضچه آرامش USBR VI، مدل‌سازی عددی، Flow3D

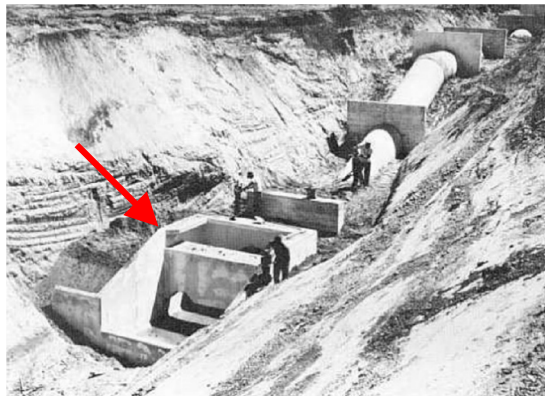
مقدمه

حوضچه یک دیوار در میانه حوضچه تعبیه شده است تا انرژی جریان در اثر برخورد به آن کاهش یابد. این حوضچه به دلیل مشخصات خاص خود از جمله عدم نیاز به عمق پایاب و جاگیری کم می‌تواند در سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد. البته عملکرد این حوضچه با وجود پایاب، بهتر خواهد شد. نمونه‌ای از حوضچه آرامش USBR VI که در پروژه انتقال آب استفاده شده، در شکل 1 ارائه شده است (Aisenbrey., 1978).

از جمله محدودیت‌های این نوع حوضچه، محدوده عدد فرود و سرعت ورودی به آن است. محدوده عدد فرود ورودی، بین 1 تا 10 و حداکثر سرعت ورودی $15/24$ متر بر ثانیه گزارش شده است (Beichley., 1978). از جمله کاربردهای این نوع حوضچه در پروژه‌های آبیاری و زهکشی و همچنین شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی است که دبی و عدد فرود ورودی معمولاً کم است.

حوضچه‌های آرامش معمولاً در خروجی کانال‌ها، شوت‌ها و کالورت‌ها¹ قرار داده می‌شوند تا انرژی جنبشی جریان را مستهلک کنند. در بین انواع حوضچه‌های آرامش، در حوضچه‌های انرژی ضربه‌ای با استفاده از برخورد جریان به یک مانع، استهلاک انرژی انجام می‌گیرد. حوضچه آرامش USBR VI حوضچه‌ای است که در آن استهلاک انرژی با استفاده از پدیده ضربه صورت می‌گیرد. در این

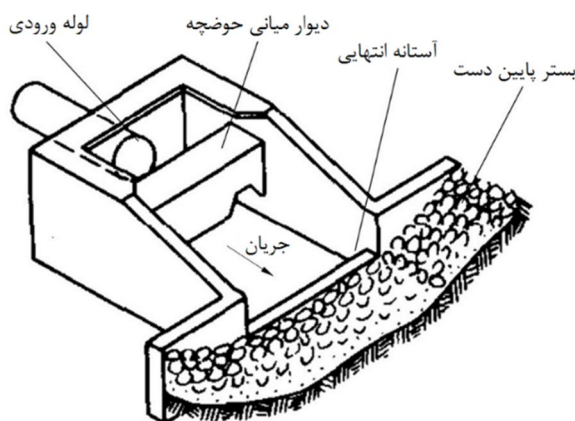
- 1- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری
 - 2- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران
 - 3- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر تهران
 - 4- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس تهران
- * - نویسنده مسئول: (Email: e.behnamtalab@hsu.ac.ir)



شکل 1- حوضچه آرامش USBR VI در انتهای لوله انتقال آب (Aisenbrey., 1978)

برمی‌گرداند. انرژی جریان ورودی با برخورد به دیوار و همچنین به وسیله گردابه‌های تشکیل شده پس از برخورد، مستهلک می‌شود. به علاوه جریان برگشتی، که توسط بخش افقی دیوار میانی ایجاد می‌شود، به جریان ورودی برخورد کرده و استهلاک بیشتری از جریان ورودی را سبب می‌شود.

مطابق شکل 2 این حوضچه، سازه جعبه‌ای شکل به همراه یک دیوار میانی و یک آستانه انتهایی است. دیوار میانی دارای دو بخش قائم و افقی است. بخش قائم آن، روبروی جریان ورودی قرار می‌گیرد و دارای یک فاصله مشخص از کف حوضچه است تا جریان ورودی بتواند از زیر آن به سمت پایین دست تخلیه شود. بخش افقی آن نیز، جریان ورودی را که به سمت بالا حرکت می‌کند به داخل حوضچه



شکل 2- مشخصات کلی حوضچه آرامش USBR VI

رفتن جریان آب از دیوارهای کناری حوضچه، ناکافی بودن اندازه سنگ‌چین در پایین دست حوضچه و ... را اصلاح نمود (Beichley., 1978). بیچلی برای طراحی حوضچه آرامش USBR VI نموداری بدون بعد ارائه نمود که در آن با مشخص بودن عدد فرود جریان ورودی، Fr_0 ، نسبت W/D_e محاسبه می‌شود که W عرض حوضچه و D_e عمق معادل جریان ورودی است. برای محاسبه عدد فرود جریان ورودی، ابتدا باید عمق معادل جریان ورودی مطابق رابطه 1 مشخص شود (Beichley., 1978).

$$D_e = \sqrt{A} = \sqrt{Q_0/u_0} \quad (1)$$

که در آن A سطح مقطع جریان ورودی به حوضچه، Q_0 دبی

اولین بار این حوضچه در سال 1955 معرفی شد (Bradley and Peterka., 1955). مدل‌هایی که آن‌ها برای توسعه این حوضچه بررسی کردند شامل دو حوضچه با عرض‌های 50 و 60 سانتی‌متر (1/6 و 2 فوت) و قطر لوله ورودی 16 سانتی‌متر (6/375 اینچ) بود. آزمایشات گسترده‌ای با استفاده از این مدل‌ها برای بررسی کارایی این حوضچه انجام گرفت. بعد از آن‌ها بیچلی به بررسی مدل‌های مختلفی از این حوضچه پرداخت. وی مشکلات بوجود آمده در حوضچه‌های ساخته شده در پروژه‌های متعدد USBR که براساس گزارشات قبلی طراحی شده بودند را بررسی کرد و براساس این مشکلات، برخی از معایب این حوضچه شامل جمع شدن آشغال در کف حوضچه، بیرون

دست آن، می‌تواند مکانیسم‌های اتلاف انرژی جریان داخل حوضچه و نیز آبستتگی در پایین دست آن را مشخص نماید هدف این تحقیق شناخت الگوی جریان داخل حوضچه و نیز در پایین دست آن تعریف شده است. یکی از مشکلات موجود برای بررسی میدان جریان در این نوع حوضچه این است که به دلیل تلاطم بالای جریان و وجود حباب هوا در مدل فیزیکی، امکان برداشت دقیق مقادیر سرعت با استفاده از سرعت‌سنج‌های موجود نیست. بنابراین در این تحقیق میدان جریان در حوضچه آرامش USBR VI و پایین دست آن از طریق مدل عددی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا تعدادی آزمایش انجام و سپس مدل عددی مطابق با مدل فیزیکی این حوضچه ایجاد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردید. در ادامه نحوه استهلاک جریان ورودی، میدان سرعت خروجی از حوضچه، نحوه پخش جت داخل حوضچه، توزیع فشار در بدنه حوضچه و مشخصات میدان جریان در پایین دست حوضچه مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق تعدادی آزمایش به منظور اندازه‌گیری و بررسی فشار روی دیوار قائم و نیز عمق آب روی آستانه انتهایی در نسبت‌های مختلف W/D_e به منظور صحت‌سنجی مدل عددی انجام گرفت. افزایش نسبت W/D_e نشان‌دهنده کوچک‌تر شدن سطح جریان ورودی نسبت به عرض حوضچه است. با افزایش این نسبت، سرعت جریان ورودی و در نتیجه عدد فرود جریان ورودی افزایش خواهد یافت. مدل فیزیکی و نمای برش خورده در شکل 3 نشان داده شده است.

لوله ورودی به حوضچه شامل قطرهای 5، 8 و 12 سانتی‌متر، عرض حوضچه آرامش 45 سانتی‌متر و عرض کانال پایین دست نیز 80 سانتی‌متر بود. با توجه به قطرهای مختلف لوله ورودی و عرض حوضچه، آزمایشات شامل سه نسبت مختلف W/D_e به اندازه 4/23، 6/35 و 10/16 بود. با توجه به اینکه کانال موجود در آزمایشگاه دارای عرض 80 سانتی‌متر بود، عرض حوضچه طوری در نظر گرفته شد تا نسبت عرض کانال پایین دست به عرض حوضچه در این تحقیق برابر با همین نسبت در تحقیق بیچلی باشد (Beichley., 1978). همچنین طول لوله‌های ورودی به حوضچه مطابق با واقعیت جریان توسعه یافته در نظر گرفته شد. بقیه مشخصات حوضچه نیز مطابق طرح ارائه شده توسط بیچلی براساس عرض 45 سانتی‌متری آن محاسبه شد (Beichley., 1978). مشخصات آزمایشات انجام شده به منظور صحت‌سنجی مدل عددی در جدول 1 ارائه شده است.

ورودی به حوضچه و u_0 سرعت متوسط جریان ورودی است. بنابراین عدد فرود جریان ورودی با استفاده از رابطه 2 محاسبه خواهد شد (Beichley., 1978).

$$Fr_o = \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_e}} \quad (2)$$

ورما و گوئل به بررسی آبستتگی در پایین دست حوضچه آرامش USBR VI با کمک مدل فیزیکی برای اعداد فرود 1/7 تا 5/5 پرداختند. آن‌ها متغیرهایی نظیر شکل آستانه انتهایی، طول حوضچه آرامش، عمق پایاب، شکل بلوک جداکننده و فاصله زیر دیوار قائم تا کف حوضچه را ارزیابی و در نهایت مدلی از این حوضچه آرامش با مشخصات جدید ارائه کردند (Verma and Goel., 2000). در ادامه، ورما و گوئل بخش‌های دیگری از حوضچه آرامش USBR VI را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد آستانه انتهایی با شیب 1 به 2 بهترین عملکرد را در مقایسه با شکل‌های دیگر آستانه انتهایی دارد (Verma and Goel., 2003).

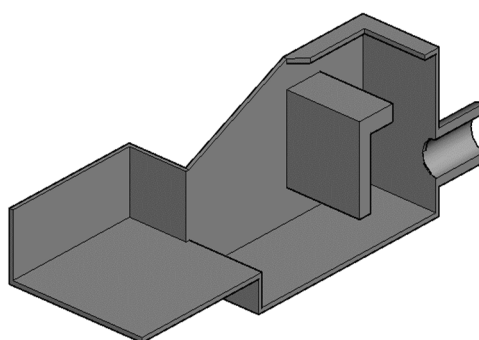
تیواری در تحقیقی آزمایشگاهی به بررسی حوضچه آرامش USBR VI پرداخت و نشان داد ابعاد و محل دیوار میانی به طور قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد حوضچه به دلیل تغییر الگوی جریان تاثیرگذار است (Tiwari., 2013a). در تحقیقی دیگر تیواری اثر فاصله زیر دیوار میانی تا کف حوضچه بر عملکرد حوضچه را بررسی نمود. از نتایج آزمایش‌های او مشخص شد اگر فاصله زیر دیوار قائم تا کف حوضچه برابر D (D: قطر لوله ورودی) باشد حوضچه بهترین عملکرد را دارد (Tiwari., 2013b). این نتیجه در حالی ارائه شده است که ورما و گوئل فاصله بهینه و مناسب دیوار قائم تا کف حوضچه را $0.75D$ گزارش نمودند (Verma and Goel., 2003). تیواری و گوئل در ادامه تحقیقات قبلی اثر شکل‌های مختلف آستانه انتهایی از قبیل مثلثی، دوزنقه‌ای، مربعی و مستطیلی بر عملکرد این نوع حوضچه را بررسی کردند (Tiwari and Goel., 2014).

آل‌یاسین و همکاران در تحقیقی آزمایشگاهی بر روی حوضچه آرامش USBR VI با سه عدد فرود 3/26، 4 و 6 استهلاک انرژی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج برداشت‌های سرعت نشان داد که دیوار حفره‌دار باعث کاهش سرعت‌های عرضی و سرعت در نزدیکی کف کانال پایین دست شده است. آن‌ها نشان دادند که با بکار بردن جداکننده داخل حوضچه آرامش می‌توان سرعت در راستای طولی در نزدیکی بستر را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد (Aleyasin., 2015).

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد برخلاف دیگر حوضچه‌های آرامش، مطالعات محدودی برای شناخت الگوی جریان در حوضچه آرامش USBR VI در سال‌های گذشته انجام گرفته است. با توجه به اینکه شناخت الگوی جریان داخل حوضچه و پایین -



الف) مدل فیزیکی



ب) حوضچه برش خورده شماتیک

شکل 3- مدل فیزیکی و شکل شماتیک حوضچه آرامش USBR VI

جدول 1- مشخصات آزمایشات در مدل فیزیکی

نام آزمایش	D (cm)	De (cm)	Q _o (litre/s)	u _o (m/s)	Fr _o
A	12	10/63	23	2/03	1/99
B	8	7/09	17	3/38	4/06
C	5	4/43	12	6/11	9/27

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x} + v \frac{\partial u_i}{\partial y} + w \frac{\partial u_i}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial g}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

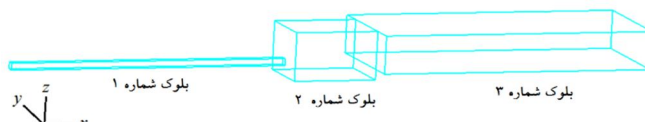
در این روابط ρ چگالی سیال، u ، v و w به ترتیب سرعت در جهات اصلی، p فشار، g شتاب ثقل و μ ویسکوزیته دینامیکی است. این نرم‌افزار دارای مدل‌های آشفتگی مختلفی است. نرم‌افزار Flow3D برای تشخیص سطح آب از روش حجم سیال² استفاده می‌کند. در این روش برای سلول‌های سطح جریان، که به صورت نیمه‌پر

فشار در بدنه حوضچه آرامش با استفاده از سنسورهای فشار لحظه‌ای و دستگاه برداشت داده با فرکانس 100 هرتز و مدت زمان 150 ثانیه برداشت گردید. مشخصات برداشت داده شامل فرکانس و زمان نمونه‌برداری با استفاده از آزمایش‌هایی مجزا محاسبه شد. مدل‌سازی عددی حوضچه آرامش USBR VI با استفاده از نرم‌افزار Flow3D انجام گرفت. این نرم‌افزار از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که بدلیل تولید آسان و نظم مناسب، به کم‌ترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. قوانین حاکم بر جریان یک سیال تراکم‌ناپذیر و لزج توسط معادله پیوستگی و معادله ناویراستوکس¹ به شکل زیر بیان می‌شوند (Flow3D Manual., 2008).

2- Volume of Fluid (VOF)

1- Navier-Stokes

مطابق مشخصات حوضچه در آزمایشات مختلف، برای هر سه مدل یکسان بود. بلوک مربوط به کانال پایین دست نیز با عرض 80 سانتی متر تعیین شد. برای بررسی اثر طول کانال پایین دست بر جریان روی آستانه انتهایی در مدل عددی می توان به تحقیقات گذشته پیرامون پله در مسیر جریان مراجعه نمود. هاتوری و ناگانو (2010) محدوده جریان چرخشی در پایین دست پله در مسیر جریان را 23/3 برابر ارتفاع پله گزارش کرده اند. بنابراین برای جلوگیری از تاثیر خروجی کانال بر این محدوده بهتر است نسبت طول کانال پایین دست حوضچه به ارتفاع پله که در مدل حوضچه آرامش معادل ارتفاع آستانه انتهایی است از این مقدار بیش تر باشد. برای دستیابی به این مقدار و بر اساس ارتفاع آستانه انتهایی در مدل فیزیکی که برابر 7/5 سانتی - متر است، باید طول کانال بیش تر از 175 سانتی متر باشد. بنابراین با حاشیه اطمینان، کانال پایین دست به طول 2 متر در نظر گرفته شد. بلوک بندی و سیستم مختصاتی در شکل 4 ارایه شده است.



شکل 4- نمونه بلوک بندی و سیستم مختصاتی

و O نشان دهنده شرایط مرزی خروجی (همه گرادیان ها برابر صفر) است.

هستند، کمیته تعریف می شود که نسبت پرشدگی آن ها از آب را نشان می دهد که مقدار یک برای آن نشان دهنده این است که سلول از آب پر شده و مقدار صفر نشان دهنده این است که سیالی داخل سلول وجود ندارد. با معلوم بودن این کمیت محل سطح آزاد و زاویه آن در میان سلول های میدان حل توسط نرم افزار قابل تشخیص است. همچنین در مدل های این تحقیق، از شرایط No-Slip (شرایط بدون لغزش) در سطح تماس با دیوار استفاده گردیده است (Manual., 2008).

در نرم افزار Flow3D برای شبکه بندی می توان از بلوک استفاده کرد و هر بلوک پس از ایجاد، به سلول های بسیار کوچک تری تقسیم بندی خواهد شد. در این تحقیق از سه بلوک برای مدل سازی لوله ورودی به حوضچه، حوضچه آرامش و کانال پایین دست استفاده شده است. بلوک مربوط به لوله ورودی برای لوله های مختلف مطابق آزمایشات A تا C متفاوت و بلوک مربوط به حوضچه آرامش نیز

شرایط مرزی بلوک های 1، 2 و 3 در جدول 2 ارایه شده است. در این جدول VFR نشان دهنده شرایط مرزی دبی ورودی، S نشان دهنده شرایط مرزی متقارن، W نشان دهنده شرایط مرزی دیوار

جدول 2 - شرایط مرزی بلوک های استفاده شده در همه مدل ها

Zmax	Zmin	Ymax	Ymin	Xmax	Xmin	
W	W	W	W	S	VFR	بلوک 1
S	W	W	W	S	S	بلوک 2
S	W	W	W	O	S	بلوک 3

لوله ورودی روی دیوار قائم نشان داد که میزان خطای پارامتر فشار برای این سه مدل آشفتگی به طور متوسط به ترتیب 21، 7 و 9 درصد است. این موضوع نشان می دهد که مدل آشفتگی k-ε در مقایسه با دو مدل آشفتگی دیگر نتایج مناسبی را ارایه نکرده است. بنابراین دو مدل آشفتگی k-ω و RNG می توانند برای مدل سازی این حوضچه مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج و بحث

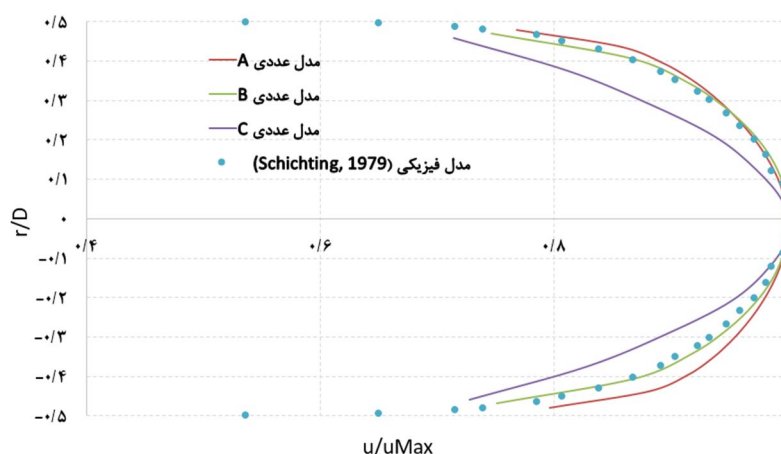
مقایسه نتایج مدل عددی و مدل فیزیکی

در این بخش، نتایج عددی هد فشار روی دیوار قائم و عمق آب روی آستانه انتهایی در مدل های عددی (که کاملاً مطابق با شرایط آزمایشات A تا C ساخته شده اند) با نتایج آزمایشات مقایسه شدند.

همچنین به منظور بررسی اثر اندازه سلول بر نتایج مدل عددی، آزمایش C با شرایط کاملاً یکسان، ولی با اندازه های سلول متفاوت در بلوک شماره 2 ساخته شد. به دلیل اینکه، پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند در بلوک شماره 2 یا حوضچه قرار دارند بنابراین اثر تغییر اندازه سلول محاسباتی بر نتایج مدل عددی تنها در این بلوک بررسی گردید. سلول های با اندازه های 4، 6، 8 و 10 میلی متر در بلوک شماره 2 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج پارامتر فشار روی دیوار قائم در محدوده جت ورودی در مقایسه با فشارهای برداشت شده در مدل فیزیکی نشان داد که اندازه سلول 8 میلی متری نتایج قابل قبولی ارایه می کند.

برای مقایسه اثر مدل های آشفتگی در نتایج فشار روی دیوار قائم، آزمایش C برای مدل های آشفتگی k-ε، k-ω و RNG مدل سازی گردید. مقایسه نتایج سه مدل فوق با نتایج مدل فیزیکی در محدوده

همچنین پروفیل سرعت در لوله ورودی ناشی از مدل‌های عددی با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه گردید (شکل 5). با توجه به مقادیر افت هد انرژی از ابتدا تا انتهای لوله ورودی و نیز اعداد رینولدز در مدل‌های A، B و C و نیز نمودار مودی، لوله‌های مدل‌سازی شده جزو لوله‌های صاف به حساب می‌آیند. بنابراین نتایج پروفیل سرعت در مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در لوله صاف



شکل 5- مقایسه نتایج عددی پروفیل سرعت با نتایج آزمایشگاهی (Schlichting, 1979)، (r شعاع لوله، u سرعت موضعی طولی جریان و u_{Max} حداکثر سرعت در لوله)

هد فشار روی دیوار قائم

در جدول 3 نتایج هد فشار روی دیوار قائم در محل نقطه راکد

(راستای محور مرکزی لوله ورودی روی دیوار قائم) در مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده، مقایسه و خطای حاصل نیز ارائه شده است.

جدول 3- فشارهای وارد بر دیوار قائم در مدل‌های عددی و مقایسه آن با نتایج مدل فیزیکی

نام مدل	محل برداشت فشار	هد فشار در مدل آزمایشگاهی (سانتی‌متر)	هد فشار در مدل عددی (سانتی‌متر)	خطا (درصد)
A	نقطه راکد	25	31	24
B	نقطه راکد	67	74	10
C	نقطه راکد	255	241	5

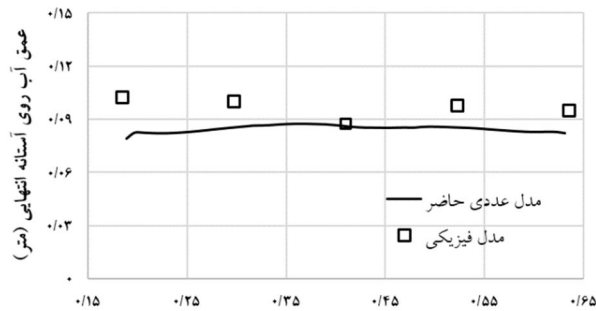
همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، با کاهش هد فشار (افزایش قطر لوله ورودی)، درصد اختلاف بین فشار حاصل از مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده افزایش یافته است. یکی از عوامل اختلاف بین نتایج فشار، خطای تجهیزات اندازه‌گیری فشار لحظه‌ای است. محدوده برداشت فشار حسگرهای این تحقیق صفر تا 1/6 بار و دقت آن‌ها 0/5 درصد مقیاس کل است. 0/5 درصد محدوده صفر تا 1/6 بار برابر با 8 سانتی‌متر است و بر این اساس در همه برداشت‌ها ممکن است این خطای 8 سانتی‌متری موجود باشد و بدون شک در برداشت‌هایی که محدوده فشار کم‌تر است، میزان خطا بیش‌تر خواهد بود. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود فشارهای ثبت شده روی دیوار در مدل A پایین است و بنابراین مقادیر خطای آن نیز بیش‌تر است. البته جریان در حوضچه دارای هوا نیز می‌باشد که در

مدل عددی دیده نمی‌شود. براساس مطالب ارائه شده و با توجه به گزارشات زیاد مبنی بر صحت نتایج مدل Flow3D در شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده (Silva., 2013; Bebalı et al., 2014; Seyedashraf et al., 2015 Nohani, 2015) میزان اختلاف نتایج مدل عددی و مقادیر آزمایشگاهی در محدوده قابل‌قبولی قرار دارد و نتایج مدل عددی مطلوب و قابل‌قبول ارزیابی می‌شود.

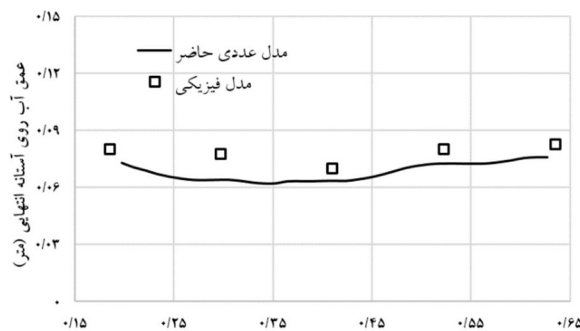
عمق جریان روی آستانه انتهایی

شکل 6 پروفیل سطح آب در هر سه مدل عددی و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در مدل فیزیکی سطح آب روی آستانه انتهایی دارای نوسان می‌باشد و برداشت‌های عمق جریان مقداری خطا به‌همراه دارد. خطای متوسط نتایج مدل‌های عددی A،

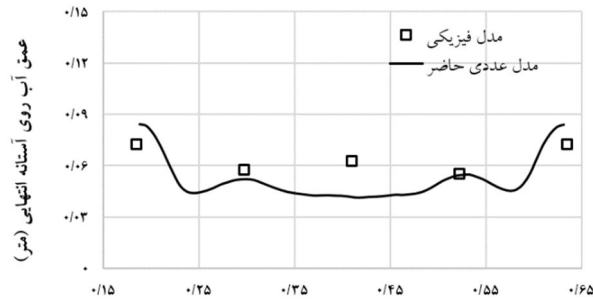
B و C نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب 13/1، 8/6 و 15/4 درصد است.



موقعیت مکانی روی آستانه انتهایی (متر)
الف) مدل A



موقعیت مکانی روی آستانه انتهایی (متر)
ب) مدل B



موقعیت مکانی روی آستانه انتهایی (متر)
ج) مدل C

شکل 6- مقایسه پروفیل سطح آب روی آستانه انتهایی در مدل عددی و فیزیکی

برخورد به دیوار قائم، به چند قسمت تقسیم می‌شود که هر یک پس از برخورد به چندین نقطه از بدنه سازه و نیز به یکدیگر، بخشی از انرژی خود را از دست داده و پس از عبور از زیر دیوار قائم به پایین دست منتقل می‌شوند. شکل 7 نشان‌دهنده نحوه برخورد جت ورودی به دیوار قائم و انتقال آن به پایین دست در مدل عددی A است.

مطابق شکل 8 جت ورودی به حوضچه پس از برخورد به دیوار قائم، تبدیل به جت دیواره‌ای شده و موازی با سطح دیوار قائم در همه جهات گسترش می‌یابد.

نتایج

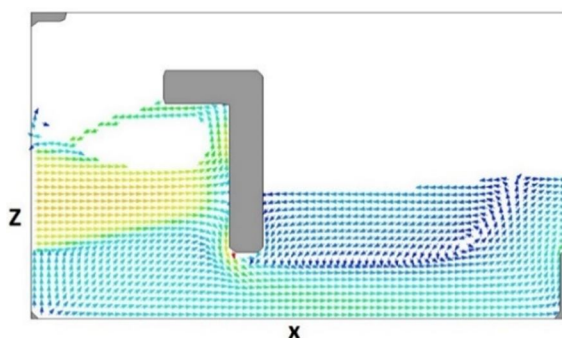
با توجه به اینکه در تحقیقات پیشین، مشخصات میدان جریان در شرایط مختلف به خصوص در نسبت‌های مختلف W/D_e مورد بررسی قرار نگرفته است بنابراین در این قسمت مشخصات میدان جریان به صورت کیفی و کمی در داخل حوضچه و نیز پایین دست آن به ازای مقادیر مختلف W/D_e مورد بررسی قرار گرفت.

الگوی کیفی جریان در حوضچه آرامش

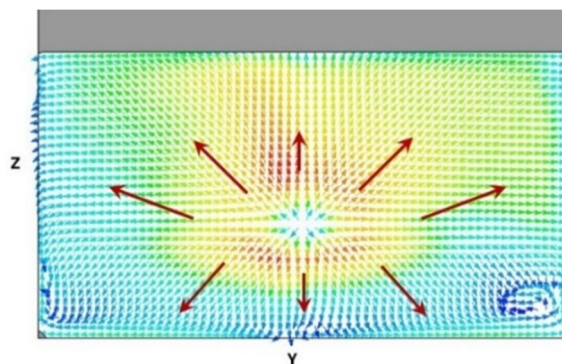
در حوضچه آرامش USBR VI جریان پس از ورود به حوضچه و

میانی حوضچه پس از رسیدن به شکاف زیر دیوار قائم به طور مستقیم به سمت آستانه انتهایی حرکت می‌کند.

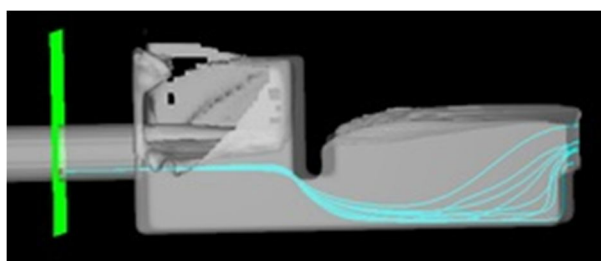
بخشی از جریانی که موازی با سطح دیوار قائم در حرکت است (جریان‌های نشان داده شده در شکل 8) مطابق شکل 9 در محور



شکل 7- شمای کلی برخورد جت ورودی به دیوار قائم و انتقال آن به پایین‌دست در محور میانی حوضچه



شکل 8- جت دیواره‌ای ایجاد شده روی دیوار قائم پس از برخورد جت ورودی



شکل 9- برخورد جت ورودی به دیوار قائم و انتقال مستقیم آن به پایین‌دست

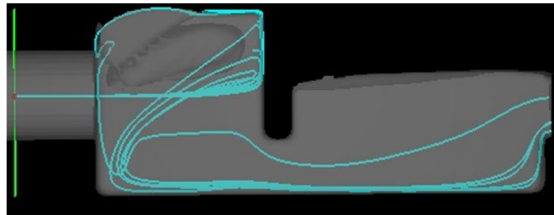
مخالف جریان ورودی به سمت بالادست حوضچه حرکت می‌کند. این جریان پس از جدا شدن از دیوار افقی و به دلیل اثر ثقل به سمت کف متمایل می‌شود و یا به دیوار ابتدایی کانال برخورد کرده و از اطراف جت ورودی به سمت کف حوضچه حرکت می‌کند.

در نهایت تمامی جریان‌های موجود در بالادست دیوار میانی از زیر دیوار میانی به پایین‌دست منتقل و پس از برخورد با آستانه انتهایی وارد کانال پایین‌دست می‌شوند. به دلیل اختلاف عرض حوضچه و کانال پایین‌دست، جریان خروجی از حوضچه به محض ورود به کانال پایین‌دست به طرفین متمایل شده و در گوشه‌های ابتدایی کانال، دو جریان چرخشی (کاملاً مطابق با مدل فیزیکی) ایجاد می‌شود. بنابراین

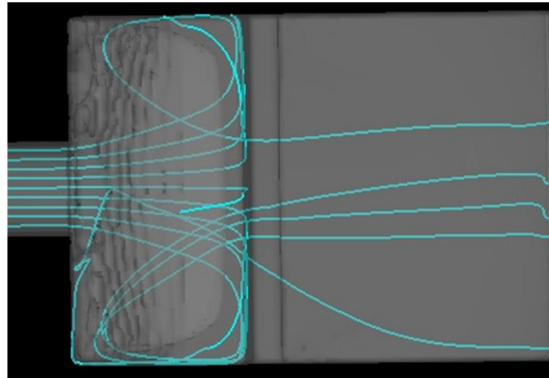
بخش دیگری از جریان در راستای دیوار قائم (جریان‌های نشان داده شده در شکل 8) مطابق شکل (10ب) به سمت دیوارهای کناری حوضچه حرکت کرده و پس از برخورد به دیوار کناری حوضچه، به سمت بالادست حوضچه منحرف می‌شود. این جریان به خاطر اثر ثقل، به تدریج به سمت کف حوضچه نیز متمایل می‌شود و پس از رسیدن به جریان در کف حوضچه تنها یک مسیر برای حرکت دارد و ناچار است که مجدداً به سمت پایین‌دست حرکت کند.

بخش دیگری از جریان پس از برخورد با دیوار قائم (شکل 8 و 11) به سمت دیوار افقی که در تراز بالای دیوار قائم قرار دارد حرکت و پس از برخورد به دیوار افقی، موازی با دیوار افقی و در جهت

عرض خالص جریان به مرور و با از بین رفتن جریان چرخشی ذکر شده افزایش یافته و جریان به تدریج یکنواخت تر می شود.

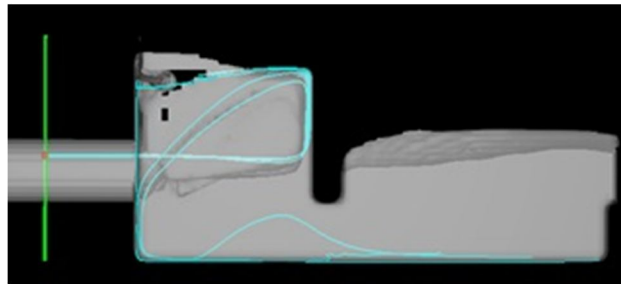


الف) تصویر از کنار حوضچه



ب) تصویر از بالای حوضچه

شکل 10- برخورد جت ورودی به دیوار قائم و حرکت به سمت دیوارهای کناری حوضچه



شکل 11- برخورد جت ورودی به دیوار قائم و حرکت آن به سمت دیوار افقی

انتقال دبی به کناره‌های حوضچه در نسبت $W/D_e=10.16$ در مقایسه با دیگر نسبت‌های W/D_e شدت بیشتری دارد. البته در فاصله یک طول حوضچه از آستانه انتهایی در کانال پایین دست، توزیع دبی در عرض کانال تقریباً یکنواخت می شود هر چند بالاتر بودن دبی در کناره‌ها به معنی آبستگي بیشتر در پایین دست می باشد و با توجه به الگوی جریان توضیح داده شده در بخش قبل باید مطالعه و اصلاح شود.

پخش جت ورودی

جت ورودی به حوضچه پس از ورود به آن پخش می شود، البته سرعت پخش جت ورودی در نسبت‌های مختلف W/D_e متفاوت است. اندرکنش جت ورودی که به سمت پایین دست در حرکت است و جریان‌هایی که به سمت بالادست در حرکت هستند، باعث می شود

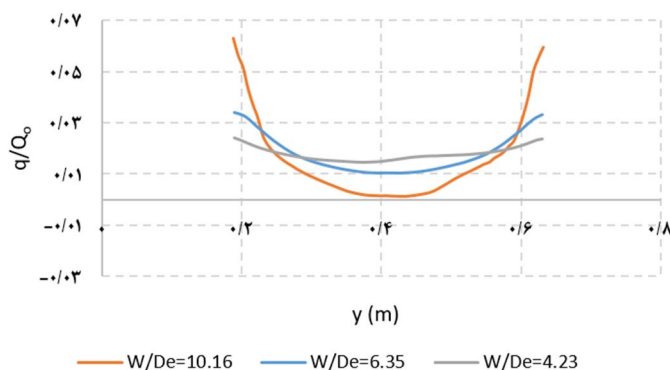
الگوی کمی جریان در حوضچه آرامش

توزیع دبی در عرض حوضچه و کانال پایین دست

با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی این حوضچه توزیع یکنواخت جریان در عرض حوضچه است از این رو توزیع دبی در عرض حوضچه بر روی آستانه انتهایی در نسبت‌های مختلف W/D_e مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل 12 به نمایش گذاشته شد. در این شکل y فاصله عرضی از دیوار جانبی حوضچه است. دبی در هر نقطه از عرض حوضچه (q) توسط دبی ورودی به حوضچه (Q_0) نرمال سازی شده است. نتایج توزیع دبی روی آستانه و نیز در موقعیت‌های دیگر طولی در حوضچه و کانال پایین دست نشان می دهد که در پایین دست دیوار قائم و نیز در فواصل ابتدایی کانال پایین دست، جریان غیریکنواخت و دبی در کناره‌ها بیشتر است. همچنین

پخش جت در صفحه افقی عبوری از محور مرکزی لوله ورودی در مدل A را نشان می‌دهند. ($x^*=x/0.61$ که x فاصله از ابتدای حوضچه و $y1^*=y/0.45$ که y فاصله از دیوار جانبی حوضچه است.)

که پدیده پخش جت با سرعت بیش‌تری اتفاق بیفتد. در نسبت‌های کمتر W/D_e این پدیده با شدت کم‌تری اتفاق می‌افتد و سرعت جت ورودی تا دیوار قائم کم‌تر مستهلک می‌شود. شکل 13 نحوه پخش جت در صفحه عبوری از محور میانی حوضچه و شکل 14 نحوه



شکل 12- توزیع دبی در واحد عرض (نرمال‌سازی شده با دبی ورودی) روی آستانه (y : موقعیت مکانی در عرض کانال پایین‌دست، W : عرض حوضچه، D_e : عمق معادل جریان ورودی، q : دبی در واحد عرض حوضچه و Q : دبی ورودی به حوضچه)

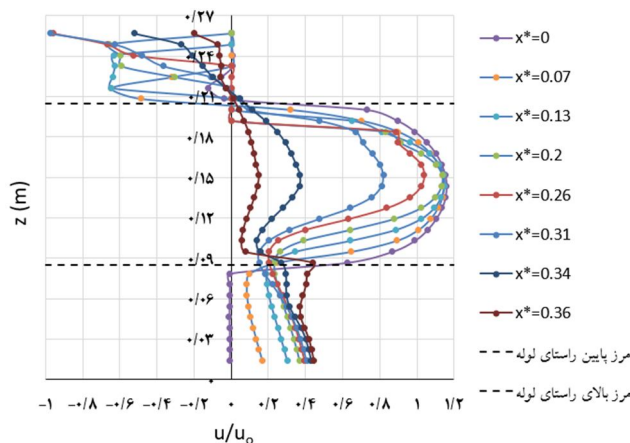
جت با جریان‌های برگشتی باشد.

ب) به‌طور کلی در تمامی نسبت‌های مختلف W/D_e پخش جت در راستای قائم بسیار کم‌تر از پخش جت در راستای عرضی است (شکل 14).

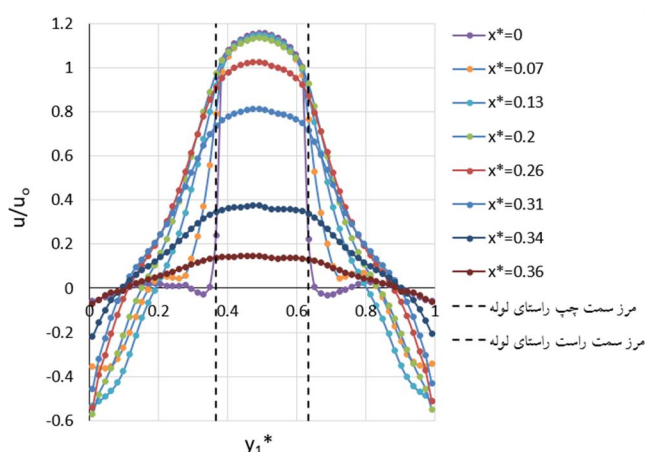
ج) در ترازهای پایین‌تر از لوله، جت ورودی، به‌دلیل حرکت آزادانه جریان جت به سمت زیر دیوار قائم، سرعت بیش‌تری نسبت به نقاط متناظر در ترازهای بالاتر از لوله دارد.

با توجه به نحوه پخش جت ورودی (شکل‌های 13 و 14) می‌توان به موارد زیر نیز اشاره کرد:

الف) پخش جت در راستای قائم از همان ابتدای حوضچه آغاز می‌شود. البته پخش جت در نزدیکی دیوار میانی در ترازهای بالا و ترازهای پایین یکسان نیست و نامتقارن می‌باشد. در ترازهای بالاتر از لوله ورودی، افزایش ضخامت جت زیاد نیست، در حالی که در ترازهای پایین‌تر از لوله ورودی پخش جت بیش‌تر است. کم‌تر بودن ضخامت جت در ترازهای بالاتر از لوله ورودی ممکن است به‌دلیل رویارویی



شکل 13- سرعت طولی در x^* های مختلف در بالادست دیوار قائم در راستای قائم در محور میانی حوضچه در مدل A (Z : فاصله قائم از کف حوضچه، u : سرعت در هر نقطه و u_0 : سرعت متوسط در لوله ورودی به حوضچه)



شکل 14- سرعت طولی در x^* های مختلف در بالادست دیوار قائم در راستای عرضی در تراز محور مرکزی لوله ورودی در مدل A (ii): سرعت در هر نقطه و u_0 : سرعت متوسط در لوله ورودی به حوضچه

تغییرات سرعت‌های حداکثر طولی، عرضی و قائم در شکل 15 برای مدل‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. جریان در لوله ورودی به صورت تحت فشار است و پس از ورود به حوضچه نیز تا قبل از برخورد به دیوار قائم، شکل خود را حفظ می‌کند. با برخورد جت به دیوار قائم همان‌طور که در بخش میدان جریان کیفی مطرح گردید، جت ورودی به چند بخش تقسیم شده و در نهایت با یکدیگر تجمیع شده و از زیر دیوار قائم به صورت یک جریان سطح آزاد به انتهای حوضچه می‌رسند. تبدیل شدن جریان از حالت جت دایره‌ای به جریان سطح آزاد باعث افت چشم‌گیر سرعت بی‌بعد طولی مطابق شکل 15 می‌شود. پس از برخورد جریان به آستانه انتهایی، به دلیل کاهش ناگهانی عمق جریان، سرعت افزایش یافته ولی پس از آستانه انتهایی به دلیل افزایش عرض کانال، سرعت کاهش می‌یابد.

تغییرات هد انرژی کل

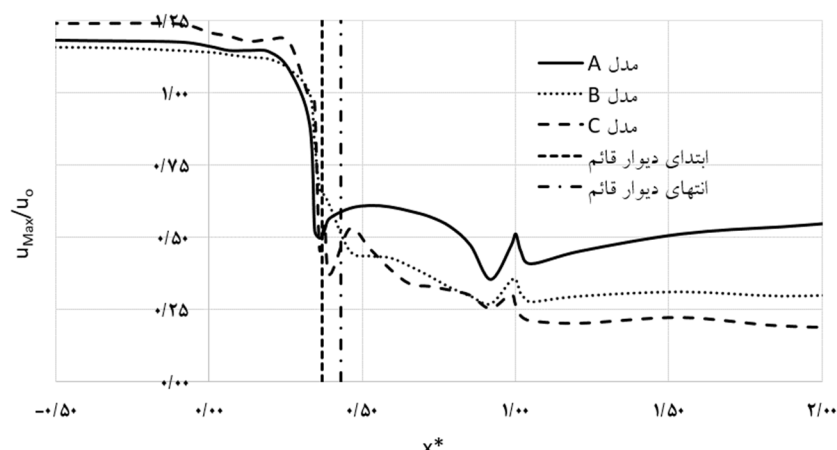
مقدار هد انرژی کل جریان¹ در $x^*=0$ (ابتدای حوضچه) و $x^*=1.0$ (انتهای حوضچه) به ازای نسبت‌های مختلف W/D_0 در جدول 4 ارائه شده‌اند. هد انرژی جریان با استفاده از رابطه برنولی و به کمک سرعت متوسط در هر موقعیت محاسبه شده است. نتایج مندرج در جدول بالا نشان می‌دهد که با افزایش نسبت W/D_0 میزان کاهش انرژی جریان در طول حوضچه (از ابتدا تا انتهای حوضچه) افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که جریان خروجی از حوضچه در تمام نسبت‌های W/D_0 حدود بیش از 80 درصد انرژی خود را نسبت به ابتدای حوضچه، از دست می‌دهد. واگرایی در حوضچه و برخورد جریان با جریان‌های برگشتی عامل افت بسیار زیاد ایجاد شده در این نوع از مستهلک‌کننده‌ها می‌باشد.

د) توزیع سرعت طولی در راستای عرضی نشان می‌دهد که پخش جت از ابتدای حوضچه کاملاً متقارن است. عرض جت با نزدیک شدن به دیوار قائم افزایش یافته و نزدیک به دیوار قائم به حداکثر مقدار خود رسیده است. برای محاسبه عرض جت از پروفیل سرعت در راستای عرضی استفاده شده است. عرض جت در پروفیل سرعت جت ورودی در راستای عرضی، برابر محدوده‌ای است که سرعت طولی بزرگ‌تر از صفر است. افزایش قطر لوله ورودی باعث می‌شود عرض جت نسبت به قطر لوله ورودی با نزدیک شدن به دیوار قائم به دلیل گسترش جریان برگشتی در کناره‌ها، افزایش چندانی نداشته باشد. در نزدیکی دیوار قائم ($x^*=0.36$) عرض جت به قطر جت ورودی برای نسبت‌های W/D_0 برابر با 4/23، 6/35 و 10/16 به ترتیب 2/85، 3/94 و 4/77 می‌باشد. به نظر می‌رسد به دلیل اینکه جریان برگشتی در تماس با دیوارهای جانبی حوضچه می‌باشد در نسبت‌های بزرگ‌تر W/D_0 فضای بیش‌تری برای پخش جت وجود دارد.

ه) مقدار u/u_0 برای جریان‌های برگشتی در محل دیوار افقی برای نسبت‌های W/D_0 برابر با 4/23، 6/35 و 10/16 به ترتیب برابر 1، 1 و 0/8 می‌باشد. با توجه به میدان جریان، در نسبت $W/D_0=10.16$ جت ورودی، پس از برخورد به دیوار قائم، فاصله بیش‌تری را نسبت به دیگر نسبت‌های W/D_0 طی می‌کند تا به دیوار افقی برسد و ممکن است به همین دلیل سرعت جریان برگشتی آن در محل دیوار افقی کمتر از بقیه باشد.

و) سرعت حداکثر جریان در محل لوله ورودی به حوضچه ($x^*=0$) یا ابتدای حوضچه در محور مرکزی لوله قرار دارد در حالی که به طور تقریبی، از موقعیت $x^*=0.2$ به بعد، سرعت حداکثر جریان از محور مرکزی لوله، مقداری به سمت پایین منحرف می‌شود. میزان انحراف محل سرعت حداکثر جت از محور مرکزی لوله ورودی در راستای قائم نسبت به قطر لوله ورودی برای نسبت‌های W/D_0 برابر با

1- Total hydraulic head



شکل 15- مقایسه سرعت حداکثر طولی بی‌بعد (u_{Max}/u_0) در مدل‌های مختلف

جدول 4- مقادیر هد انرژی کل جریان در ابتدا و انتهای حوضچه در نسبت‌های مختلف W/D_e بر حسب متر

مدل C	مدل B	مدل A	
$W/D_e=10.16$	$W/D_e=6.35$	$W/D_e=4.23$	
1/929	0/694	0/271	ابتدای حوضچه
0/047	0/047	0/043	انتهای حوضچه
98	93	84	افت انرژی کل (%)

بخشی از دیوار نیرویی وارد نمی‌شود، پس نیروی وارد بر آن در محدوده‌های کوچکی متمرکز هستند که این باعث افزایش گشتاور وارد بر دیوار شده و احتمال شکست دیوار را افزایش خواهد داد. بنابراین می‌توان گفت با افزایش نسبت W/D_e یا به عبارتی با کاهش قطر لوله ورودی در شرایطی که عرض حوضچه ثابت است گشتاور وارد بر دیوار قائم نسبت به تکیه‌گاه‌ها (منظور از تکیه‌گاه‌ها در اینجا دیوارهای جانبی حوضچه است) افزایش خواهد یافت. زیرا با کاهش قطر لوله ورودی، سرعت جریان ورودی و همچنین مقدار عدد فرود جریان افزایش یافته و فشار بیشتری در سطح کوچک‌تری به دیوار وارد می‌کند.

دیوار افقی

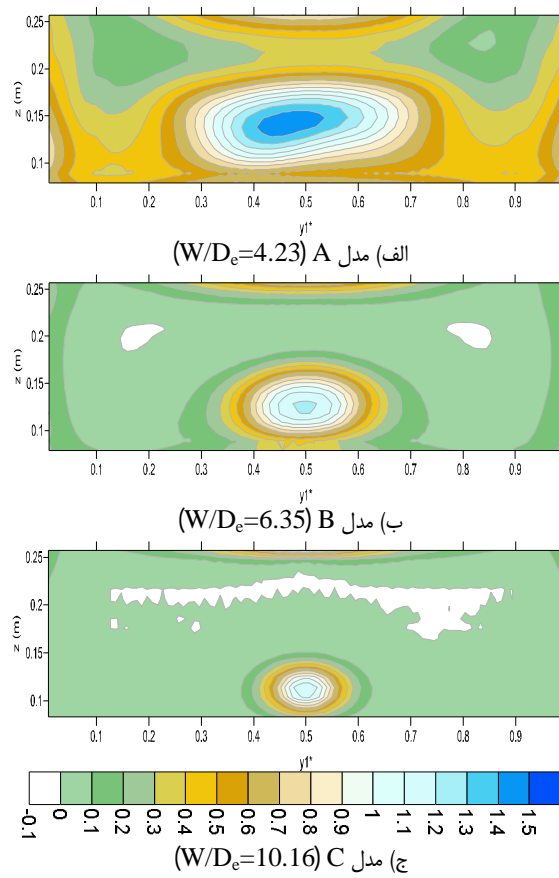
شکل 17 فشار متوسط بی‌بعد شده با $\rho u_0^2/2$ روی دیوار افقی در سه مدل A، B و C را نشان می‌دهد. فشارهای بی‌بعد حداکثر روی دیوار افقی در مدل‌های A، B و C به ترتیب در حدود 0/3، 0/45 و 0/66 هستند که نشان‌دهنده کاهش فشار حداکثر با افزایش نسبت W/D_e است. این مقادیر در مقایسه با فشارهای وارد شده بر دیوار قائم بسیار کمتر هستند و نشان می‌دهند که اغلب فشار ناشی از جت ورودی توسط دیوار قائم تحمل خواهد شد.

توزیع فشار روی دیوار میانی حوضچه

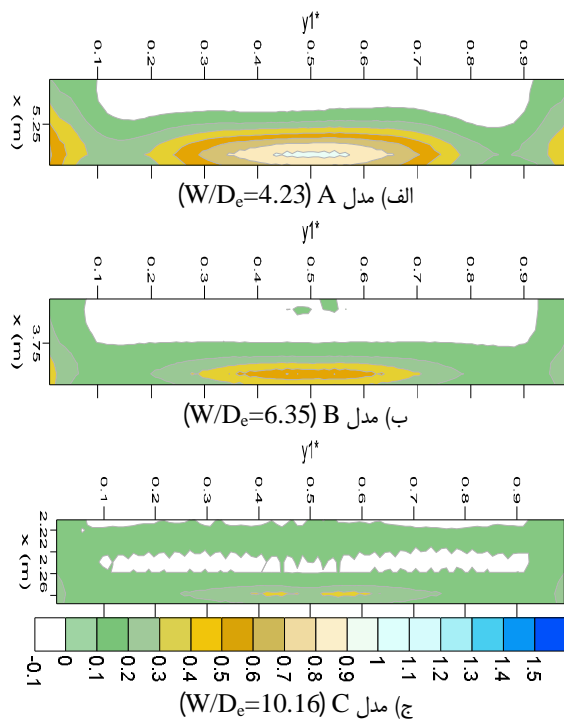
الف) دیوار قائم

در شکل 16 فشارهای بی‌بعد شده با $\rho u_0^2/2$ روی دیوار قائم در سه مدل A، B و C ارایه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که اغلب فشارهای قابل توجه روی دیوار قائم در محدوده سطح جت برخوردی با دیوار رخ می‌دهد و با دور شدن از محدوده برخورد، از میزان فشارهای با شدت بالا، کاسته شده و حتی در بخشی از دیوار، فشار وارد بر آن به صفر می‌رسد. هر چه نسبت W/D_e کاهش می‌یابد محدوده تحت تاثیر فشار ناشی از جت افزایش خواهد یافت. با بررسی تغییرات فشار روی دیوار قائم مشخص گردید که نسبت سطح پرفشار روی دیوار قائم به سطح مقطع جت ورودی به ازای W/D_e برابر با 4/23، 6/35 و 10/16 به ترتیب 2/21، 2/04 و 1/84 می‌باشد.

مطابق شکل 16 مساحت محدوده بدون فشار با افزایش نسبت W/D_e افزایش می‌یابد به عبارتی فشار وارد بر دیوار با افزایش نسبت W/D_e یکنواخت‌تر می‌شود. نیروی وارد بر دیوار قائم در مدل‌های A، B و C به ترتیب 80، 70 و 87 نیوتن است. مقادیر این نیرو با استفاده از فشارهای وارد شده بر سطح دیوار محاسبه شده است. این مقادیر نشان می‌دهد با توجه به اختلاف به نسبت زیاد در فشارهای حداکثر وارد بر دیوار، نیروهای وارد بر دیوار قائم تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اینکه در مدل C به



شکل 16- توزیع فشار بی بعد شده با $0.5 \rho u_0^2$ روی دیوار قائم در مدل عددی

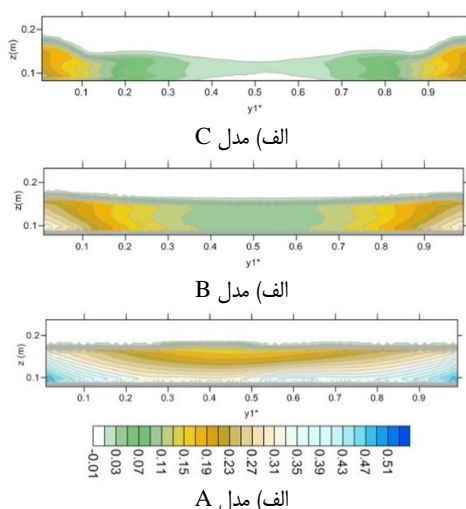


شکل 17- توزیع فشار بی بعد شده با $0.5 \rho u_0^2$ روی دیوار افقی در مدل عددی

تغییرات سرعت طولی جریان روی آستانه انتهایی

در شکل 18 میدان سرعت در صفحه عمود بر راستای x (راستای جریان) در موقعیت سطح آستانه برای هر سه مدل A، B و C ارایه شده است. مشاهده می‌شود که در مدل C و در قسمت میانی آستانه انتهایی، بخشی از جریان به سمت بالادست (منفی) بوده و به‌طور کلی جریان در عرض، کاملاً غیریکنواخت است. در مدل C به دلیل کوچک بودن قطر جت ورودی نسبت به عرض حوضچه و نیز سرعت بالای

جت ورودی، به‌نظر می‌رسد طول حوضچه فرصت کافی در اختیار جریان قرار نمی‌دهد که توزیع سرعت در عرض حوضچه روی آستانه انتهایی یکنواخت گردد در حالی که در مدل A با توجه به قطر بالای جت ورودی و سرعت کمتر آن نسبت به مدل C، طول حوضچه به اندازه کافی بوده است که جریان تا رسیدن به آستانه انتهایی، تقریباً یکنواخت گردد.



شکل 18- توزیع u/u_0 روی آستانه انتهایی برای نسبت‌های مختلف W/D_e

میزان یکنواختی جریان روی آستانه انتهایی

برای بررسی میزان یکنواختی جریان در سطح مقطع عمود بر جریان طولی، از پارامتر ضریب انرژی جنبشی (α) یا ضریب کوریولیس که یک پارامتر بدون بعد است استفاده شد. این ضریب برای یک جریان کاملاً یکنواخت برابر $1/0$ است و به‌صورت رابطه 5 تعریف می‌شود (White., 2003).

$$\alpha = \left(\int u^3 dA \right) / (\bar{u}^3 A) \quad (5)$$

در این رابطه A سطح مقطع عمود بر محور جریان، \bar{u} سرعت متوسط جریان در سطح مقطع مورد نظر و u سرعت در هر نقطه از سطح مقطع مورد نظر است. برای بررسی میزان یکنواختی جریان خروجی از حوضچه در نسبت‌های مختلف W/D_e ، برای سه مدل A، B و C این ضریب روی آستانه انتهایی محاسبه گردید. ضریب یکنواختی روی آستانه انتهایی برای مدل‌های A، B و C به ترتیب $1/401$ ، $1/741$ و $1/982$ محاسبه شد. این مقادیر نشان می‌دهند که با افزایش نسبت W/D_e میزان یکنواختی جریان خروجی از حوضچه کاهش می‌یابد.

سرعت برشی در کف کانال پایین دست

نحوه توزیع سرعت برشی (u^*) در نزدیکی کف کانال پایین دست در شکل 19 نشان داده شده است. همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، هرچه نسبت W/D_e کاهش یابد، یکنواختی توزیع سرعت روی آستانه انتهایی بیش‌تر خواهد شد. از طرفی شکل 19 نیز این موضوع را تایید می‌کند که در مدل C توزیع سرعت برشی در نزدیکی کف کانال، کاملاً غیریکنواخت بوده و نقاط حداکثری آن در دو نقطه کناری آستانه انتهایی رخ می‌دهد که این به معنی آبشستگی بیش‌تر در مدل C می‌باشد.

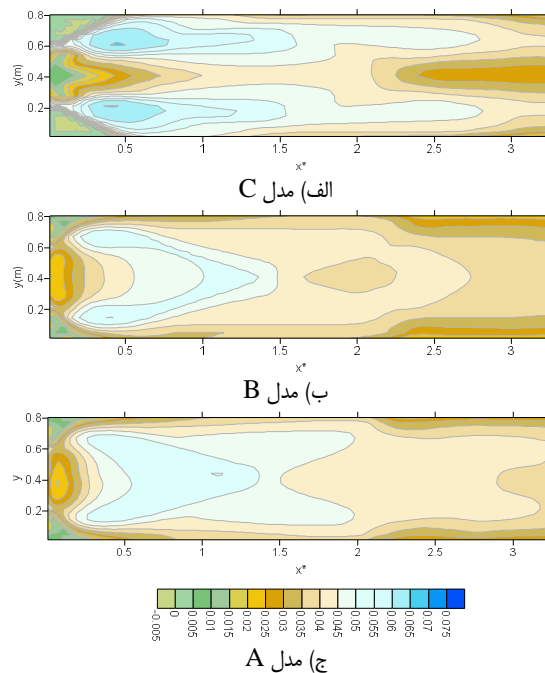
نتیجه‌گیری

در این تحقیق میدان جریان در حوضچه آرامش USBR VI به کمک نرم‌افزار Flow3D مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که:

- 1) نرم‌افزار Flow3D نتایج حاصل از مدل فیزیکی را با دقت مناسبی پیش‌بینی می‌نماید. فشار روی دیوار قائم در راستای محور مرکزی لوله ورودی (نقطه راکد) برای نسبت‌های W/D_e برابر با

13/1 توسط نرم افزار ارایه شده است.

10/16 و 6/35، 4/23 به ترتیب با خطای 24، 10 و 5 درصد و عمق آب روی آستانه انتهایی نیز به ترتیب با خطای متوسط 8/6، 15/4 و



شکل 19- سرعت برشی (u^*) در نزدیکی کف کانال پایین دست در مدل های مختلف (محدوده کانتورهای استفاده شده در هر سه نمودار بین $0/005$ تا $0/075$ متر بر ثانیه است.)

افقی و نیز جریان های برگشتی در محل دیوارهای جانبی)، باعث می شود که پدیده پخش جت با شدت بیش تری نسبت به شرایط جت آزاد اتفاق بیفتد.

(5) در نزدیکی دیوار قائم ($x^*=0.36$) عرض جت به قطر جت ورودی برای نسبت های W/D_e برابر با 4/23، 6/35 و 10/16 به ترتیب 2/85، 3/94 و 4/77 می باشد. به نظر می رسد به دلیل اینکه جریان برگشتی در تماس با دیوارهای جانبی حوضچه می باشد در نسبت های بزرگتر W/D_e فضای بیش تری برای پخش جت وجود دارد.

(6) مقدار u/u_0 برای جریان های برگشتی در محل دیوار افقی برای نسبت های W/D_e برابر با 4/23، 6/35 و 10/16 به ترتیب برابر 1، 0/8 و 0/8 می باشد.

منابع

Aisenbrey, A.J. 1978. Design of small canal structures, 1978: engineering technology pertaining primarily to the design of small canal structures of less than 100-cubic-foot-per-second capacity. A Water resources technical publication (USA).

Aleyasin, S.S., Fathi, N and Vorobieff, P. 2015.

(2) جت ورودی به حوضچه پس از برخورد به دیوار قائم به دو قسمت تقسیم می شود. قسمتی از آن بلافاصله از زیر دیوار به پایین دست منتقل شده و قسمتی دیگر با برخورد به دیوار افقی و دیوارهای دو سمت حوضچه شروع به چرخش در بالادست دیوار قائم خواهد کرد و سپس از زیر دیوار قائم به پایین دست منتقل می شود. با توجه به تغییر پارامتر W/D_e در مدل های مختلف، مشخص گردید که این نسبت، تاثیر مشخص و قابل ملاحظه ای بر میدان جریان دارد. مقادیر بالای این نسبت نشان دهنده این است که عمق معادل جریان ورودی نسبت به عرض حوضچه، کوچک است.

(3) بررسی میدان جریان نشان داد در طول حوضچه و همچنین در فواصل ابتدایی کانال پایین دست، دبی در کناره ها بیش تر است. در فاصله یک برابر طول حوضچه پس از آستانه انتهایی در کانال پایین دست، توزیع دبی در عرض کانال تقریباً یکنواخت می شود. البته هرچه نسبت W/D_e افزایش یابد توزیع دبی روی آستانه انتهایی غیر یکنواخت تر خواهد شد.

(4) سرعت پخش جت ورودی به حوضچه نسبت به پخش جت آزاد متفاوت است. اندرکنش جت ورودی که به سمت پایین دست در حرکت است و جریان هایی که به سمت بالادست و در خلاف جهت جریان ورودی در حرکت هستند (مانند جریان برگشتی در محل دیوار

- Comparison of Two CFD Models. *International Journal of Engineering and Technology Sciences*.3.3 : 262-274.
- Silva,M.R. 2013. 3D numerical modeling of flow along spillways with free surface flow. Complementary spillway of Salamonde, TECNICO Lisboa conference:1-12.
- Tiwari,H. 2013 a. Design of Stilling Basin Model with Impact Wall and End Sill .*Research Journal of Recent Sciences*. 59-63.
- Tiwari,H. 2013b. Analysis of Baffle Wall Gap in the Design of Stilling Basin Model .*International Journal of Civil Engineering and Technology*. 66-71.
- Tiwari,H and Goel,A. 2014. Effect of End Sill in the Performance of Stilling Basin Models, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2.2: 60-63.
- Verma,D.V.S and Goel,A. 2000. Stilling basins for pipe outlets using wedge-shaped splitter block. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 126.3:179-184.
- Verma,D.V.S and Goel,A. 2003. Development of efficient stilling basins for pipe outlets. *Journal of irrigation and drainage engineering*.129.3:194-200.
- White,F.M. 2003. *Fluid Mechanics*/Frank M. White.
- Experimental Study of the Type VI Stilling Basin Performance. *Journal of Fluids Engineering*. 137.3: page1-9.
- Babaali,H., Shamsai, A and Vosoughifar,H. 2015. Computational modeling of the hydraulic jump in the stilling basin with convergence walls using CFD codes. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 40.2:381-395.
- Beichley,G. 1978 .*Hydraulic Design of Stilling Basin for Pipe or Channel Outlets Denver: USBR*.
- Bradley,J.N and Peterka,A.J. 1955. Research study on stilling basins, energy dissipators and associated appurtenances. US Bur. Reclam. Laboratory. Report. *Hydraulic*.399:81-89.
- Flow-3D. 2010. *Flow-3D User Manual, Version 10.0*. Flow Science Incorporated. 10 edition.
- Hattori, and Nagano,Y. 2010. Investigation of turbulent boundary layer over forward-facing step via direct numerical simulation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 31.3:284-294.
- Nohani,E. 2015. Numerical Simulation of the Flow Pattern on Morning Glory Spillways. *International Journal of Life Sciences*. 9.4:28-31.
- Peterka, A.J. 1984. *Engineering monograph no. 25*.
- Schlichting,H and Gersten,K. 2003. *Boundary-layer theory*. Springer Science and Business Media.599.
- Seyedashraf,O., Elyasi,S. 2015,. *Flow Structures in Sharply-Curved Open Channel Bends-Numerical*

Numerical simulation of Flow Field in Stilling Basin USBR VI

E. Behnamtalab¹*, M.Ghodsian², A.R. Zarrati³, S. A.A Salehi Neishabouri⁴

Recived: Apr.26, 2017

Accepted: Aug.01, 2017

Abstract

One of the most conventional types of energy dissipators is stilling basin USBR VI. Stilling basin USBR VI is also one of the oldest basins designed for dissipating the pipe outlet flow. This stilling basin is made of a small boxlike structure with a hanging wall and an endsill. Hanging wall is to distribute the energy of incoming flow to basin width. The mentioned basin has no need to tailwater for successful performance. In this research, the Flow3D software has been used to model the specifications of flow field qualitatively and quantitatively. On the other hand, the numerical model used in this study is according to physical model built by author in the hydraulic lab at the Tarbiat Modares University. In this model, basin and downstream channel widths are constant. Three incoming pipes with different diameters were also used to investigate the effect of W/D_e ratios. In order to validate the numerical model, the recorded pressures on hanging wall and flow depth on endsill in physical model as well as the velocity profile of incoming pipe were compared with the corresponding experimental results of Nikuradse in 1932 [10]. The results of flow field show that the flow rate is higher in the vicinity of side walls for the hanging walls and beginning of downstream channel. The distribution of flow rate in width is however uniform at the distance of basin length from endsill in downstream channel. Furthermore, different W/D_e ratios have different diffusion velocities of incoming jet. Incoming jet interaction and the backward flow will cause the higher rate of jet diffusion, the higher W/D_e ratios, the higher rate of jet diffusion.

Keywords: Flow Field, Flow3D, Numerical Model, Stilling Basin USBR VI

1- Faculty Member of Civil Engineering, Engineering Department, Hakim Sabzevari University

2- Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

4- Professor, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

(*- Corresponding Author Email: e.behnamtalab@hsu.ac.ir)