نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۲، ص. ۹۸۴-۹۷۳

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.5, Nov.-Dec. 2013, p. 973-984

مدل‌سازی عددی جریان اطراف پایه پل در بسترهای پیچانرودی

دل‌آرام هوشمند[1*]- کاظم اسماعیلی[2]- علیرضا کشاورزی[3]- علیرضا فریدحسینی[4]

تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۱۲/۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۷/۲۱

چکیده

قرارگیری پایه‌های پل در مسیر جریان، الگوی سه بعدی و پیچیده‌ای از جریان را تولید می‌کند که باعث فرسایش بستر اطراف آن می‌گردد. از آنجایی‌که رودخانه‌ها دارای مسیر مستقیم نیستند و به صورت پیچانرودی می‌باشند، ضروری است تا تاثیر تغییر الگوی ایجاد شده در جریان در اثر عبور از قوس بر آبشستگی اطراف پایه‌های پل بررسی گردد. امروزه با توسعه نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) امکان شبیه‌سازی الگوی جریان وجود دارد. به همین جهت هدف این پژوهش مدل‌سازی جریان اطراف پایه‌های پل مستقر در کانال‌های خمیده به صورت سه بعدی است. برای این منظور از کد تجاری Fluent که معادلات جریان را به روش حجم محدود و الگوی مرکزیت سلول حل می‌نماید استفاده شد. برای گسسته‌سازی معادلات ناویر استوکس از سه مدل آشفتگی K-ε ، K-ω و RSM و جهت لحاظ نمودن سطح آزاد از مدل حجم سیال استفاده شد. جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی از نتایج حاصل از اندازه‌گیری سرعت جریان توسط سرعت‌سنج ADV اطراف مدل فیزیکی پایه پل در یک فلوم روباز مارپیچی شامل ۵ قوس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی RSM نسبت به دو مدل دیگر در مدل‌سازی عددی سرعت جریان و جریان‌های ثانویه عملکرد بهتری داشته است. مقایسه قدرت جریان‌های ثانویه در پایین‌دست پایه حاکی از آن بود که با قرارگیری پایه پل در میانه کانال قوسی شکل جریان‌های ثانویه به سمت قوس داخلی کانال متمرکز شده و اثر گردابه‌های برخاستگی تا مقطع ۱۵۰ درجه از قوس ادامه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: پیچانرودها، پایه پل، مدل‌های آشفتگی، نرم افزار فلوئنت

مقدمه

الگوی غالب برای شکل رودخانه‌ها به عنوان سیستم‌هایی طبیعی در پلان پیچان‌رودی می‌باشد. ساختار جریان در پیچان‌رودها پیچیده‌تر از رودخانه‌های با مسیر مستقیم است. اصلی‌ترین نیروی وارد بر جریان در قوس‌ها نیروی گریز از مرکزی است که هنگام ورود جریان به قوس بر آن اثر می‌گذارد. این نیرو باعث تغییر شیب عرضی سطح آب در قوس می‌شود. عدم برابری عمق آب در قوس بیرونی و داخلی باعث ایجاد گرادیان فشار جانبی در داخل قوس می‌شود. با غلبه این گرادیان فشار بر نیروی گریز از مرکز، جریان‌هایی در جهت عرضی درون قوس شکل گرفته که به جریان‌های ثانویه موسوم‌اند. با اضافه شدن جریان‌های ثانویه عرضی به جریان اصلی در طول مسیر، جریان حلزونی در قوس شکل می‌گیرد. این جریان حلزونی اصلی‌ترین نقش را در شکل‌گیری و توسعه تغییرات بستر و نیز چگونگی توزیع تنش برشی در کف کانال ایفا می‌کند (۱۲).

پل‌ها یکی از متداول‌ترین سازه‌های مورد استفاده در مسیر رودخانه‌ها می‌باشند. وجود سازه‌هایی همچون پایه‌های پل درون قوس بر الگوی جریان حلزونی شکل در قوس اثر گذاشته و باعث افزایش پیچیدگی‌های رفتار جریان می‌شود. علاوه بر آن با قرارگیری پایه پل در مسیر جریان به علت تغییر در ساختار جریان، گرداب‌هایی در اطراف پایه شکل می‌گیرند که به عنوان عوامل اصلی آبشستگی در اطراف پایه پل معرفی شده‌اند. گرداب‌های نعل اسبی در مقابل و گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه از از عوامل مهم ایجاد آبشستگی در اطراف پایه‌های پل می‌باشند (۹).

محققین بسیاری از گذشته تاکنون با روش‌های آزمایشگاهی و عددی سعی در بررسی ساختار جریان اطراف پایه‌های پل در مسیرهای مستقیم داشته‌اند. از آن جمله باربویا و دی (۳)، در یک مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از سرعت سنج صوتی داپلری میدان جریان متلاطم سه بعدی پیرامون یک دیواره کناری شبه استوانه‌ای با

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: delaramhooshmand2000@yahoo.com)
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

Archive of SID
www.SID.ir

مقطع دایره‌ای که به صورت عمودی در یک کانال مستطیلی نصب شده بود را اندازه گرفتند. آن‌ها مولفه‌های سرعت لحظه‌ای، مولفه‌های شدت آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی و تنش‌های رینولدز را در صفحاتی که با زوایای مرکزی متفاوت نسبت به مرکز استوانه در نظر گرفته شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این پژوهش وجود جریان های گردابی اولیه در بالادست استوانه را نشان داد.

خواجه‌نوری (۱)، وضعیت الگوی جریان اطراف پایه‌های پل و نیز اثر فاصله بین آن‌ها بر الگوی جریان و آبشستگی موضعی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل نشان داد که حداقل مقدار سرعت طولی در حفره آبشستگی اتفاق می‌افتد. همچنین در مورد تمامی حالات جهت سرعت عمودی در بالادست پایه‌ها، حتی بعد از به تعادل رسیدن گودال آبشستگی منفی بوده است. صلاح‌الدین و همکاران (۱۳) با استفاده از کد تجاری Fluent به شبیه‌سازی جریان آشفته اطراف پایه‌های پل با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی K-ε پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که اگر چه مدل های K-ε استاندارد و RNG قادر به محاسبه جریان اطراف پایه های پل هستند اما در محاسبه سرعت نزدیک بستر بیش برآورد دارند. از طرفی هر چند مدل realizable K-ε در میان مدل‌های K-ε به عنوان یک مدل بهبود یافته شناخته می‌شود، اما در تخمین سرعت جریان و توزیع تنش برشی در این مطالعه بسیار ضعیف عمل کرد. بارانیا و همکاران (۲) به توسعه یک مدل عددی سه بعدی برای حل معادلات ناویر استوکس با استفاده از مدل آشفتگی K-ε و الگوریتم شبکه آشیانه‌ای (تو در تو) پرداختند. ایشان نتایج مدل خود را با نتایج حاصل از مدل فیزیکی از میدان جریان اطراف استوانه‌های دایره‌ای شکل مجزا و دوتایی در بستر مسطح مقایسه کردند. نتایج حاصله از این مطالعه نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده از سرعت جریان، انرژی سینماتیک آشفته و توزیع تنش برشی کف، هم‌پوشانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

از طرفی درک هیدرولیک جریان در قوس رودخانه، جریان‌های ثانویه و پیچیدگی آن توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است. رامامورتی و همکاران (۱۱) با استفاده از دو کد تجاری PHOENICS و Fluent و سه مدل آشفتگیRNG k-ε، RSM و LES به شبیه‌سازی سه بعدی پارامترهای جریان در خم ۹۰ درجه پرداختند. ایشان برای مدل سازی سطح آب از سه روش مختلف حجم سیال، صفحه صلب و متخلخل بهره بردند. با مقایسه نتایج حاصله و داده‌های آزمایشگاهی بهترین نتایج از کد تجاری فلوئنت با استفاده از مدل آشفتگی RSM و روش حجم سیال بدست آمد.

بنابر آنچه که در مورد الگوی جریان درون قوس و اطراف پایه‌های پل شرح داده شد، الگوی جریان در قوس به همراه پیچیدگی جریان حول پایه استوانه‌ای شرایط الگوی جریان حول پایه در قوس را پیچیده‌تر می‌سازد. از آن جایی که برخی از پل‌ها در مسیر رودخانه در محل قوس ساخته شده‌اند و با توجه به ساختار متفاوت جریان در چنین بازه‌هایی در مسیر رودخانه و همچنین اهمیت بررسی ساختار جریان و تخمین عمق آبشستگی در اطراف پایه پل، مطالعه بیشتر ساختار جریان در اطراف پایه‌های پل واقع در مئاندرها ضروری به نظر می‌رسد. از این رو هدف از این پژوهش بررسی عددی جریان اطراف پایه پل واقع در یک مسیر خمیده و انتخاب بهترین مدل آشفتگی برای مدل سازی عددی جریان اطراف پایه پل در قوس می باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی مئاندری شکل به طول ۸۰ متر، عرض۱/۲متر و ارتفاع ۰/۵ متر واقع در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس ورق گالوانیزه و کف آن بتنی می‌باشد. کانال مذکور شامل یک حوضچه آرام کننده جریان در ورودی، سازه مستقیم به طول ۹/۹ متر و ۵ مئاندر با زاویه ۱۰۰ درجه می‌باشد. شعاع قوس داخلی ۱/۸۰ متر و شعاع قوس خارجی ۳ متر می‌باشد. فاصله بین رئوس مئاندرها از یکدیگر ۷/۵۶ متر می‌باشد. درجه پیچانی کانال ۱/۸ و شعاع نسبی کانال ۲/۴ متر می‌باشد. یک دریچه کشویی برای تأمین عمق مورد نظر در پایین دست فلوم نصب شده است. برای پرهیز از اثر جریان جانبی به وسیله دیواره‌ها روی آبشستگی موضعی اطراف پایه، رادکیوی و اتما (۱۰) حداکثر نسبت عرض پایه به عرض کانال را ۱:۶/۲۶بیان کرده‌اند. همچنین طبق نظر ملویل (۸) قطر پایه نباید از ۱۰ درصد عرض کانال بیشتر باشد. در این پژوهش برای اطمینان بیشتر، نسبت قطر پایه به عرض کانال ۱:۱۷ در نظر گرفته شده که با احتساب ۱۲۰ سانتیمتر عرض کانال، قطر پایه ۷ سانتیمتر انتخاب شد. شکل ۱ نمایی از کانال آزمایشگاهی مذکور را به همراه محل قرارگیری مدل پایه پل نشان می دهد. جدول ۱ محدوده تغییرات مشخصه‌های هیدرولیکی جریان را نشان می دهد.

جدول۱- مشخصات هیدرولیکی جریان در مدل آزمایشگاهی

Re	Fr	v (m/s)	h (m)	Q (Lit/s)
۳۰۰۰۰	۰/۲۸	۰/۳	۰/۱۲	۴۳/۳

در جدول ۱، Q نشان دهنده دبی بر حسب لیتر بر ثانیه، h عمق جریان بر حسب متر و v سرعت متوسط بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.

برای مطالعه تغییرات سرعت از دستگاهMicro-ADV مدل Sontek AV-SP16M01 استفاده شد. برای اندازه‌گیری سرعت در کانال قوسی شکل توسط دستگاه ADV شبکه‌ای از نقاط فرض شد.

Archive of SID

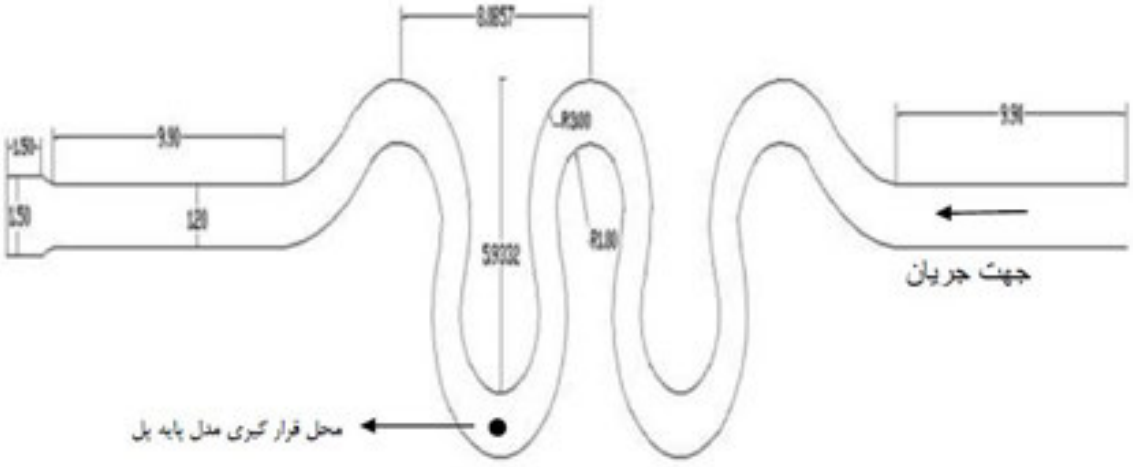
www.SID.ir

به طوری که در موقعیت‌های مکانی مختلف تغییرات سرعت در ۵ الی۶ مقطع شعاعی در طول کانال (در وسط کانال، شعاع‌های ۱۰ و۲۰ درجه در بالادست محل قرارگیری پایه و شعاع‌های ۱۰، ۲۰ و در مواردی ۵ درجه در پایین‌دست محل قرارگیری پایه) به مدت ۶۰ ثانیه و با فرکانس ۵۰ هرتز ثبت گردید. هر مقطع به ۱۲ قسمت ۵ یا ۱۰ سانتیمتری تقسیم شد. به این ترتیب که اولین نقطه در هر مقطع در فاصله ۱۰ سانتیمتری از دیواره درونی قرار داشته و سپس با فاصله ۱۰ سانتیمتری نقاط بعدی اندازه‌گیری گردید و در نزدیکی پایه فاصله نقاط اندازه‌گیری به ۵ سانتیمتر تقلیل یافت تا خصوصیات جریان در این منطقه وضوح بیشتری یابد. آخرین نقطه در هر مقطع در فاصله ۱۰ سانتیمتری از دیواره بیرونی قرار داشت. اندازه‌گیری‌ها در اعماق مختلف ۱، ۲، ۴ و ۸ سانتیمتری انجام گرفت. در در شکل ۲ تصویری شماتیک از نقاط داده برداری توسط ADV نشان داده شده است.

مشخصات مدل عددی

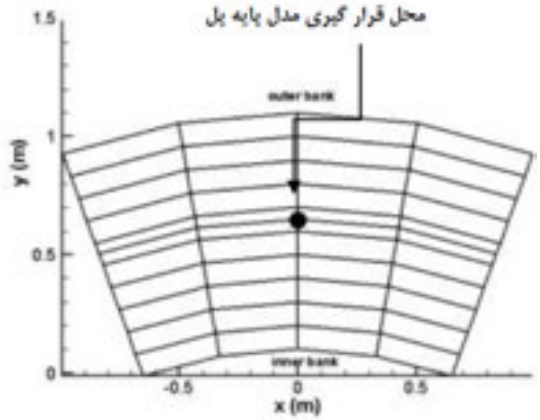
معرفی نرم افزار Fluent

نرم افزار Fluent یکی از کامل‌ترین، قوی‌ترین و کاربردی‌ترین نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌باشد که قابلیت مدل‌سازی جریان‌های هیدرولیکی مانند جریان‌های دو یا چند فازی (جریان‌های حمل کننده رسوب، پرش هیدرولیکی و غیره) و همچنین مدل‌سازی جریان‌های سطح آزاد را دارد. این نرم افزار امکان انجام محاسبات با دقت معمولی و مضاعف را به صورت دو بعدی و سه بعدی دارا می‌باشد. از این رو برای شبیه‌سازی عددی ساختار جریان در اطراف پایه پل در قوس به عنوان یک جریان سطح آزاد دو فازی (آب و هوا) در این پژوهش از این نرم افزار در بسته نرم افزاری ANSYS نسخه 14.5 استفاده شد. یکی دیگر از قابلیت‌های مهم نرم‌افزار برای بالا بردن سرعت محاسبات اجرای موازی برنامه می‌باشد. در این پژوهش جهت رسیدن به زمان کمتری برای محاسبات با استفاده از این قابلیت نرم‌افزار از دو رایانه با پردازشگر i7 در مرکز آمار و اطلاعات دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی

www.SID.ir



شکل ۲- نمای بالا از نحوه شبکه بندی نقاط داده برداری شده برای اندازه گیری سرعت

معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان در رودخانه‌ها و مجاری روباز بر اساس معادلات سه بعدی میانگین‌گیری شده به روش رینولدز در شرایط جریان آشفته و ناماندگار به صورت زیر بیان می شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]+\frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j} \qquad (۲)$$

که در آن‌ها، u_i مولفه سرعت در جهت x_i (i=1,2,3 به ترتیب برای جهت‌های x, y و z)، P فشار، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی و جملات $\tau_{ij}=-\rho u_i' u_j'$ به عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند (۷). بنابراین سیستم معادلات فوق بسته نیست و باید با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنش‌های رینولدز محاسبه شوند. از جمله مدل‌های آشفتگی موجود در نرم افزار که در این پژوهش از آنها بهره برده شد می‌توان به مدل های آشفتگیK-ε، K-ω و مدل RSM اشاره کرد. جزییات این سه مدل در راهنمای نرم‌افزار فلوئنت به طور مبسوط شرح داده شده است.

گسسته سازی معادلات و روش حجم سیال

یکی از چالش‌های مطرح شده در بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی تعیین سطح مشترک دو یا چند فاز سیال می‌باشد. برای حل این چالش مدل حجم سیال VOF اولین بارتوسط هایرت و نیکولاس با فرض اینکه دو یا چند سیال با هم ترکیب نمی‌شوند، پیشنهاد شد (۶). این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی یا چند فازی که در آن فازهای مختلف دارای مرزهای قابل تشخیص از یکدیگر هستند به کار برده می‌شود. از آن جایی که جریان‌های متداول با سطح آزاد جریان‌های دوفازی می‌باشند که فاز هوا به وسیله سطح آزاد از فاز زیرین آن یعنی آب جدا شده است، در این پژوهش از این مدل جهت شبیه‌سازی استفاده شد.

در مدل حجم سیال متناسب با کسر حجمی هر فاز در سلول محاسباتی، یک متغیر برای آن فاز در نظر گرفته می‌شود. نسبت حجمی هر فاز در حجم کنترل برابر درصد حجم اشغال شده توسط هر فاز می‌باشد. از این‌رو در هر حجم کنترل مجموع کسرهای حجمی تمام فازها برابر ۱ می‌باشد. بنابراین اگر نسبت حجمی سیال q در سلول به صورت αq نشان داده شود یکی از سه شرایط زیر در هر سلول برقرار است:

الف) αq=0 سلول از سیال q خالی باشد.

ب) αq=1 سلول پر از سیال q باشد.

ج) 0<αq<1 سلول حاوی سطح مشترک بین سیال q و یک یا چند سیال دیگر می‌باشد.

از روش‌های مختلف حل مدل حجم سیال در نرم افزار Fluent می‌توان به روش‌های صریح[1]، ضمنی[2]، بازسازی هندسی[3] و دهنده - گیرنده[4] اشاره کرد. در روش بازسازی هندسی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، سطح مشترک جریان بین دو فاز به روش خطوط جز[5] بدست می‌آید. در این روش فرض بر آن است که فصل مشترک دو سیال در هر سلول به صورت خط شیب‌دار بوده و جابه‌جایی سیال در سلول‌ها با توجه به شکل خطوط به دست می‌آید (۵).

1- Explicit
2- Implicit
3- Geometric Reconstruction
4- Donor-Acceptor
5 -Piecewise-linear approach

Archive of SID

www.SID.ir

پیاده‌سازی مدل

جهت تهیه هندسه میدان جریان، شبکه بندی آن و اختصاص دادن انواع شرایط مرزی از نرم افزار پیش پردازنده گمبیت نسخه GAMBIT2.4.6 استفاده شد. برای کاهش زمان محاسبات تنها بخشی از کانال آزمایشی شامل قوسی از کل کانال قوسی شکل که پایه پل در آن تعبیه شده بود، مدل‌سازی شد. برای رسیدن به نیمرخ جریان یکنواخت در مرز ورودی و اطمینان از توسعه یافتگی کامل جریان در ابتدای قوس و عدم تاثیر جریان خروجی بر شرایط جریان اطراف پایه در انتهای قوس، از یک مسیر مستقیم جریان به طول ۲ متر استفاده شد. برای شبکه‌بندی هندسه مدل از الگوریتم Map استفاده شد. برای کنترل عدم تاثیر اندازه سلول‌ها بر نتایج حاصل از حل عددی چهار نوع شبکه‌بندی با ابعاد مختلف که در نزدیکی پایه و کف کانال ریزتر می‌شدند، در نظر گرفته شد و سپس با در نظر گرفتن معیارهای دقت و سرعت همگرایی جواب‌های حاصل، شبکه مناسب انتخاب گردید. شکل ۲ مقدار تغییر مجذور مربعات خطای مقادیر شبیه‌سازی سرعت نسبت به مقادیر آزمایشگاهی را برای تعداد شبکه محاسباتی مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل دیده می‌شود با افزایش سلول‌های محاسباتی مقادیر مجذور مربعات خطا کاهش یافته و در نهایت به مقدار تقریبا ثابتی می‌رسد. در نهایت تعداد شبکه محاسباتی برای حل عددی مناسب تشخیص داده شد که در آن مقدار خطا افزایش پیدا نکند. بنابراین با توجه به شکل ۳ شبکه‌بندی با ۲۴۸۰۰۰۰ سلول محاسباتی جهت حل عددی بدست آمد. شکل ۴ نمایی از شبکه بندی اطراف پایه را در مدل عددی نشان می‌دهد.

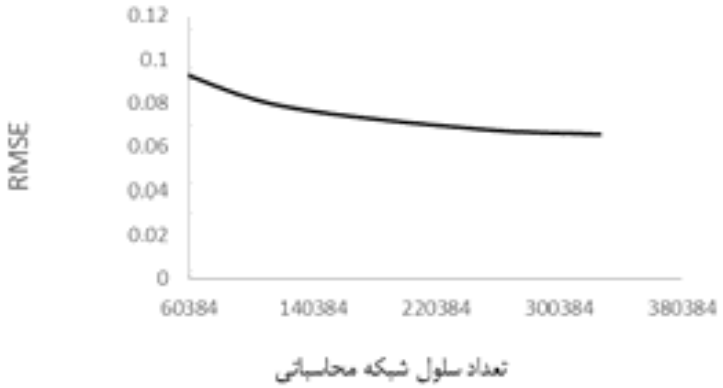
شرایط مرزی شامل مرزهای مقطع ورودی، مقطع خروجی، دیواره‌ها و سطح آزاد جریان می‌باشد. در مقطع ورودی برای مرز آب و هوا به طور جداگانه از شرط مرزی سرعت مشخصه استفاده شد. با این شرط که در تمام مرز ورودی آب به طور دائم جریان داشته باشد و در مرز ورود هوا نیز سرعت ورود هوا برابر صفر در نظر گرفته شد. در خروجی از شرط مرزی خروجی جریان با فشار ثابت استفاده شد. در سطح آزاد جریان نیز فشار هوا به عنوان شرط مرزی سطح بالایی کانال به مدل اعمال گردید. از آنجایی که دیواره‌های کانال مدل فیزیکی از جنس ورق گالوانیزه صیقلی بودند شرط مرزی دیواره برای دیواره‌های کانال و در کف کانال نیز شرط مرزی دیواره با زبری معادل بتن به میزان ۰/۵ میلیمتر به مدل اعمال گردید. جهت تعیین فاصله اولین گره در راستای عمود بر دیوار از رابطه ۳ استفاده شد.

$$y^+ = \frac{u^* y}{\vartheta} \qquad (۳)$$

برای آنکه قانون جدار در فاصله y معتبر باشد، y باید به گونه‌ای انتخاب شود که پارامتر +yدر رابطه ۶ در فاصله‌ی ۳۰ تا ۳۰۰۰ باشد در این رابطه y فاصله مرکز سلول واقع تا جدار کانال است (۴). از این رو با توجه به مطالب ذکر شده فاصله گره ها در ارتفاع کانال از هم برابر ۱ سانتیمتر تا سطح آب در نظر گرفته شد و از آن به بعد تا سطح کانال با نسبت ۱/۳ افزایش داده شد. همچنین در مقطع طولی در نزدیکی سازه این فاصله برابر ۰/۵ سانتیمتر و در فواصل دورتر تا ۸ سانتیمتر افزایش داده شد. در مقطع عرضی نیز در نزدیکی پایه ۰/۵ سانتیمتر و در فواصل دورتر تا ۲ سانتیمتر افزایش داده شد.

ارزیابی مدل

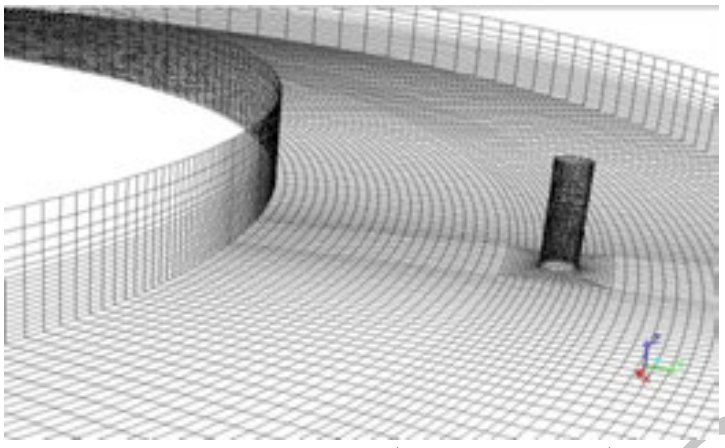
شبیه‌سازی عددی جریان اطراف پایه پل واقع در مدل فیزیکی قوس رودخانه با استفاده از سه مدل آشفتگی K-ε، K-ω و RSM صورت پذیرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سرعت توسط این سه مدل با نتایج آزمایشگاهی سرعت مورد مقایسه قرار گرفت. جهت انتخاب بهترین مدل آشفتگی در حل عددی جریان مقادیر سرعت طولی برای هر سه مدل در نقاط مختلف شبکه بندی با آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۵ پروفیل سرعت طولی بدست آمده از هر سه مدل آشفتگی در حل عددی و همچنین نتایج آزمایشگاهی را در مقطع ۹۰ درجه از ابتدای قوس نشان می‌دهد.



شکل۳- مقادیر مجذور مربعات خطا برای اندزه شبکه محاسباتی مختلف

Archive of SID

www.SID.ir

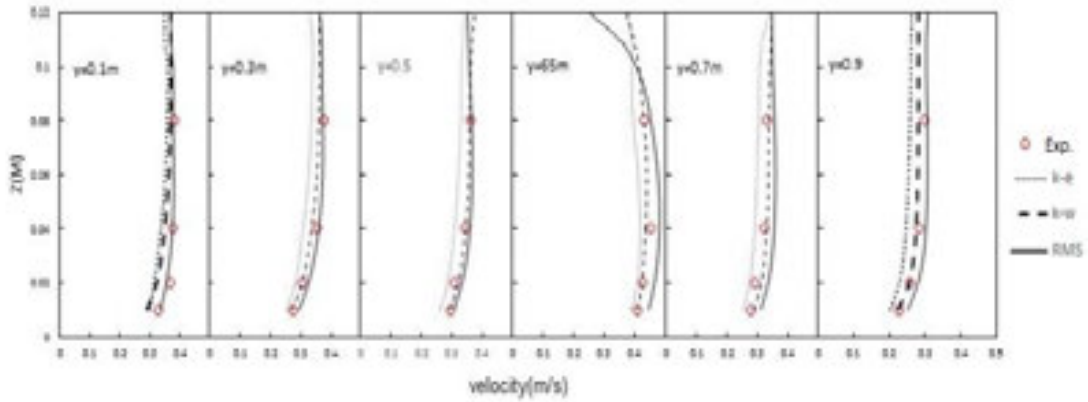


شکل ٤- نمای سه بعدی شبکه بندی محدوده محاسباتی

در این شکل پروفیل سرعت در مقاطع عرضی مختلف نسبت به قوس داخلی جهت مقایسه آورده شده است. به گونه‌ای که مقطع عرضی y=۰/۱ بیانگر مقطعی است که ۰/۱ متر از قوس داخلی فاصله دارد. نتایج هر سه مدل آشفتگی در شبیه سازی عددی دارای روندی مشابه نتایج مدل آزمایشگاهی می باشند. در تمام مدل‌ها سرعت در قوس داخلی به سمت قوس خارجی در حال کاهش می باشد اما در نزدیکی پایه (مقطع عرضی y =۰/۶۵) سرعت افزایش داشته است. نتایج حاکی از آن است که مدل تنش رینولدز و K-ω نسبت به مدل K-ε در مدل‌سازی عددی بهتر عمل کرده اند. در اکثر موارد مدل آشفتگی K-ε در تخمین سرعت نسبت به نتایج آزمایشگاهی کم برآورد داشته است. قدرمطلق خطای ۶ درصد برای مدل آشفتگی K-ε و ۵/۵ و ۵ درصد به ترتیب برای مدل آشفتگی K-ω و RSM موید عملکرد بهتر این دو مدل نسبت به مدل آشفتگی K-ε می‌باشد. لذا در ادامه پژوهش به انتخاب بهترین مدل آشفتگی از میان دو مدلی که نتایج بهتری را در شبیه‌سازی نشان دادند یعنی مدل‌های آشفتگی K-ω و RSM پرداخته شد.

نتایج و بحث

جهت انتخاب بهترین مدل شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه توسط این دو مدل (K-ω وRSM) مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت دستیابی به این هدف بردارهای جریان ثانویه در ۴ مقطع شعاعی مختلف از کانال (۸۰، ۹۰، ۱۰۰و ۱۱۰ درجه از ابتدای قوس) با استفاده از دو مدل مذکور رسم گردید. از آنجایی که پایه پل در مقطع ۹۰ درجه از قوس قرار داشت این مقاطع به گونه‌ای انتخاب شدند که جریان قبل و بعد از پایه را به خوبی پوشش دهند. شکل ۶ خطوط جریان ثانویه مدل‌سازی شده توسط مدل آشفتگی K-ω و RSM را در مقاطع مختلف از قوس نشان می‌دهد.



شکل ٥- مقایسه نیمرخ سرعت طولی در مقطع شعاعی ۹۰ درجه (محل قرار گیری پایه) در مقاطع عرضی مختلف حاصل از مدل‌سازی عددی با مدل های مختلف آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی

Archive of SID

www.SID.ir

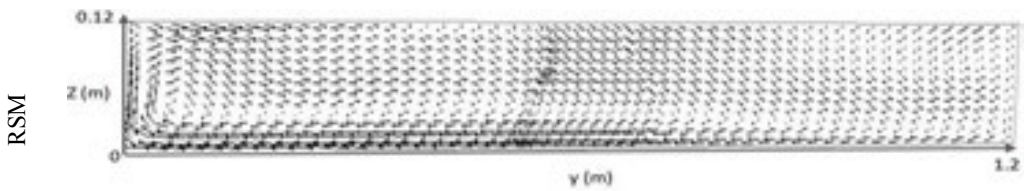
از شکل ۶ استنباط می‌شود که در مقطع شعاعی ۸۰ درجه از ابتدای قوس، قبل از محل قرارگیری پایه پل، دو مدل آشفتگی مذکور تقریبا در شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه موجود به صورت مشابه عمل کرده‌اند. اما در مقاطع پایین‌دست محل قرارگیری پایه به جهت اضافه شدن جریان‌های ثانویه حاصل از وجود پایه در مسیر جریان به جریان‌های ثانویه موجود در قوس، آشفتگی در مسیر جریان افزایش پیدا کرده است که مدل RSM در شبیه‌سازی این جریان های آشفته بهتر از مدل K-ω عمل کرده است. بنابراین با توجه به نتایج آماری و نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه مدل آشفتگی RSM نسبت به دو مدل دیگر در مدل‌سازی سه بعدی جریان اطراف پایه‌های پل، تواناتر عمل کرده است. مدل RSM برای شبیه‌سازی آشفتگی، در جریان کاملا غیر همگن و غیر ایزوتروپ کاربرد دارد. از این رو جهت مدل‌سازی سه بعدی داخل قوس که جریان‌های ثانویه علاوه بر جریان اصلی درون کانال وجود دارند بهتر عمل کرده است. هر چند این مدل دقت بالاتری در حل سه بعدی انجام شده داشت، اما به دلیل پیچیدگی معادلات ریاضی، حل توسط این مدل نسبت به دو مدل دیگر طولانی‌تر بود.

با توجه به شکل ۶ بعد از محل قرارگیری پایه در کانال قوسی شکل، جریان‌های ثانویه‌ای در نزدیکی مرکز کانال به سمت قوس داخلی مشاهده می‌شوند. این جریان‌های ثانویه به شکل گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه پل قابل مشاهده هستند. وجود همین گردابه‌ها باعث امکان آبشستگی در پشت پایه می‌شود. با مقایسه جریان‌های ثانویه در پشت پایه (مقاطع ۱۰۰ و ۱۱۰ درجه)، می‌توان به این نکته پی برد که با قرارگیری پایه در مرکز قوس در پایین‌دست، گردابه‌های برخاستگی به سمت قوس داخلی منحرف شده و بنابراین حفره آبشستگی در پشت پایه را به سمت قوس داخلی متمرکز می‌کند.

در شکل ۷ منحنی‌های هم‌سرعت در جهت طولی، و در اعماق مختلف از کف کانال برای نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و داده‌های حاصل از مدل فیزیکی نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۶ مشهود است تمام نتایج حاصل از آزمایش عددی و مدل فیزیکی حاکی از آن است که در تمام اعماق سرعت طولی در نزدیکی قوس داخلی بیشتر است و با پیش‌روی به سمت قوس خارجی از مقدار آن کاسته می‌شود. رخداد این پدیده را می‌توان به شکل و زاویه قوس کانال نسبت داد. به طوری که محل تشکیل سرعت حداکثر در قوس سوم مدل فیزیکی در نزدیکی دیواره داخلی بوده و در ادامه به سمت قوس بیرونی حرکت می‌کند. در اطراف پایه روند کاهش سرعت از قوس داخلی به سمت قوس خارجی تغییر می‌کند به طوری که در اطراف پایه سرعت ابتدا کاهش یافته و سپس با پیش‌روی به سمت کناره‌ها افزوده می‌شود. مقدار حداکثر سرعت طولی در مدل‌سازی عددی برابر ۰/۳۶ متر بر ثانیه و در محدوده بین پایه و قوس داخلی در نزدیکی سطح آب مشاهده گردید. در رابطه با نتایج آزمایشگاهی این مقدار برابر ۰/۳۸ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. برای هر دو نوع مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی مقدار حداقل سرعت طولی در محدوده پشت پایه به دست آمد. هر چند نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی در برآورد مقادیر سرعت طولی اندکی تفاوت داشتند اما روند تغییرات سرعت در هر دو نوع مدل‌سازی مشابه یکدیگر بود. برای دست‌یابی به دید بهتری از چگونگی تغییرات سرعت اطراف پایه یک آزمایش عددی در حالتی که هیچ پایه پلی در کانال قوسی شکل وجود نداشت انجام گرفت.

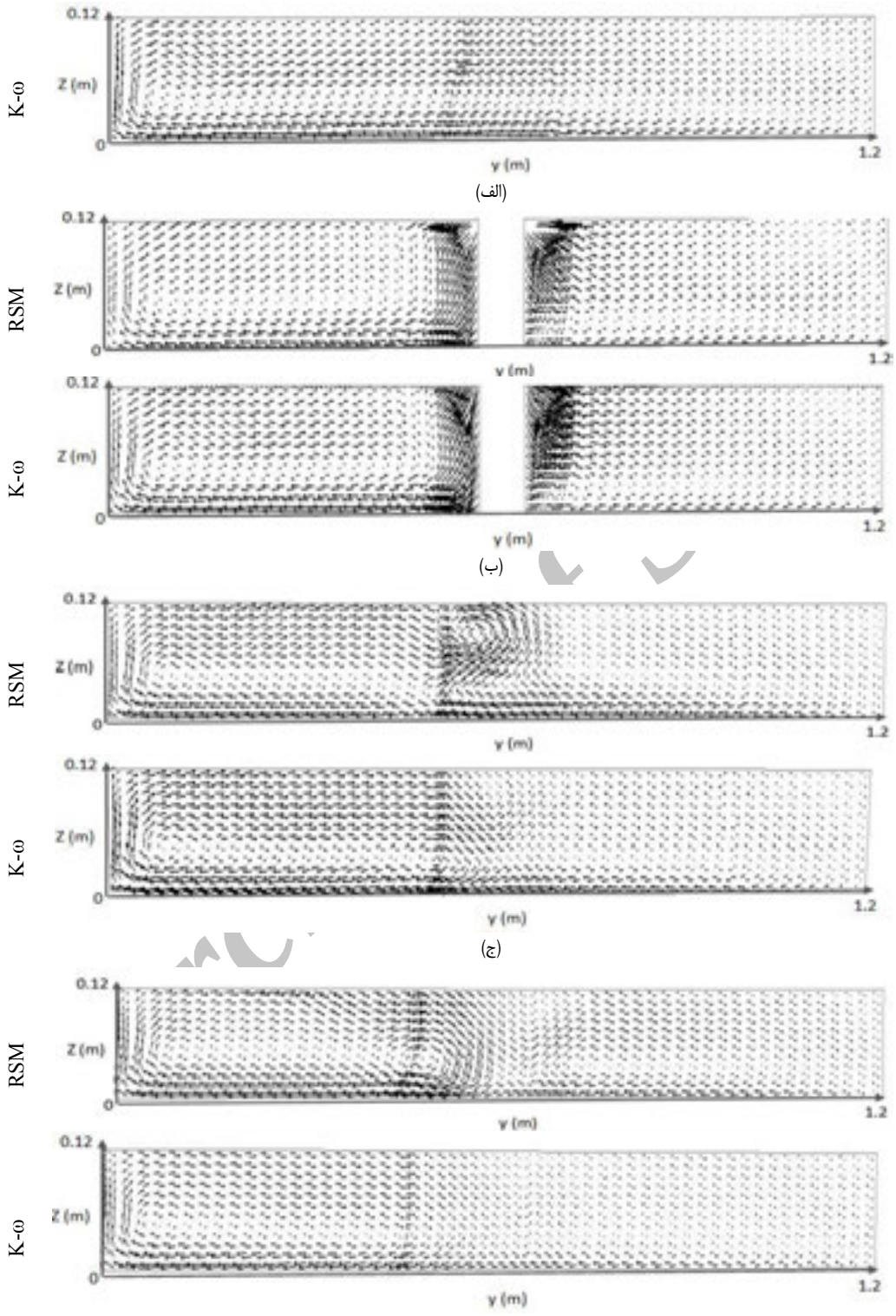
شکل ۸ تغییرات سرعت در اعماق مختلف حاصل از نتایج مدل عددی حل جریان در کانال قوسی شکل بدون حضور پایه پل را نشان می دهد. با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان به این نتیجه رسید که هر چند تغییرات چندانی در سرعت جریان در قوس داخلی به سبب وجود پایه نسبت به قوس بدون پایه رخ نداده است اما قرارگیری پایه در میانه قوس باعث افزایش سرعت جریان در قوس خارجی شده است. از آنجایی که قوس خارجی محل فرسایش رسوبات می‌باشد این افزایش سرعت جریان ممکن است فرسایش کناره خارجی قوس را تشدید کند.

شکل ۹ پروفیل سرعت طولی در اطراف پایه و در پایین دست پایه که محل شکل‌گیری گردابه‌های برخاستگی می‌باشد را نشان می‌دهد. آنگونکه که انتظار می‌رود می‌بایست سرعت از سمت قوس داخلی به قوس خارجی روند کاهشی داشته باشد اما همانطور که دیده می‌شود پس از محل قرار گیری پایه (y=۰/۶۵)، روند کاهشی سرعت تغییر کرده است و سرعت دوباره اندکی افزایش پیدا کرده است و این به علت تاثیر پایه بر جریان و ناشی از گردابه‌های ایجاد شده در پشت پایه می‌باشد. با توجه به شکل مدل عددی در این مقطع از کانال هم هماهنگی خوبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.



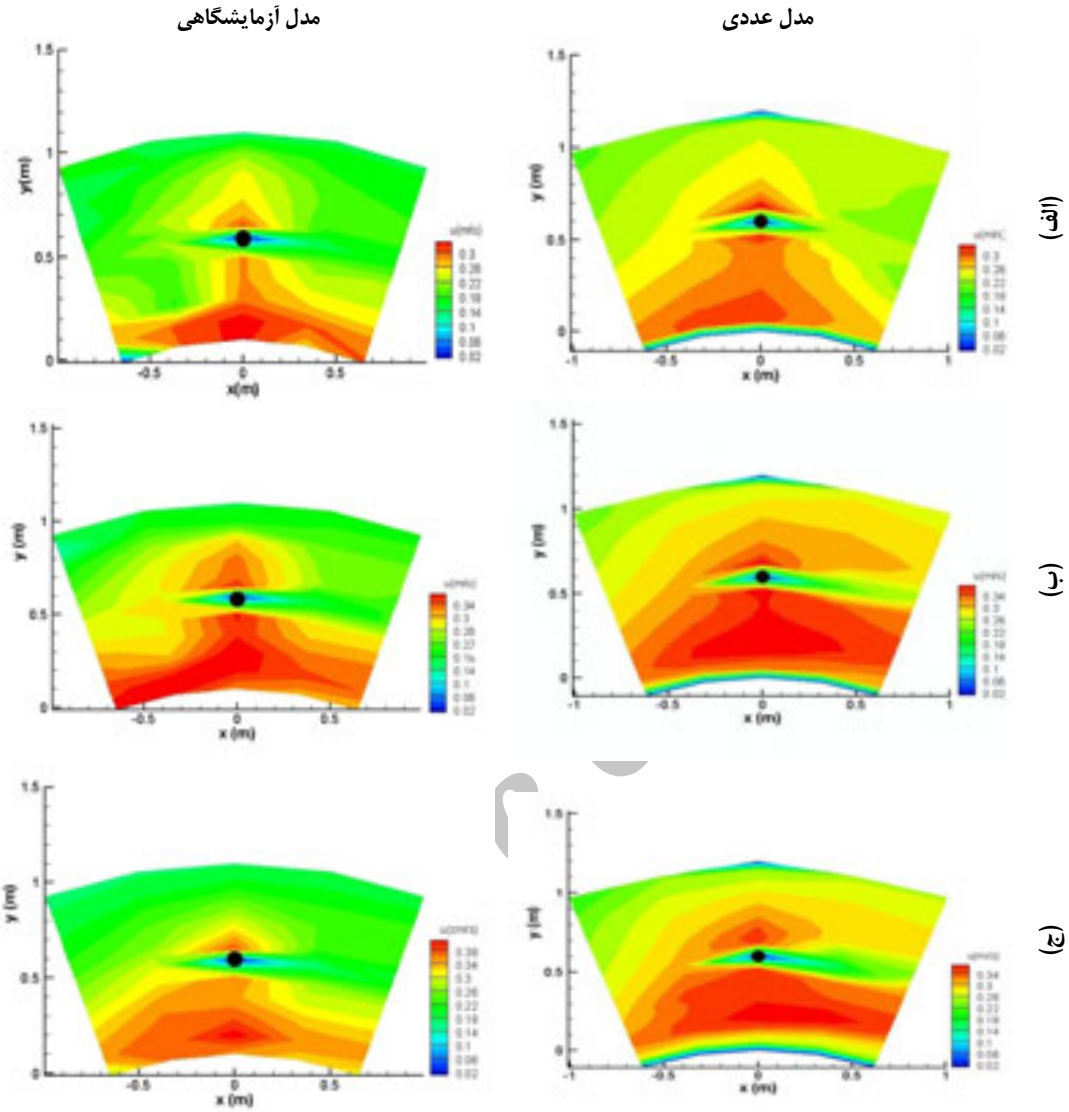
Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٦- جریان های ثانویه شبیه سازی شده توسط مدل‌های RSM و K-ω در مقاطع شعاعی (الف) ۸۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۰۰ و (د)۱۱۰ درجه از ابتدای قوس

www.SID.ir



شکل۷- کانتورهای سرعت طولی حاصل از شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی جریان اطراف پایه در (الف) نزدیکی کف کانال(۱cm) ، (ب) عمق میانه (٤cm)، و (ج) نزدیکی سطح آب(۸cm)

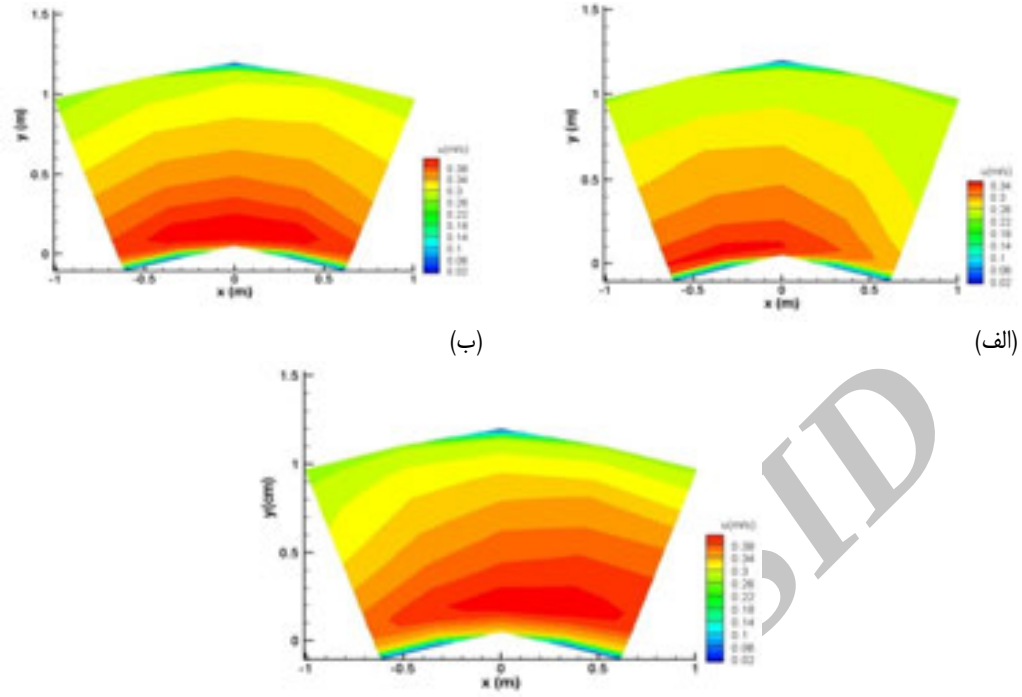
هرچند که در نزدیکی پشت پایه خطای برآورد سرعت افزایش پیدا کرده است و بین نتایج عددی و آزمایشگاهی انحراف بیشتری دیده می‌شود اما در همین ناحیه نیز مدل آزمایشگاهی توانسته است روند تغییرات سرعت را به خوبی تخمین بزند.

وجود پایه پل در مسیر جریان باعث به وجود آمدن گردابه‌های برخاستگی در پایین دست پایه پل می‌شود که این گردابه‌ها به سمت قوس داخلی در پایین‌دست متمرکز می‌گردند. برای دستیابی به محل منتهی الیه تشکیل این گردابه‌ها در پایین‌دست پایه به مقایسه متوسط قدرت جریان‌های ثانویه در طول کانال در حالتی که پایه پل در کانال تعبیه شده و حالتی که در مسیر جریان هیچ مانعی وجود ندارد پرداخته شد. برای این منظور از معیار Vorticity استفاده شد که به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$\xi = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \qquad (۴)$$

که در این رابطه ξ معیاری از قدرت جریان‌های ثانویه (چرخش) بر حسب معکوس زمان (ثانیه)، u و v به ترتیب سرعت‌های مماسی و شعاعی بر حسب متر بر ثانیه می‌باشند.

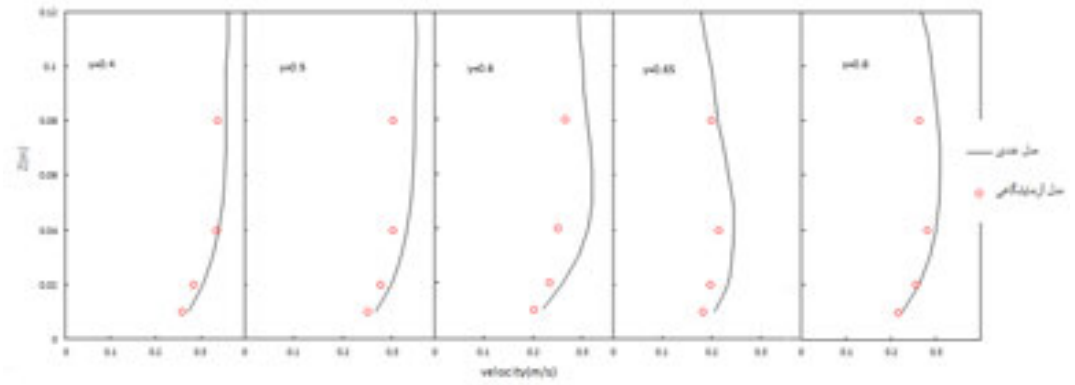
www.SID.ir



(الف) (ب)

(ج)

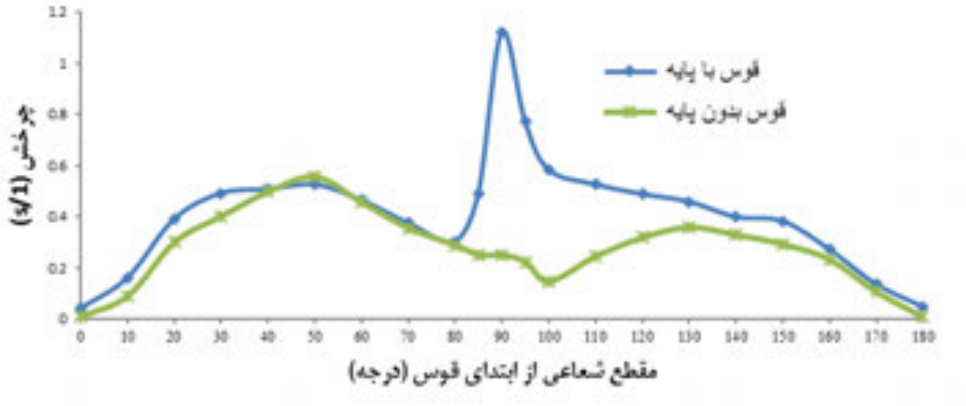
شکل۸- کانتورهای سرعت طولی حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان در قوس بدون پایه در (الف) نزدیکی کف کانال(۱cm) ، (ب) عمق میانه (٤cm)، و (ج) نزدیکی سطح آب(۸cm)



شکل ۹- نیمرخ سرعت طولی در مقطع شعاعی ۱۰۰ درجه از ابتدای قوس (پایین دست محل قرارگیری پایه) در مقاطع عرضی مختلف حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

شکل ۱۰ مقادیر چرخش را به عنوان معیاری برای مقایسه قدرت جریان‌های ثانویه در مقاطع مختلف شعاعی از ابتدای قوس در حالتی که پایه در قوس تعبیه شده و حالتی که پایه ای در قوس وجود ندارد، نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل بر می‌آید در مقطع ۹۰ درجه که محل قرارگیری پایه در قوس می‌باشد، قدرت جریان‌های ثانویه به علت حضور پایه افزایش چشم‌گیری داشته است. پس از آن نیز در پایین‌دست پایه تا مقطع ۱۵۰ درجه افزایش قدرت جریان‌های ثانویه نسبت به حالت بدون پایه حاکی از اثر گردابه‌های برخاستگی و جریان‌های ثانویه تشکیل شده به علت وجود پایه می‌باشد. هر چند که با فاصله گرفتن از پایه این افزایش قدرت گردابه‌های ثانویه نسبت به کانال بدون پایه روند کاهشی داشته است.

www.SID.ir



شکل۱۰- متوسط قدرت جریان‌های ثانویه در مقاطع شعاعی مختلف قوس با و بدون حضور پایه پل

نتیجه گیری

در این پژوهش به مدل‌سازی سه بعدی جریان اطراف پایه پل واقع در قوس توسط سه مدل آشفتگی K-ε، K-ω و مدل تنش رینولدز (RMS) پرداخته شد. نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل تنش رینولدز در مدل‌سازی سرعت و جریان‌های ثانویه می‌باشد. نتایج مقایسه الگوی بردارهای سرعت مدل‌سازی شده و داده‌های آزمایشگاهی در اعماق مختلف نشان داد که وجود پایه در میانه قوس باعث تغییر محدوده رخداد سرعت‌های حداکثر در قوس شده به طوری که این محدوده را از نزدیکی قوس داخلی تا نزدیکی قوس خارجی امتداد داده است. همچنین نتایج حاصل از مقایسه جریان‌های ثانویه در مقاطع مختلف در کانال قوسی بدون پایه و با پایه نشان‌دهنده گسترش این جریان‌ها تا مقطع ۱۵۰ درجه از قوس در پایین‌دست پایه بوده و وجود پایه در میانه کانال باعث جهت‌گیری جریان‌های ثانویه به سمت قوس داخلی در پایین‌دست پایه می‌باشد.

منابع

۱- خواجه نوری ل. ۱۳۸۵. بررسی ساختار متلاطم جریان در اطراف پایه های پل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب.

2- Baranya S., Olsen N.R.B., Stoesser T., and Sturm T. 2012. Three-dimensional RANS modeling of flow around circular piers using nested grids. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 6:648-662.

3- Barbhuiya A.K., and Day S. 2003. Measurement of turbulent flow field at a vertical semicircular cylinder attached to the side wall of a rectangular channel. Flow measurement and Instrumentation, 15:87-96.

4- Celik I.B. 1999. Introductory Turbulence Modeling, Western Virginia University.

5- FLUENT 6.3 User's Guide. 2006. Fluent Incorporated, Lebanon, N.H.

6- Hirt C.W., and Nichols B.D. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free Boundarie, Journal of Computational Physics, 39:201- 225.

7-Ingham D. B., and Ma L. 2005. Fundamental equations for CFD in river flow simulations, John Wiley & Sons.

8- Melville B.W. 1984. Live bed scour at bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering. 110(9): 1234-1247.

9- Melville B.W., and Raudkivi A.J. 1977. Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers, Am.Soc. Civ. Eng., J. Hydr. Engrg, 15(4): 373-380.

10- Raudkivi A.J. and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers, Journal of Hydraulic Engineering. 109(3): 339-350.

11- Ramamurthy A.S., Han S.S., and Biron P.M. 2012. Three-dimensional simulation parameters for 90° open channel bend flows, Journal of computing in civil engineering, 6:525-532.

12- Rozovskii I.L. 1957. Flow of water in bend of open channel, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering.

13-Salaheldin T.M., Imran J., and Chaudhry H. 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular pier, Journal of hydraulic engineering. 130 (2):91-100.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 27, No.5, Nov.-Dec. 2013, p. 973-984

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۷، شماره ۵، آذر – دی ۱۳۹۲، ص. ۹۸۴-۹۷۳

Numerical Modeling of Flow around Bridge Piers in Meandering Channel

D. Houshmand[1*]- K. Esmaili[2]- A. Keshavarzi[3]- A. Faridhosseini[4]

Received: 24-02-2013
Accepted:13-10-2013

Abstract

The existence of bridge pier in streamflow causes a complex 3D flow formation, which also causes the scouring around bridge pier. Since rivers are usually curved, it is necessary to investigate the impact of change in flow patterns caused by passage of flow through the curve on the scouring around bridge pier. By developing Computational Fluid Dynamics (CFD), there is a possibility to simulate the flow pattern around the bridge piers. Therefore, the purpose of this research is modeled a 3D flow stream near the bridge piers in a curved channel. For this purpose a fluent model software was employed, and solved by stream equations using finite volume method of centralism. For discretization of Navier Stocks equation, three turbulence models of K-ε, K-ω, and RSM were used. In order to consider free surface, Fluid Volume Method was applied. The numerical model was validated with measured experimental data around the bridge piers in the meandering flume with 5 sequential curve paths. The results showed that the RSM turbulence model performed well compared to the other two models. When comparing the flow of upstream to downstream of bridge piers it can be observed that the placement of bridge piers in the middle of curved shape channel may lead secondary flow towards the inner curve of a channel. Also, the resulted vortex continues with a 150 degree curve.

Keywords: Meander, Bridge pier, Turbulent models, Fluent

Archive of SID

1,2,4- PhD Student, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively
(*- Corresponding Author Email: delaramhooshmand2000@yahoo.com)
3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University

www.SID.ir