

مدل سازی عددی جریان در کانال های پیچان رودی با مقطع مرکب دوزنقه‌یی

فاطمه فرشی (دانشجوی دکتری)

عبدالرضا کبیری سامانی* (دانشیار)

محمدرضا چمنی (دانشیار)

حسین عطوف (دانش آموخته‌ی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۸)
دردی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۸۳-۷۵

f.farshi@cv.iut.ac.ir
akabiri@cc.iut.ac.ir
mchamani@cc.iut.ac.ir
h.atooof@me.iut.ac.ir

مدل سازی دقیق جریان های ثانویه در مسیر خم ها و پیچان رودها، اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر، با مدل سازی عددی در محیط نرم افزار اپنقوم، به بررسی ویژگی های هیدرولیکی جریان در یک کانال مرکب در مسیر پیچان رود پرداخته شده است. برای این منظور، معادلات حاکم، شامل رابطه های متوسط گیری شده ی رینولدزی (RANS) حل شده اند. با وجود رفتار دوفازی جریان در کانال های باز، با انتخاب حل گر و شرایط مرزی مناسب برای سطح آب می توان آن ها را به صورت تک فاز مدل کرد. در پژوهش حاضر، از شرط مرزی تقارن برای سطح آزاد آب استفاده و برای مدل سازی جریان آشفته از مدل های آشفته گی $k - \omega$ و $k - \varepsilon$ استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، با فاصله گرفتن از تاج خم، قدرت جریان عرضی افزایش می یابد؛ به طوری که یک گردابه ی هم جهت با جریان عرضی در محل گوشه ی ساحل بیرونی تشکیل می شود. این جریان عرضی تا ابتدای تاج خم بعدی ادامه می یابد و مجدداً در طول موج بعدی به همین شکل تکرار می شود.

واژگان کلیدی: جریان های ثانویه، پیچان رود، کانال مرکب، رابطه های ناویر -

استوکس متوسط رینولدزی.

۱. مقدمه

تأثیر نیروی گریز از مرکز ایجاد و با جریان های ثانویه ی موجود در کانال مرکب ترکیب می شوند. مکانیزم های سه بعدی، تحلیل جریان در کانال های مرکب را بسیار دشوار می سازند.^[۱] بنابراین، مسائل مربوط به کانال های مرکب در مسیر خم از چالش های اصلی پژوهشگران و مهندسان طراح کانال های باز است.

اندازه گیری مستقیم پارامترهای جریان های ثانویه دشوار است. جریان های ثانویه، بردارهایی از جنس سرعت هستند که در صفحه ی مقطع جریان یا محور عمود بر راستای جریان به وجود می آیند و از نظر مقدار، حدود ۲ تا ۳ درصد سرعت متوسط جریان در کانال های مستقیم هستند. منشأ جریان های مذکور، غیرهمگن بودن آشفته گی جریان است.^[۲] در کانال های مرکب پیچان رودی، ساختارهای جریان پیچیده تر هستند. ساختارهای جریان های ثانویه به صورت مارپیچی در پیچان رودها ظاهر می شوند و نقطه ی پایان یکی از این ساختارها، نقطه ی آغاز دیگری است. شناسایی و تخمین جریان های ثانویه در مسیرهای مستقیم و خمیده، موضوع پژوهش های گسترده یی بوده است.^[۳-۵] معتبرترین آزمایش های صورت گرفته در زمینه ی جریان های ثانویه، به دانشگاه بیرمنگام انگلستان تعلق دارد، که به FCF معروف است و در دو بخش کانال های مستقیم (سری A) و پیچان رود (سری B) انجام شده است.^[۶] مطالعات عددی محدودی نیز در این زمینه وجود دارد. برای مثال، در سال ۲۰۰۲، با استفاده از مدل سازی عددی

همواره برای توسعه ی مدل های ریاضی جهت مطالعه ی دقیق جریان در کانال ها تلاش شده است تا ساختار جریان در آن ها به طور دقیق شناسایی شود. کانال ها معمولاً مسیر مستقیم ندارند و علاوه بر بخش اصلی، سیلاب دشت نیز دارند. معمولاً جریان آب در بخش اصلی کانال (کانال اصلی) جریان می یابد. هنگامی که جریان کانال از بخش اصلی به سیلاب دشت وارد می شود، الگوی جریان در کانال تغییر می کند. در این حالت، کانال از حالت ساده به حالت مرکب تبدیل می شود. اختلاف سرعت بین کانال اصلی و سیلاب دشت، باعث تولید لایه های عرضی برشی می شود و آن ها گردابه های منظمی را که ناشی از عدم تعادل در جریان هستند، پدید می آورند. هنگامی که کانال مسیر پیچان رودی دارد، ساختار جریان پیچیده تر نیز می شود. کانال های مرکب در مسیر خم ها و پیچان رودها، معمولاً کانال اصلی با مسیر خمیده و سیلاب دشت با مسیر مستقیم دارند. جریان در قسمت اصلی در جهت دیواره حرکت می کند، ولی در سیلاب دشت، جریان از مسیر مستقیم به سمت پایین دست منحرف می شود و به صورت جریان های مدور به سمت کانال اصلی حرکت می کند. در این حالت، جریان با ساختارهای سه بعدی مواجه است. این ساختارها تحت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۶/۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۶/۳/۲۲.

DOI:10.24200/J30.2018.2028.2066

و نرخ اتلاف این انرژی (ε و ω) استفاده می‌شود. فرض اساسی مدل‌های مذکور، ایزوتروپیک بودن لزجت گردابی است. مدل دیگر، مدل $k - \varepsilon$ که تحقق‌پذیر^۱ است که قدرت بیشتری در مدل‌سازی جریان متوسط نشان می‌دهد. در مواردی که دیواره در جریان تأثیر می‌گذارد، از مدل $k - \omega$ استفاده می‌شود. ω اتلاف انرژی ویژه است که مقیاس آشفتگی را تعیین می‌کند و در واقع نسبت به k است. گاه مدل $k - \omega$ موجب واگرایی در حل می‌شود. به همین دلیل از مدلی جایگزین با نام $k - \omega$ SST استفاده می‌شود. مدل $k - \omega$ معمول، جواب‌های بسیار خوبی در محل زیرلایه‌ی لزوج ارائه می‌دهد، ولی در محل سطح آب، گاه با مشکلاتی مواجه است. مدل جایگزین $k - \omega$ SST با رینولدز پایین در نزدیکی دیواره عمل می‌کند و با دور شدن از دیواره و نزدیک شدن به سطح، از مدل $k - \varepsilon$ بهره می‌گیرد. در پژوهش حاضر، پس از مواجه شدن با مشکلاتی از قبیل واگرایی و یا مدل‌سازی نادرست بردارهای سرعت، مدل‌های $k - \varepsilon$ که تحقق‌پذیر و $k - \omega$ SST برگزیده شدند. متغیرهای k و ε از رابطه‌های ۶ و ۷ به دست می‌آیند:

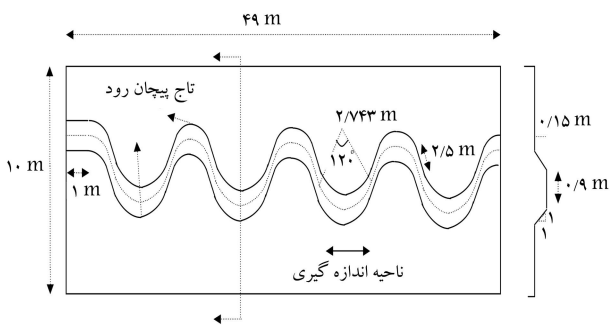
$$k = \frac{3}{2} I^2 U^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{l} \quad (5)$$

که در آن‌ها، I شدت آشفتگی جریان، C_μ ثابت تجربی برابر با 0.09 و l مقیاس طولی است و با استفاده از اندازه‌ی بزرگ‌ترین گردابه تعریف می‌شود و به صورت تجربی برابر با 0.7 اندازه‌ی قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود. مقدار مقیاس l برای شرط اولیه‌ی مسئله، 0.18 محاسبه شد.^[۱۳-۱۴]

۳. اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده

نتایج مدل آزمایشگاهی برگزیده شده جهت صحت‌سنجی و واسنجی مدل عددی، مربوط به دانشگاه بیرمنگام انگلستان است، که به نام FCF-B23 مشهور است. مشخصات کامل هندسی مدل مذکور در شکل ۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن شامل مقطع مرکب با عمق 200 میلی‌متر و عرض کل 100 متر است. کانال اصلی با مقطع دوزنقه‌ی (شکل ۱) در مسیر خم قرار گرفته است و مسیر ماریج را می‌پیماید. شیب طولی قسمت مستقیم کانال (محل سیلاب‌دشت)، 0.996% است. بازه‌های مشخص شده روی شکل ۱، محل‌های اندازه‌گیری سرعت‌های طولی و عرضی را نشان می‌دهند. طول کل کانال با احتساب مسیر مستقیم ورودی 49 متر بوده و اندازه‌گیری‌ها در محل خم سوم انجام شده است.^[۶] بررسی‌های اولیه در پژوهش حاضر نشان داد که خارج شدن جریان از فلوم به شکل توسعه‌یافته، نتایج بهتری



شکل ۱. پلان و مقطع مدل FCF-B23.^[۶]

به بررسی توزیع سرعت در کانال‌های مرکب در مسیر پیچان‌رودها پرداخته شده است.^[۷]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۳)، نیز با استفاده از دستگاه مختصات منحنی‌الخط و مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ ، جریان‌های ثانویه در کانال‌های با مسیر پیچان‌رودی مدل‌سازی شده‌اند.^[۸] همچنین در سال ۲۰۰۵، با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی به صورت متوسط‌گیری شده در عمق و به‌کارگیری یک دستگاه مختصات منحنی‌الخط به مدل‌سازی جریان در کانال‌های با مسیر پیچان‌رود پرداخته شده است.^[۹] برخی پژوهشگران (۲۰۰۸) نیز با استفاده از یک مدل عددی سه‌بعدی حجم محدود و مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ به ترسیم منحنی‌های دبی - اشل در کانال‌های مرکب در مسیر پیچان‌رود پرداخته‌اند.^[۱۰] همچنین در مطالعات دیگری (۲۰۰۹ و ۲۰۱۱)، با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی RSM برای جریان ماندگار به بررسی توزیع سرعت در کانال‌های مرکب با مقطع دوزنقه‌ی و دلخواه در مسیر پیچان‌رود پرداخته شده است.^[۱۱، ۱۲] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۲) نیز با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی و شبه یک‌بعدی به بررسی خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب با مسیر پیچان‌رود پرداخته شده است.^[۱۳] در این زمینه، مدل‌های دقیق‌تر و جدیدتر می‌توانند در بهبود مدل‌سازی این جریان‌ها مؤثر باشند. در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار متن باز اینفوم ویرایش $2.4.0$ ، به بررسی جریان‌های ذکر شده در یک کانال مرکب در مسیر پیچان‌رود پرداخته و ساختار جریان در حالت مذکور کاملاً تشریح شده است. فرایند مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اینفوم به این شکل است که مدل فیزیکی در نرم‌افزار، با اعمال شرایط مرزی مناسب و تعریف پارامترهای مورد نیاز وارد می‌شود. پس از اجرای حل عددی، پارامترهای موجود در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی (در نوشتار حاضر: بردارها و پروفیل‌های سرعت)، مناسب بودن مدل، شرایط مرزی و دقت و کیفیت مش‌ها بررسی شده است.

۲. معادلات حاکم

برای بررسی عددی جریان از رابطه‌های متوسط‌گیری شده‌ی رینولدز (RANS) شامل پیوستگی و مومنتوم در سه بعد استفاده شده است (رابطه‌های ۱ و ۲):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j U_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

که در آن‌ها، U و P تانسورهای سرعت و فشار متوسط زمانی هستند. همچنین x مختصات مکانی، t زمان، ρ جرم حجمی، μ لزجت دینامیکی اندیس‌های i و j نماینده‌ی جهت هستند، که i در هر رابطه شماره‌ی ۱ تا ۳ دارد و j در هر بار از ۱ تا ۳ متغیر است. u' ها سرعت‌های اغتشاشی هستند و ترکیب $\rho \overline{u'_i u'_j}$ به صورت τ_{ij} معرفی می‌شود و تانسور متقارن تنش رینولدزی را تشکیل می‌دهد و دارای ۶ مؤلفه است. S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط است، که از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ورود مجهولات اضافی ذکر شده به معادلات ناویر - استوکس، نیازمند بهره‌گیری از مدل‌های آشفتگی برای تکمیل معادلات ناویر - استوکس است. مشهورترین مدل‌های آشفتگی، مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ هستند که به شکل دو معادله‌ی تعریف شده‌اند. برای تکمیل معادلات از دو رابطه‌ی انتقال انرژی جنبشی جریان (k)

تعریف شد. این شرط، مقدار ε را برحسب طول اختلاط ویژه محاسبه می‌کند. برای فشار در ورودی و روی دیواره‌ها، گرادیان صفر به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد و روی مرز خروجی و سطح آب، شرط تقارن تعریف شد.

۴. انتخاب حل‌گر و شرایط مرزی

اولین قدم در حل مسائل عددی، انتخاب حل‌گر مناسب است. نرم‌افزار اینفوم، یک حل‌گر کلی ندارد و بنا بر نیاز مسئله و مدل حل‌گرهای مختلفی برای آن تعریف شده است.^[۱۹] جریان در کانال‌های مرکب در مسیر خم سه‌بعدی است و یک جریان غیرقابل تراکم دوفازی در سطح تماس آب‌وهوا برقرار است. بررسی حل‌گرهای مختلف مطابق با مرجع^[۲۰] نشان داد که می‌توان با فرض جریان ماندگار به وسیله‌ی اعمال شرایط مرزی مناسب، از حل‌گر سیمپل فوم استفاده کرد. حل‌گر سیمپل فوم از الگوریتمی به همین نام برای حل مسائل استفاده می‌کند. اعمال شرایط مرزی مناسب می‌تواند جریان‌های دوفازی را به صورت تک‌فاز مدل‌سازی کند. از آنجا که جریان فقط در سطح کانال‌های باز با سیال دوم (هوا) در ارتباط است، شرایط مرزی سطح باید طوری تعریف شوند که جریان در سطح، معادل تک‌فاز عمل کند. حل‌گر مذکور جریان را به صورت پایا در نظر می‌گیرد و گام زمانی در آن ۱ ثانیه تعریف می‌شود و نیازی به تنظیم آن نیست. در حل‌گر سیمپل فوم، فشار به صورت نسبی محاسبه می‌شود. عمق آب ۲۰۰ میلی‌متر روی شبکه‌ی با عمق ۲۰۰ میلی‌متر تعریف شد.

روی مرز سطح آب، شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شد. شرط مذکور در حالتی استفاده می‌شود که مدل جریان بعد از صفحه‌ی تقارن بتواند به صورت آینه‌ی تصویر شود. برای جریان‌های لزوج، به جای تقارن می‌توان شرط مرزی دیواره‌ی لغزان در نظر گرفت. برای سیالی مانند آب (غیرلزوج)، شرط مرزی تقارن مناسب‌تر است.^[۲۰] بنابراین، شرط مرزی کیهی متغیرها روی سطح تقارن ذکر شده تعریف شد. شرط مرزی سرعت در ورودی `flow_Rate_Inlet_Velocity` تعریف شد. با استفاده از شرط مرزی تقارن، سرعت براساس دبی ورودی محاسبه می‌شود. برای خروجی، `inlet_Outlet` تعریف شد. با این شرط، اگر جهت جریان به سمت خارج کانال باشد، سرعت با گرادیان صفر از مرز خروجی عبور می‌کند و اگر جریان به سمت داخل کانال باشد (جریان برگشتی)، مقداری که کاربر برای آن در نظر گرفته است، اختصاص می‌یابد. چنانچه این مقدار برابر با صفر باشد، جریان برگشتی در کانال به وجود نخواهد آمد. روی دیواره‌ها، شرط عدم لغزش اعمال شد. برای انرژی جنبشی جریان (k) ، در ورودی شرط مرزی `turbulent_Intensity_Kinetic_Energy_Inlet` تعریف شد. شرط مرزی ذکر شده‌ی اخیر، با استفاده از شدت آشفتگی (I) محاسبه می‌شود. انرژی جنبشی در محل دیواره‌ها از تابع دیواره استفاده می‌کند و در خروجی `inlet_Outlet` منظور می‌شود. برای نرخ اتلاف انرژی (ε) ، مشابه با k عمل شد.

در مقطع ورودی جریان، شرط مرزی

`turbulent_Mixing_length_Dissipation_Rate_Inlet`

تعریف شد. این شرط، مقدار ε را برحسب طول اختلاط ویژه محاسبه می‌کند. برای فشار در ورودی و روی دیواره‌ها، گرادیان صفر به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد. در مقطع ورودی جریان، شرط مرزی

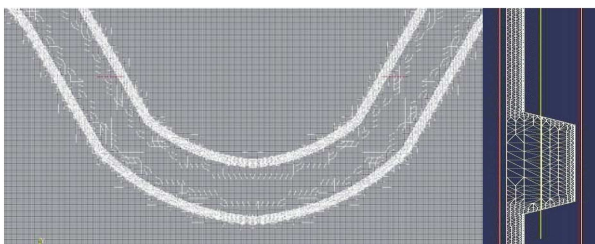
`turbulent_Mixing_length_Dissipation_Rate_Inlet`

۵. مش‌بندی دامنه و الگوریتم حل

دامنه‌ی حل با استفاده از ابزارهای `snappy_Hex_Mesh` و `block_Mesh` به مش‌های مکعبی و هرمی تقسیم‌بندی می‌شود. در فایل `block_Mesh`، مش‌بندی به صورت کامل با سازمان و مکعبی انجام می‌گیرد. در فایل `snappy_Hex_Mesh`، مش پایه روی مرزهای جامد در چند لایه، ریز می‌شود. این کار مش‌ها را به شکل ترکیبی از مش‌های مکعبی و هرمی تبدیل می‌کند. بنابراین، ابتدا باید مش‌های پایه روی مکعبی که کل دامنه‌ی حل را در بر می‌گیرد، در فایل `block_Mesh` تعریف شود. مش پایه با اندازه‌های $100 \times 200 \times 200$ میلی‌متر در جهت طول، عرض و عمق تعریف شد. تعداد مش پایه در جهت طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۵۵، ۵۰ و ۲ در نظر گرفته شده است. مش پایه در فایل `snappy_Hex_Mesh` در اولین اجرا با تعریف دو مرحله‌ی ریزشوندگی از روی سطوح جامد، به حدود ۱/۵ میلیون مش در کل میدان حل ارتقاء یافت. مراحل مطالعه‌ی مش برای برگزیدن تعداد مش مناسب در بخش ۶ ارائه شده است. نمونه‌ی مش‌بندی میدان جریان در شکل ۲ مشاهده می‌شود. برای گسسته‌سازی رابطه‌های مومنتوم و پیوستگی در دامنه‌ی حل از روش حجم محدود و الگوریتم `Gauss Upwind` و برای جفت کردن متغیرهای سرعت و فشار در حل‌گر سیمپل فوم از الگوریتمی با همین نام استفاده می‌شود. برای جلوگیری از واگرایی حل نیز برای متغیرها، ضرایب خلاصی^۲ تعریف می‌شود. مقدار این ضرایب به ترتیب، برای متغیر فشار $0/3$ و برای سرعت، انرژی جنبشی و نرخ اتلاف آن $0/5$ فرض می‌شود.

۶. تحلیل نتایج

بررسی همگرایی با استفاده از کنترل خطا در رابطه‌ی پیوستگی و تغییرات خطای فشار و سرعت نسبت به زمان انجام شد. در نهایت در زمان ۱۴۴۹ ثانیه، مسئله همگرا شد. در این حالت، باقیمانده‌ها به حدود 10^{-5} کاهش پیدا کرده بودند. برای اطمینان از همگرایی، اختلاف دبی ورودی و خروجی بررسی شد که تقریباً ۰/۵٪ دبی ورودی بود. اقدام دیگری که برای اطمینان از همگرایی انجام شد، مقایسه‌ی نتایج متغیرهای سرعت و فشار در گام‌های نهایی بود، به نحوی که تغییر محسوس نداشتند. پس از همگرایی اولیه، نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج مقاطع آزمایشگاهی مطابقت داده شد. شکل ۳، مدل عرضی و بردارهای سرعت در مقطع تاج را در مقایسه با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، مدل جریان با حل‌گر مذکور با مدل آزمایشگاهی مطابقت



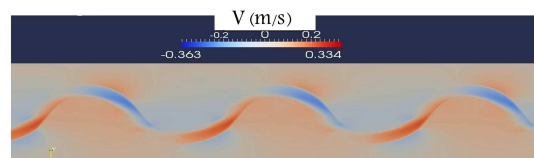
شکل ۲. نمایی از هندسه و مش اولیه‌ی مدل عددی.

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعه‌ی مش برای مدل $k - \varepsilon$ برای سرعت‌های طولی و عرضی.

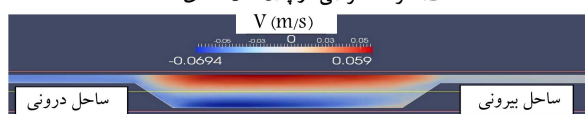
تابع خطا				
تعداد مش (میلیون)	سرعت عرضی	سرعت طولی	سرعت عرضی	سرعت طولی
	RMSE (%)	RSS (%)	RMSE (%)	RSS (%)
۱٫۵	۱۱٫۲۸	۱٫۲۷	۴٫۱۰	۰٫۱۷
۱٫۶	۱۱٫۴۸	۱٫۳۲	۳٫۸۵	۰٫۱۵
۱٫۹	۸٫۸۷	۰٫۷۹	۳٫۸۵	۰٫۱۵
۳	۸٫۵۵	۰٫۷۳	۳٫۵۷	۰٫۱۳

بخش ۷ تشریح شده است. مدل ارائه شده از نظر مقدار و دقت نیز باید ارزیابی شود. برای این کار، حساسیت مدل نسبت به اندازه‌ی مش‌ها بررسی شد. مش به تدریج ریز می‌شود تا به جواب بهینه منتهی شود. بدین منظور، ریزتر کردن مجدد مش و رساندن تعداد کل آن به حدود ۱٫۶ و ۱٫۹ میلیون ادامه یافت و نتایج بررسی و مقایسه شدند. در مرحله‌ی نهایی، با حدود ۳ میلیون مش نسبت به ۱٫۹ میلیون مش، تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نشد. لذا برای مدل $k - \varepsilon$ تحقق‌پذیر، حدود ۱٫۹ میلیون مش کافی بوده است. شکل ۴، نتایج توزیع‌های سرعت مختلف طولی و عرضی با مش‌های متفاوت و مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ تحقق‌پذیر را در مقطع تاج نشان می‌دهد که مطابق آن، نتایج حاصل از مطالعه‌ی مش تقریباً مشابه است. بنابراین، برای اجراهای مذکور، باید تابع خطا محاسبه و از بین آن‌ها تعداد مش مناسب‌تر برای مدل $k - \varepsilon$ انتخاب شود. نتایج حاصل از محاسبه‌ی توابع خطای RMSE و RSS در جدول ۱ ارائه شده‌اند. جدول ۱ نشان می‌دهد که تمامی مدل‌ها، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند، ولی برای رسیدن به بهترین جواب، می‌توان ۱٫۹ میلیون مش را انتخاب کرد. همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ SST با رینولدز پایین در نزدیکی دیواره براساس مدل $k - \varepsilon$ عمل می‌کند و با دور شدن از دیواره و نزدیک شدن به سطح، از مدل $k - \varepsilon$ بهره می‌گیرد. بنابراین، مش‌های نزدیک دیواره باید تا حد ممکن ریز شوند. بدین منظور، ریزترین مش از مدل $k - \varepsilon$ (۳ میلیون مش) برای اولین اجرای $k - \varepsilon$ برگزیده شد. پس از حل، نتایج حاصل از سرعت‌های عرضی و طولی، کم و بیش مشابه نتایج مدل $k - \varepsilon$ بودند. با ریز کردن مجدد مش (۴ میلیون مش) جواب‌های مشابه با ۳ میلیون مش به دست آمد. بنابراین، جواب‌های حاصل از ۳ و ۴ میلیون مش با هم مقایسه شده است. شکل ۵، توزیع سرعت‌های طولی و عرضی را در بازه‌ی ۳ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، نتایج نسبت به مدل $k - \omega$ به نتایج واقعی نزدیک‌تر شده‌اند.

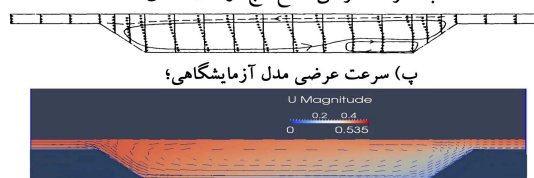
این مسئله به‌خصوص در مورد توزیع سرعت طولی، بیشتر خودنمایی می‌کند. شکل مذکور نشان می‌دهد که با اضافه کردن یک میلیون مش به مدل، تغییر چندانی در نتایج اتفاق نمی‌افتد و دو مدل با ۳ و ۴ میلیون مش، تقریباً با یکدیگر انطباق دارند. به‌منظور انتخاب مدل آشفتگی مناسب‌تر و همچنین مش بهینه، برای دو مدل اخیر نیز توابع خطا محاسبه شدند، که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی توابع خطا نشان می‌دهد که مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ SST توانایی بالاتری در برآورد سرعت‌های طولی و عرضی دارد و از لحاظ تعداد مش، مدل با ۳ میلیون مش کفایت می‌کند. نکته‌ی دیگر، ریز کردن مش در ناحیه‌های نزدیک به سطح آب است. با توجه به شکل ۴، چنانچه تعداد مش در ناحیه‌ی سطح آب کم باشد، سرعت‌های عرضی در آن محل به درستی قابل پیش‌بینی نیست و در ترازهای مشترک با سیلاب‌دشت، سرعت‌های عرضی یکسان به دست می‌آیند. ولی با ریز کردن بیشتر سطح آب (۱٫۹ میلیون و ۳ میلیون مش)، مدل جریان عرضی ناحیه‌های نزدیک به سطح آب نیز



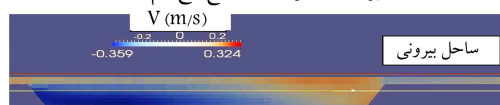
الف) سرعت عرضی در پلان مدل عددی؛



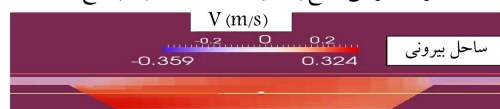
ب) سرعت عرضی مقطع تاج در مدل عددی؛



ت) بردارهای سرعت در مقطع تاج خم؛



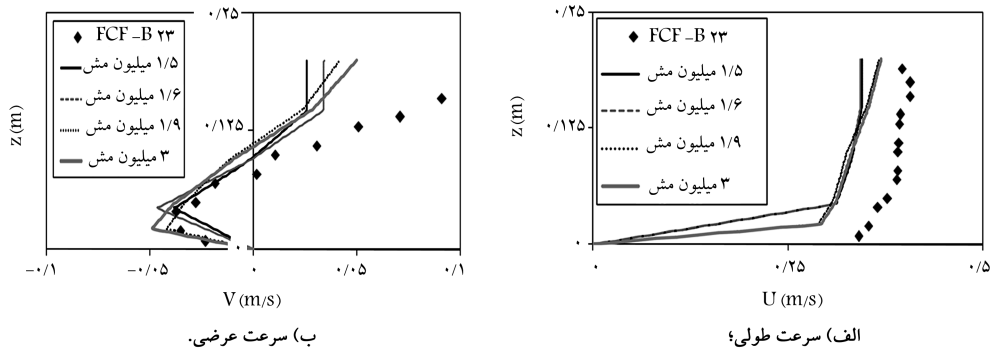
ث) سرعت عرضی مقطع با زاویه ۲۰ درجه نسبت به تاج؛



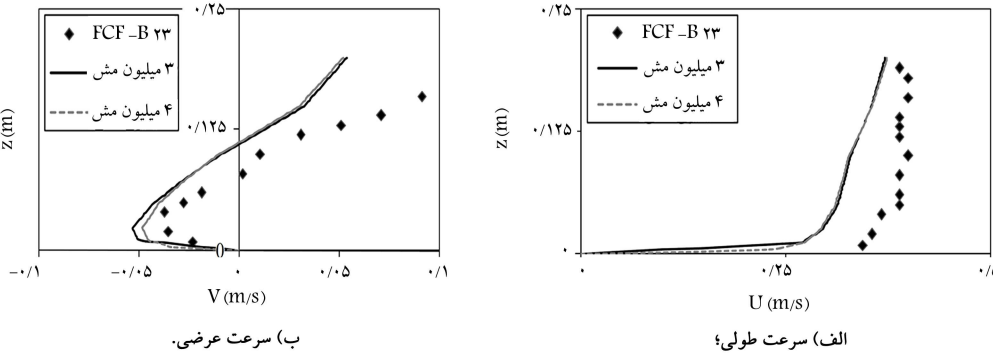
ج) سرعت عرضی مقطع با زاویه ۶۰ درجه نسبت به تاج.

شکل ۳. مقایسه‌ی توزیع‌های مختلف سرعت در مقطع تاج.

دارد. شکل ۳ الف، جریان عرضی در پلان را نشان می‌دهد که از محل تاج هر خم آغاز می‌شود و با دور شدن از محل تاج قدرتمندتر و با رسیدن به تاج بعدی میرا می‌شود. این پدیده به شکل کامل‌تر در بخش ۷ بررسی شده است. شکل ۳ ب، مدل عرضی جریان را در محل تاج نشان می‌دهد. مقایسه‌ی شکل مذکور با مدل آزمایشگاهی دیگر (شکل ۳ پ) نشان می‌دهد که سرعت‌های عرضی در این مقطع به خوبی شبیه‌سازی شده‌اند. شکل ۳ ت، نیز بردارهای سرعت را در این مقطع نشان می‌دهد که با مدل آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارد. شکل ۳ ث، مقطع عرضی جریان را در زاویه‌ی ۲۰ درجه نسبت به تاج نشان می‌دهد. با توجه به شکل اخیر، با دور شدن از مقطع تاج و انحراف مسیر کانال اصلی نسبت به سیلاب‌دشت، جریان‌های ثانویه در کانال اصلی به سمت ساحل بیرونی تغییر جهت می‌دهند. با دور شدن بیشتر از مقطع تاج به سمت پایین دست (شکل ۳ ج)، با توجه به زاویه‌ی کانال اصلی و سیلاب‌دشت نسبت به یکدیگر، مقدار کمی از جریان در سطح به سمت ساحل بیرونی و عمده‌ی جریان‌های ثانویه در زیر سطح به سمت ساحل بیرونی حرکت می‌کنند. این شکل به‌طور کامل‌تر در



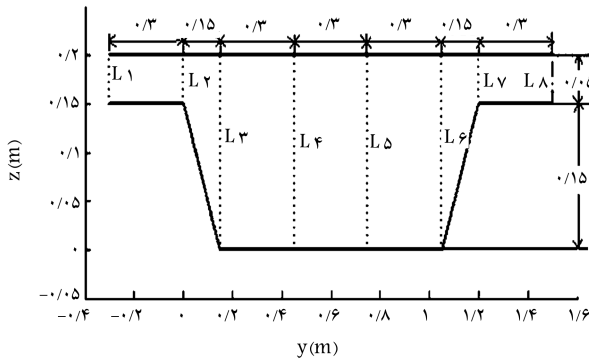
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج عددی مدل $k - \epsilon$ با داده‌های آزمایشگاهی.



شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج عددی مدل $k - \omega$ با داده‌های آزمایشگاهی.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعه‌ی مش برای مدل $k - \omega$ برای سرعت‌های طولی و عرضی.

تابع خطا				
سرعت طولی		سرعت عرضی		تعداد مش (میلیون)
RSS (%)	RMSE (%)	RSS (%)	RMSE (%)	
۰٫۱۲	۳٫۵۰	۰٫۳۷	۶٫۰۶	۳
۰٫۱۳	۳٫۵۸	۰٫۳۵	۵٫۹۳	۴



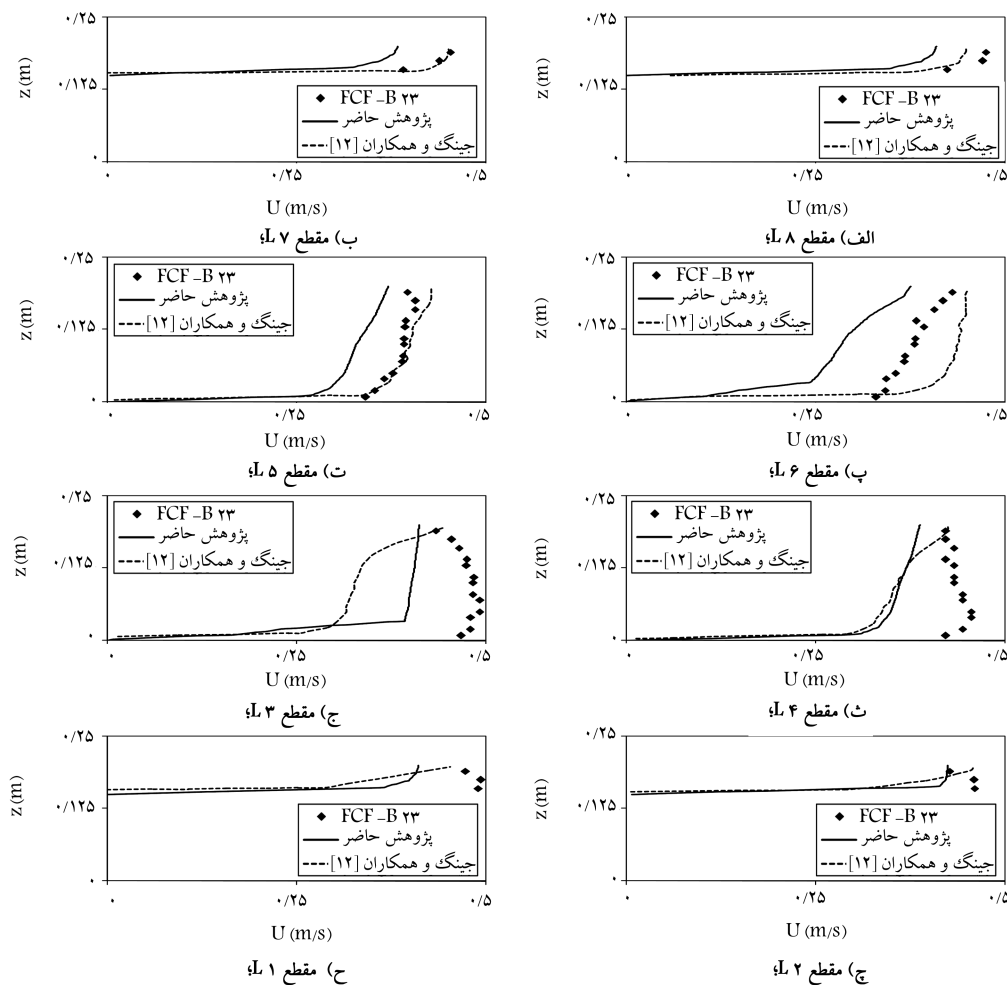
شکل ۶. مقاطع اندازه‌گیری سرعت توسط جینگ و همکاران.^[۱۲]

کانال‌های ساده واقع در محل تاج پیچان‌رودها دارد. و عرضی در چند بازه از مقطع تاج را ارائه کردند، که با پژوهش حاضر مقایسه شده است. بازه‌های در نظر گرفته‌شده در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، که براساس پژوهش جینگ و همکاران،^[۱۲] به صورت L۱ تا L۸ نام‌گذاری شده است. شکل‌های ۷ و ۸، نتایج حاصل از

به شکل دقیق‌تر به دست می‌آید. مقایسه‌ی شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که مدل $k - \omega$ در ناحیه‌ی نزدیک به کف نیز دقیق‌تر عمل می‌کند. سرعت‌های عرضی مدل $k - \epsilon$ ، تمام مش‌ها به شکلی خطی و شکسته در نزدیکی کف به دست می‌آید. در مدل $k - \omega$ ، ناحیه‌ی مذکور در نزدیک کف به منحنی نزدیک‌تر می‌شود. همان‌طور که مشخص است، مدل‌های با ۱٫۹ میلیون و ۳ میلیون مش در مدل $k - \epsilon$ در ناحیه‌ی سطح آب مشابه با مدل‌های $k - \omega$ عمل می‌کنند. این مسئله ترکیب مدل‌های $k - \epsilon$ و $k - \omega$ را در مدل آشفتگی $k - \omega$ SST تأیید می‌کند.

۷. بحث در مورد نتایج

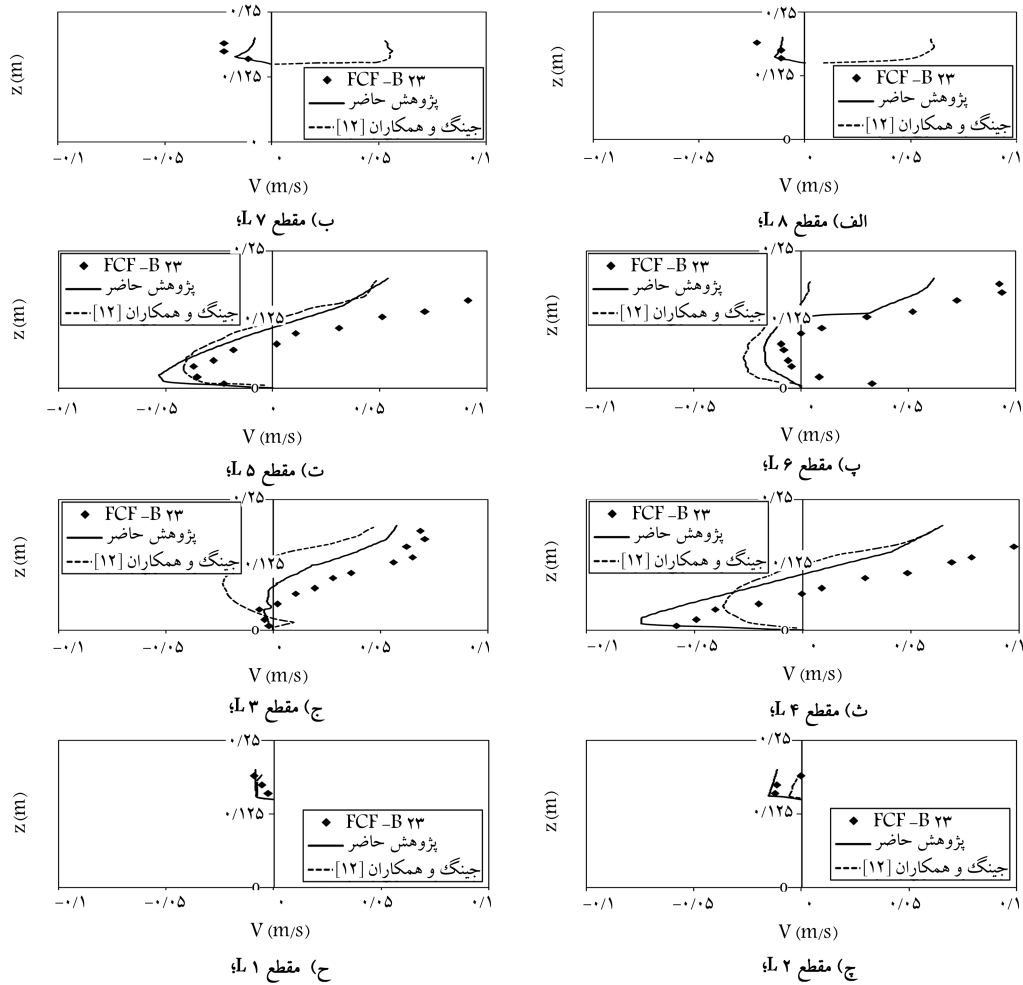
همان‌طور که در بخش ۱ اشاره شد، جینگ و همکاران،^[۱۲] با استفاده از مدل عددی RSM برای جریان ماندگار، مدل آزمایشگاهی معرفی‌شده در پژوهش حاضر را شبیه‌سازی کرده‌اند. آن‌ها توزیع سرعت‌های طولی مرکب واقع در مسیر پیچان‌رود جریان ثانویه‌ی تشکیل می‌شود که جهتی مخالف جهت جریان‌های ثانویه‌ی مقطع



شکل ۷. مقایسه‌ی توزیع سرعت طولی مقاطع مشخص شده در شکل ۶ با داده‌های آزمایشگاهی و پژوهش جینگ و همکاران.

شروع یک خم از محل تاج همواره یک جریان عرضی بسیار قوی در اثر نیروی گریز از مرکز در مقاطع جریان به وجود می‌آید. این جریان عرضی، در کف کانال اصلی به سمت ساحل بیرونی و در سطح آب به سمت ساحل درونی حرکت می‌کند. با فاصله گرفتن از محل تاج پیچان رود، مسیر کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها دیگر با هم موازی نخواهد بود. جریان عرضی محل کانال اصلی علاوه بر اثر نیروی گریز از مرکز، تحت تأثیر ورود جریان از محل سیلاب‌دشت ساحل درونی و خروج جریان به سمت سیلاب‌دشت ساحل بیرونی است. مجموعه‌ی عوامل ذکر شده باعث می‌شود که جریانی عرضی از سیلاب‌دشت ساحل درونی به سمت ساحل بیرونی شکل بگیرد. با حرکت جریان به سمت پایین دست تاج، انحراف مسیر کانال اصلی نسبت به سیلاب‌دشت بیشتر می‌شود، که باعث ورود جریان‌های عرضی با قدرت بیشتر از محل سیلاب‌دشت ساحل بیرونی به کانال اصلی می‌شود. این مسئله به‌طور مشابه، در مورد خروج جریان عرضی از محل کانال اصلی به سمت سیلاب‌دشت ساحل بیرونی نیز صادق است. جریان‌های عرضی با قدرت بیشتری از محل سیلاب‌دشت ساحل درونی به سمت سیلاب‌دشت ساحل بیرونی شکل می‌گیرند. با فاصله گرفتن بیشتر از محل تاج، باز هم بر قدرت جریان عرضی با جهت توضیح داده شده افزوده می‌شود، به طوری که یک گردابه‌ی هم‌جهت با جریان عرضی در محل گوشه‌ی ساحل بیرونی تشکیل می‌شود و به تدریج رشد می‌کند. جریان عرضی مذکور تا ابتدای تاج خم بعدی ادامه می‌یابد و مجدداً در طول موج بعدی به همین شکل تکرار

مقایسه‌ی مذکور را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های اخیر، مدل‌سازی عددی پژوهش حاضر در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، دقت قابل قبول‌تری دارد. بررسی نتایج پژوهش جینگ و همکاران^[۱۲] نشان می‌دهد که سرعت‌های عرضی در برخی از قسمت‌های سیلاب‌دشت، جهت معکوس دارند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل RSM قادر به شبیه‌سازی نواحی کم عمق مانند سیلاب‌دشت نیست. مقایسه‌ی سرعت‌های طولی پژوهش حاضر با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج جینگ و همکاران^[۱۲] نشان می‌دهد که در ساحل بیرونی سیلاب‌دشت، توزیع سرعت طولی پیش‌بینی شده در پژوهش اخیر^[۱۲] به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. در مورد سیلاب‌دشت ساحل درونی، سرعت‌های طولی پیش‌بینی شده با مدل ارائه شده در پژوهش حاضر، دقت قابل قبول‌تری را نشان می‌دهند. در محل کانال اصلی، سرعت‌های پیش‌بینی شده در مقاطع نزدیک‌تر به ساحل بیرونی در پژوهش جینگ و همکاران^[۱۲] دقیق‌تر هستند و با دور شدن از ساحل بیرونی به سمت ساحل درونی، نتایج پژوهش حاضر نسبت به نتایج جینگ و همکاران^[۱۲] به نتایج واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. مقایسه‌ی سرعت‌های عرضی در شکل ۸ نشان می‌دهد که مدل پژوهش حاضر تقریباً در تمامی مقاطع بهتر از مدل RSM عمل می‌کند. با توجه به مقادیر خطای محاسبه شده در جدول‌های ۱ و ۲، می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی پژوهش حاضر در برآورد توزیع سرعت‌های طولی و عرضی در پیچان رودها و خم‌ها موفق‌تر است. با توجه به مدل جریان عرضی به دست آمده (شکل ۳ الف)، با



شکل ۸. مقایسه‌ی توزیع سرعت عرضی مقاطع مشخص شده در شکل ۶ با داده‌های آزمایشگاهی و پژوهش جینگ و همکاران.

برشی افقی در محل کانال اصلی شکل می‌گیرد. این مسئله به‌خصوص در تراز مشترک با سیلاب‌دشت چشم‌گیرتر است. به همین دلیل، در کانال

۲. با اندکی فاصله گرفتن از محل تاج در جهت پایین‌دست، تبادل حجمی سیال بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی به‌خصوص در ناحیه‌ی هم‌ترازی (مکان‌هایی در مقطع کانال اصلی، که با توجه به شکل ۱ در تراز ۰/۱۵ متر از کف قرار دارند) اتفاق می‌افتد و در فاصله‌ی کوتاهی از پیچان رود، جریان ناحیه‌ی ساحل بیرونی به سمت سیلاب‌دشت مجاور منتقل می‌شود. از طرف دیگر، قسمتی از جریان سیلاب‌دشت بالادست به وسیله‌ی جریان‌های ثانویه وارد کانال اصلی می‌شود و در ناحیه‌ی هم‌ترازی غوطه‌ور می‌شود. در این شرایط، جریان‌های ثانویه در کف به سمت ساحل بیرونی و در سطح به سمت ساحل درونی هستند (شکل ۳ث).
۳. با فاصله گرفتن از محل تاج در جهت پایین‌دست، در اثر تبادل مومنوم بین سیلاب‌دشت و ناحیه‌ی هم‌ترازی در کانال اصلی، به تدریج بر قدرت جریان ثانویه‌ی کف اضافه می‌شود، که باعث می‌شود جریان در کف، با قدرت بیشتری به سمت ساحل درونی حرکت کند. با توجه به جهت مخالف جریان‌های ثانویه در کف و سطح، با افزایش قدرت جریان در کف از قدرت جریان در سطح کاسته می‌شود.

۴. فرایند توصیف شده در ۳ مرحله به‌اختصار بیان می‌کند که همواره در یک کانال

می‌شود. نکته‌ی جالب توجه در مورد کانال‌های مرکب در مسیر پیچان رودها، مدل جریان‌های ثانویه در محل تاج است. مدل جریان ثانویه‌ی که در کانال‌های ساده در مسیر خم شکل می‌گیرد، با مدل توصیف شده تا حدی متفاوت است. در کانال‌های ساده، گردابه‌ی اصلی ایجاد شده در مقطع، جهتی معکوس با کانال مرکب دارد. به عبارت دیگر، در کف به سمت ساحل درونی و در سطح به سمت ساحل بیرونی است. در کانال‌های ساده‌ی قرارگرفته در مسیر خم، در سطح آب نیروی گریز از مرکز، ذرات آب را با سرعت بیشتری به طرف ساحل بیرونی هدایت می‌کند و با رعایت اصل پیوستگی، ذرات آب در کف با سرعت کمتر به سمت ساحل درونی هدایت می‌شوند.^[۲۱] جریان در کانال اصلی کانال‌های مرکب تحت تأثیر تنش‌های برشی اندرکنشی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت نیز قرار می‌گیرد. سلول جریان ثانویه‌ی که در کانال مرکب در مسیر خم‌ها و پیچان رودها در محل کانال اصلی (مقطع تاج) شکل می‌گیرد، جهتی معکوس با حالت کانال ساده دارد و در سطح آب به سمت ساحل درونی و در کف به سمت ساحل بیرونی حرکت می‌کند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که جریان در کانال‌های مرکب واقع در مسیر پیچان رودها در ۴ مرحله قابل توصیف است:

۱. جهت جریان در کانال اصلی، دیواره‌های جانبی کانال را دنبال می‌کند. در حالی که در قسمت سیلاب‌دشت، به سمت مسیر پیچان رود تمایل دارد. بنابراین، لایه‌ی

عددی حل شدند. به‌عنوان مدل آشفتگی مناسب، از مدل‌های $k - \varepsilon$ تحقق‌پذیر و $k - \omega$ SST استفاده و نتایج حاصل با هم مقایسه شدند. مقایسه‌ی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل $k - \omega$ SST با حدود ۳ میلیون مش در مدل‌سازی جریان در کانال مرکب واقع در مسیر پیچان‌رود موفق عمل می‌کند. مدل جریان‌های به‌دست آمده برای کانال مرکب به‌صورت تناوبی در هر طول موج پیچان‌رود به وجود می‌آید و شکلی متفاوت با کانال‌های ساده در مسیر خم به خود می‌گیرد. تنش‌های برشی در محل فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت جهت گردابه‌ی اصلی جریان ثانویه را تغییر می‌دهند.

حرکت جریان در کانال مرکب در مسیر پیچان‌رود، در ۴ مرحله قابل توصیف است. به این شکل که ابتدا لابه‌ی برشی افقی در محل کانال اصلی شکل می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم، تبادل حجمی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت اتفاق می‌افتد. مرحله‌ی بعد، تبادل مومنوم بین سیلاب‌دشت و ناحیه‌ی هم‌تراز آن در کانال اصلی است، که جریان را با یک چرخش مضاعف در جهت خلاف جهت جریان ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکز به مسیر خم وارد می‌کند. در نهایت، جریان ثانویه‌ی بسیار قوی از سیلاب‌دشت بالادست تاج هر خم با شدت زیاد وارد کانال اصلی می‌شود، که با فاصله گرفتن از تاج، قدرت و ابعاد آن بیشتر می‌شود. در مجموع با محاسبه‌ی سرعت‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف و ترکیب آن‌ها، سلول‌های جریان‌های ثانویه به‌دست آمدند، که مطالعات گسترده‌تر در ارتباط با ویژگی‌های هیدرودینامیکی سلول‌های جریان ثانویه، موضوع مطالعات بعدی پژوهشگران نوشتار حاضر است.

مرکب در مسیر پیچان‌رود، جریان ثانویه‌ی با چرخش خلاف جهت معمول، کانال‌های ساده به‌وجود می‌آیند که به‌تدریج با حرکت در مسیر خم و فاصله گرفتن از محل تاج، جریان ثانویه‌ی نیز در کف (زیر ناحیه‌ی هم‌ترازی) در جهت خلاف حالت اول شکل می‌گیرد که با حرکت به سمت پایین دست بر شدت و قدرت آن افزوده می‌شود. با افزایش قدرت جریان عرضی مذکور، از قدرت جریان ثانویه‌ی اول کاسته می‌شود، تا جایی که جریان به‌طور کامل معکوس می‌شود. در این حالت، جریان به محل تاج موج بعدی نزدیک‌تر شده است. در واقع با نزدیک شدن جریان به این نقطه، جریان ثانویه‌ی تشکیل شده در تاج موج پیشین میرا می‌شود.

با توجه به تطابق قابل قبول توزیع‌های سرعت طولی و عرضی به‌دست آمده در شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر، مدل جریان عرضی حاصل در مسیر پیچان‌رود، برای برآورد پارامتر ثانویه در مسیر پیچان‌رودها قابل استفاده است.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی عددی کانال مرکب در مسیر پیچان‌رود با استفاده از نرم‌افزار متن‌باز اینفوم پرداخته شده است. رابطه‌های اساسی مدل عددی در پژوهش حاضر، معادلات پیوستگی و مومنوم به‌صورت متوسط‌گیری‌شده‌ی رینولدزی به‌صورت

پانویس‌ها

1. realizable $k - \varepsilon$ model
2. relaxation factor

منابع (References)

1. McEwan, I.K. and Ikeda, S. "Flow and sediment transport in compound channels", The Experiences of Japanese and UK Research, IAHR, Int. Assoc. Hydr. Eng. Res., Madrid, Spain (2008).
2. Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and et al. "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows", *J. Hydr. Res.*, **27**(11), pp. 149-173 (1989).
3. Wormleaton, P.R., Allen, J. and Hdjipanos, P. "Discharge assessment in compound channel flow", *J. Hyd. Div.*, **108**(9), pp. 975-994 (1982).
4. Knight, D.W. and Demetriou, J.D. "Flood plain and main channel flow interaction", *J. Hyd. Eng.*, **109**(8), pp. 1073-1092 (1983).
5. Knight, D.W. and Hamed, M.E. "Boundary shear in symmetrical compound channels", *J. Hyd. Eng.*, **110**(10), pp. 1412-1430 (1984).
6. Da. Silveira e Lorena, M.L. "Meandering compound flow", Ph.D Thesis, University of Glasscow, UK (1992).
7. Morvan, H., Pender, G., Wright, N.G. and et al. "Three-dimensional hydrodynamics of meandering compound channels", *J. Hyd. Eng.*, **128**(7), pp. 674-682 (2002).
8. Shao, X., Wang, H. and Chen, Z. "Numerical modeling of turbulent flow in curved channels of compound cross-section", *Adv. Water Resour.*, **26**(5), pp. 525-539 (2003).
9. Zarrati, A.R., Tamai, N. and Jin, Y.C. "Mathematical modeling of meandering channels with a generalized depth-averaged model", *J. Hyd. Eng.*, **131**(6), pp. 467-475 (2005).
10. De-Marchi, M. and Napoli, E. "The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels", *Adv. Water Resour.*, **31**(12), pp. 1662-1673 (2008).
11. Jing, H., Guo, Y., Li, C. Zhang, J., "Three-dimensional numerical simulation of compound meandering open channel flow by the Reynolds stress model", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **59**(8), pp. 927-943 (2009).
12. Jing, H., Li, C., Guo, Y. and et al. "Numerical simulation of turbulent flows in trapezoidal meandering compound open channels", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **65**(9), pp. 1071-1083 (2011).
13. Mohanty, P.K., Dash, S.S. and Khatua, K.K. "Flow investigations in a wide meandering compound channel", *Int. J. Hyd. Eng.*, **1**(6), pp. 83-94 (2012).
14. Farhanieh, B. "The physics of turbulent flows", Sharif University of Technology Pubs., Tehran, Iran (In Persian) (2009).

15. Samkhaniani, N. "Numerical simulation of heat transfer and fluid flow using openFOAM", Andisheh Sara Pubs., Tehran, Iran (In Persian) (2015).
16. https://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model (12/20/2016).
17. https://en.wikipedia.org/wiki/K%E2%80%93omega_turbulence_model (12/20/2016).
18. https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model (12/20/2016).
19. Greenshields, C.J. "Openfoam the open source CFD toolbox", User Guide (2015).
20. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node257.htm> (12/26/2016).
21. Mahmoodian Shooshtari, M. "Principals of flow in open channels", 1, Shahid Chamran University of Ahvaz Pubs., Ahvaz, Iran (In Persian) (2009).