

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

مدل سازی دقیق جریان‌های ثانویه در مسیر خم‌ها و پیچان رودها، اهمیت زیادی دارد. در پژوهش حاضر، با مدل سازی عددی در محیط نرم‌افزار اپن‌فوم، به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در یک کانال مرکب در مسیر پیچان رود پرداخته شده است. برای این منظور، معادلات حاکم، شامل رابطه‌های متوسط‌گیری شده‌ی رینولدزی (RANS) حل شده‌اند. با وجود رفتار دوفازی جریان در کانال‌های باز، با انتخاب حل‌گر و شرایط مرزی مناسب برای سطح آب می‌توان آن‌ها را به صورت تک‌فاز مدل کرد. در پژوهش حاضر، از شرط مرزی تقارن برای سطح آزاد آب استفاده و برای مدل سازی جریان آشفته از مدل‌های آشفته‌گی $k - \omega$ و $k - \varepsilon$ استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، با فاصله گرفتن از تاج خم، قدرت جریان عرضی افزایش می‌یابد؛ به طوری که یک گردابه‌ی هم‌جهت با جریان عرضی در محل گوشه‌ی ساحل بیرونی تشکیل می‌شود. این جریان عرضی تا ابتدای تاج خم بعدی ادامه می‌یابد و مجدداً در طول موج بعدی به همین شکل تکرار می‌شود.

واژگان کلیدی: جریان‌های ثانویه، پیچان رود، کانال مرکب، رابطه‌های ناویر -

استوکس متوسط رینولدزی.

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

۱. مقدمه

تأثیر نیروی گریز از مرکز ایجاد و با جریان‌های ثانویه موجود در کانال مرکب ترکیب می‌شوند. مکانیزم‌های سه‌بعدی، تحلیل جریان در کانال‌های مرکب را بسیار دشوار می‌سازند.^[۱] بنابراین، مسائل مربوط به کانال‌های مرکب در مسیر خم از چالش‌های اصلی پژوهشگران و مهندسان طراح کانال‌های باز است.

اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای جریان‌های ثانویه دشوار است. جریان‌های ثانویه، بردارهایی از جنس سرعت هستند که در صفحه‌ی مقطع جریان یا محور عمود بر راستای جریان به وجود می‌آیند و از نظر مقدار، حدود ۲ تا ۳ درصد سرعت متوسط جریان در کانال‌های مستقیم هستند. منشأ جریان‌های مذکور، غیرهمگن بودن آشفته‌گی جریان است.^[۲] در کانال‌های مرکب پیچان‌رودی، ساختارهای جریان پیچیده‌تر هستند. ساختارهای جریان‌های ثانویه به صورت مارپیچی در پیچان‌رودها ظاهر می‌شوند و نقطه‌ی پایان یکی از این ساختارها، نقطه‌ی آغاز دیگری است. شناسایی و تخمین جریان‌های ثانویه در مسیرهای مستقیم و خمیده، موضوع پژوهش‌های گسترده‌ی بی‌پایه بوده است.^[۳-۵] معتبرترین آزمایش‌های صورت‌گرفته در زمینه‌ی جریان‌های ثانویه، به دانشگاه بیرمنگام انگلستان تعلق دارد، که به FCF معروف است و در دو بخش کانال‌های مستقیم (سری A) و پیچان‌رود (سری B) انجام شده است.^[۶] مطالعات عددی محدودی نیز در این زمینه وجود دارد. برای مثال، در سال ۲۰۰۲، با استفاده از مدل‌سازی عددی

همواره برای توسعه‌ی مدل‌های ریاضی جهت مطالعه‌ی دقیق جریان در کانال‌ها تلاش شده است تا ساختار جریان در آن‌ها به طور دقیق شناسایی شود. کانال‌ها معمولاً مسیر مستقیم ندارند و علاوه بر بخش اصلی، سیلاب‌دشت نیز دارند. معمولاً جریان آب در بخش اصلی کانال (کانال اصلی) جریان می‌یابد. هنگامی که جریان کانال از بخش اصلی به سیلاب‌دشت وارد می‌شود، الگوی جریان در کانال تغییر می‌کند. در این حالت، کانال از حالت ساده به حالت مرکب تبدیل می‌شود. اختلاف سرعت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت، باعث تولید لایه‌های عرضی برشی می‌شود و آن‌ها گردابه‌های منظمی را که ناشی از عدم تعادل در جریان هستند، پدید می‌آورند. هنگامی که کانال مسیر پیچان‌رودی دارد، ساختار جریان پیچیده‌تر نیز می‌شود. کانال‌های مرکب در مسیر خم‌ها و پیچان‌رودها، معمولاً کانال اصلی با مسیر خمیده و سیلاب‌دشت با مسیر مستقیم دارند. جریان در قسمت اصلی در جهت دیواره حرکت می‌کند، ولی در سیلاب‌دشت، جریان از مسیر مستقیم به سمت پایین دست منحرف می‌شود و به صورت جریان‌های مدور به سمت کانال اصلی حرکت می‌کند. در این حالت، جریان با ساختارهای سه‌بعدی 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 می شود. فرض اساسی مدل های مذکور، ایزوتروپیک بودن لزجت گردابی است. مدل دیگر، مدل $k - \epsilon$ که تحقق پذیر است که قدرت بیشتری در مدل سازی جریان متوسط نشان می دهد. در مواردی که دیواره در جریان تأثیر می گذارد، از مدل $k - \omega$ استفاده می شود. ω اتلاف انرژی ویژه است که مقیاس آشفتگی را تعیین می کند و در واقع نسبت به k است. گاه مدل $k - \omega$ موجب واگرایی در حل می شود. به همین دلیل از مدلی جایگزین با نام $k - \omega$ SST استفاده می شود. مدل $k - \omega$ معمول، جواب های بسیار خوبی در محل زیرلایه ی لزج ارائه می دهد، ولی در محل سطح آب، گاه با مشکلاتی مواجه است. مدل جایگزین $k - \omega$ SST با رینولدز پایین در نزدیکی دیواره عمل می کند و با دور شدن از دیواره و نزدیک شدن به سطح، از مدل $k - \epsilon$ بهره می گیرد. در پژوهش حاضر، پس از مواجه شدن با مشکلاتی از قبیل واگرایی و یا مدل سازی نادرست بردارهای سرعت، مدل های $k - \epsilon$ که تحقق پذیر و $k - \omega$ SST برگزیده شدند. متغیرهای k و ϵ از رابطه های ۶ و ۷ به دست می آیند:

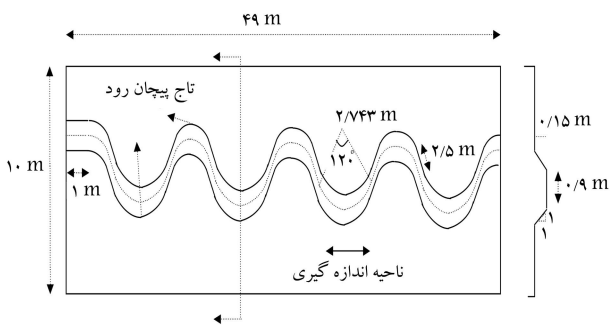
$$k = \frac{3}{2} I^2 U^2 \quad (4)$$

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

که در آن ها، I شدت آشفتگی جریان، C_μ ثابت تجربی برابر با 0.09 و l مقیاس طولی است و با استفاده از اندازه ی بزرگ ترین گردابه تعریف می شود و به صورت تجربی برابر با 0.7 اندازه ی قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می شود. مقدار مقیاس l برای شرط اولیه ی مسئله، 0.18 محاسبه شد. [۱۳-۱۴]

۳. اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده

نتایج مدل آزمایشگاهی برگزیده شده جهت صحت سنجی 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 می شود که مطابق آن شامل مقطع مرکب با عمق 200 میلی متر و عرض کل 10 متر است. کانال اصلی با مقطع دوزنقه یی (شکل ۱) در مسیر خم قرار گرفته است و مسیر ماریج را می پیماید. شیب طولی قسمت مستقیم کانال (محل سیلاب دشت)، 0.996% است. بازه های مشخص شده روی شکل ۱، محل های اندازه گیری سرعت های طولی و عرضی را نشان می دهند. طول کل کانال با احتساب مسیر مستقیم ورودی 49 متر بوده و اندازه گیری ها در محل خم سوم انجام شده است. [۶] بررسی های اولیه در پژوهش حاضر نشان داد که خارج شدن جریان از فلوم به شکل توسعه یافته، نتایج بهتری



شکل ۱. پلان و مقطع مدل FCF-B23. [۶]

به بررسی توزیع سرعت در کانال های مرکب در مسیر پیچان رودها پرداخته شده است. [۷]

در مطالعه یی دیگری (۲۰۰۳)، نیز با استفاده از دستگاه مختصات منحنی الخط و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ ، جریان های ثانویه در کانال های با مسیر پیچان رودی مدل سازی شده اند. [۸] همچنین در سال ۲۰۰۵، با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی به صورت متوسط گیری شده در عمق و به کارگیری یک دستگاه مختصات منحنی الخط به مدل سازی جریان در کانال های با مسیر پیچان رود پرداخته شده است. [۹] برخی پژوهشگران (۲۰۰۸) نیز با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی حجم محدود و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ به ترسیم منحنی های دبی - اشل در کانال های مرکب در مسیر پیچان رود پرداخته اند. [۱۰] همچنین در مطالعات دیگری (۲۰۰۹ و ۲۰۱۱)، با استفاده از مدل عددی سه بعدی RSM برای جریان ماندگار به بررسی توزیع سرعت در کانال های مرکب با مقطع دوزنقه یی و دلخواه در مسیر پیچان رود پرداخته شده است. [۱۱، ۱۲] در مطالعه ی دیگری (۲۰۱۲) نیز با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی و شبه یک بعدی به بررسی خصوصیات جریان در کانال های مرکب با مسیر پیچان رود پرداخته شده است. [۱۳] در این زمینه، مدل های دقیق تر و جدیدتر می توانند در بهبود مدل سازی این جریان ها مؤثر باشند. در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل سازی عددی در محیط نرم افزار متن باز اینفوم ویرایش $2.4.0$ ، به بررسی جریان های ذکر شده در یک کانال مرکب در مسیر پیچان رود پرداخته و ساختار جریان در حالت مذکور کاملاً تشریح شده است. فرایند مدل سازی عددی در نرم افزار اینفوم به این شکل است که مدل فیزیکی در نرم افزار، با اعمال شرایط مرزی مناسب و تعریف پارامترهای مورد نیاز وارد می شود. پس از اجرای حل عددی، پارامترهای موجود در مدل های عددی و آزمایشگاهی (در نوشتار حاضر: بردارها و پروفیل های سرعت)، مناسب بودن مدل، شرایط مرزی و دقت و کیفیت مش ها بررسی شده است.

۲. معادلات حاکم

برای بررسی عددی جریان از رابطه های متوسط گیری شده ی رینولدز (RANS) شامل پیوستگی و مومنتوم در سه بعد استفاده شده است (رابطه های 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 آن ها، U و P تانسورهای سرعت و فشار متوسط زمانی هستند. همچنین x مختصات مکانی، t زمان، ρ جرم حجمی، μ لزجت دینامیکی اندیس های i و j نماینده ی جهت هستند، که i در هر رابطه شماره یی از ۱ تا ۳ دارد و j در هر بار از ۱ تا ۳ متغیر است. u' ها سرعت های اغتشاشی هستند و ترکیب $\rho \overline{u'_i u'_j}$ به صورت τ_{ij} معرفی می شود و تانسور متقارن تنش رینولدزی را تشکیل می دهد و دارای ۶ مؤلفه است. S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط است، که از رابطه ی ۳ به دست می آید:

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

ورود مجهولات اضافی ذکر شده به معادلات ناویر - استوکس، نیازمند بهره گیری از مدل های آشفتگی برای تکمیل معادلات ناویر - استوکس است. مشهورترین مدل های آشفتگی، مدل های $k - \epsilon$ و $k - \omega$ هستند که به شکل دو معادله یی تعریف شده اند. برای تکمیل معادلات از دو رابطه ی انتقال انرژی جنبشی جریان (k)

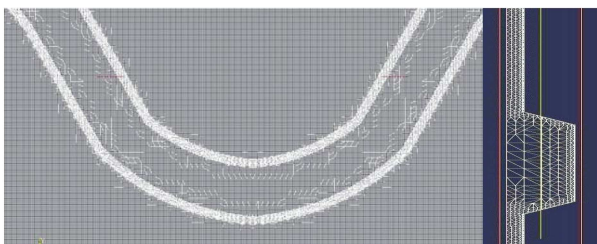
تعریف شد. این شرط، مقدار ε را برحسب طول اختلاط ویژه محاسبه می‌کند. برای فشار در ورودی و روی دیواره‌ها، گرادیان صفر به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد و روی مرز خروجی و سطح آب، شرط تقارن تعریف شد.

۵. مش بندی 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 0.75 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 0.5% 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 محسوسی نداشته باشند. 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.

به دست می‌دهد. بنابراین به انتهای خم چهارم، ۲ متر مسیر مستقیم اضافه شد که در مجموع، طول کل فوم مدل شده به ۵۱ متر رسید.

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 200 میلی‌متر روی شبکه‌ی با عمق 200 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 لیز، به جای تقارن می‌توان شرط مرزی دیواره‌ی لغزان در نظر گرفت. برای سیالی مانند آب (غیر لیز)، شرط مرزی تقارن مناسب تر 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

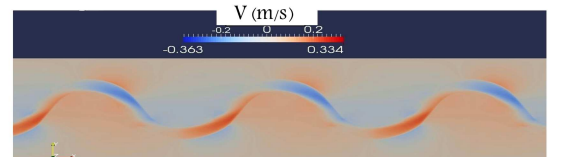
تعریف شد. این شرط، مقدار ε را برحسب طول اختلاط ویژه محاسبه می‌کند. برای فشار در ورودی و روی دیواره‌ها، گرادیان صفر به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد. در مقطع ورودی جریان، شرط مرزی

turbulent_Mixing_length_Dissipation_Rate_Inlet

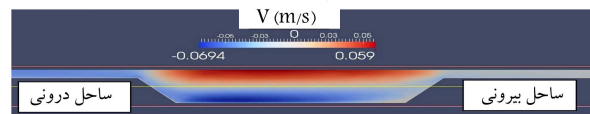
جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مطالعه‌ی مش برای مدل $k - \epsilon$ برای سرعت های طولی و عرضی.

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

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 مش ها بررسی شد. مش به تدریج ریز می شود 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 $k - \epsilon$ تحقق پذیر، حدود ۱٫۹ میلیون مش کافی بوده است. شکل ۴، نتایج توزیع های سرعت مختلف طولی و عرضی با مش های متفاوت و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ تحقق پذیر را در مقطع تاج نشان می دهد که مطابق آن، نتایج حاصل از مطالعه‌ی مش تقریباً مشابه است. بنابراین، برای اجراهای مذکور، باید تابع خطا محاسبه و از بین آن ها تعداد مش مناسب تر برای مدل $k - \epsilon$ انتخاب شود. نتایج حاصل از محاسبه‌ی توابع خطای RMSE و RSS در جدول ۱ ارائه شده اند. جدول ۱ نشان می دهد که تمامی مدل ها، نتایج قابل قبولی ارائه می دهند، ولی برای رسیدن به بهترین جواب، می توان ۱٫۹ میلیون مش را انتخاب کرد. همان طور که پیش از این نیز اشاره شد، مدل آشفتگی $k - \epsilon$ SST با رینولدز پایین در نزدیکی دیواره براساس مدل $k - \epsilon$ عمل می کند و با دور شدن از دیواره و نزدیک شدن به سطح، از مدل $k - \epsilon$ بهره می گیرد. بنابراین، مش های نزدیک دیواره باید تا حد ممکن ریز شوند. بدین منظور، ریزترین مش از مدل $k - \epsilon$ (۳ میلیون مش) برای اولین اجرای $k - \epsilon$ برگزیده شد. پس از حل، نتایج حاصل از سرعت های عرضی و طولی، کم و بیش مشابه نتایج مدل $k - \epsilon$ بودند. با ریز کردن مجدد مش (۴ میلیون مش) جواب های مشابه با ۳ میلیون مش به دست آمد. بنابراین، جواب های حاصل از ۳ و ۴ میلیون مش با هم مقایسه شده است. شکل ۵، توزیع سرعت های طولی و عرضی را در بازه‌ی ۳ نشان می دهد. با توجه به شکل ۵، نتایج نسبت به مدل $k - \omega$ به نتایج واقعی نزدیک تر شده اند. این مسئله به خصوص در مورد توزیع سرعت طولی، بیشتر خودنمایی می کند. شکل مذکور نشان می دهد که با اضافه کردن یک میلیون مش به مدل، تغییر چندانی در نتایج اتفاق نمی افتد و دو مدل با ۳ و ۴ میلیون مش، تقریباً با یکدیگر انطباق دارند. به منظور انتخاب مدل آشفتگی مناسب تر 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 می دهد که مدل آشفتگی $k - \epsilon$ SST توانایی بالاتری در برآورد سرعت های طولی و عرضی دارد و از لحاظ تعداد مش، مدل با ۳ میلیون مش کفایت می کند. نکته‌ی دیگر، ریز کردن مش در ناحیه های نزدیک به سطح آب است. با توجه به شکل ۴، چنانچه تعداد مش در ناحیه‌ی سطح آب کم باشد، سرعت های عرضی در آن محل به درستی قابل پیش بینی نیست و در ترازهای مشترک با سیلاب دشت، سرعت های عرضی یکسان به دست می آیند. ولی با ریز کردن بیشتر سطح آب (۱٫۹ میلیون و ۳ میلیون مش)، مدل جریان عرضی ناحیه های نزدیک به سطح آب نیز



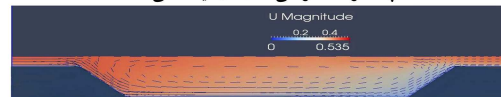
الف) سرعت عرضی در پلان مدل عددی؛



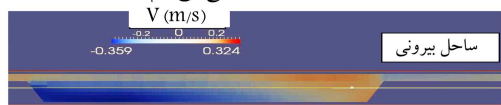
ب) سرعت عرضی مقطع تاج در مدل عددی؛



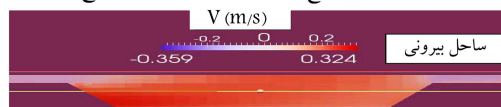
پ) سرعت عرضی مدل آزمایشگاهی؛



ت) بردارهای سرعت در مقطع تاج خم؛



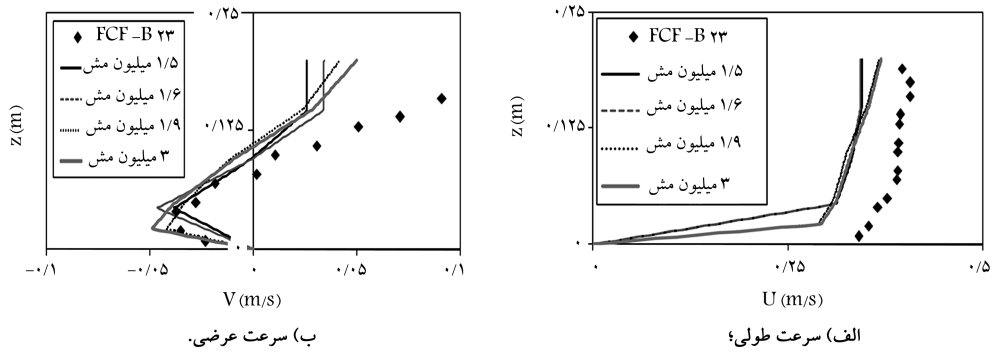
ث) سرعت عرضی مقطع با زاویه‌ی ۲۰ درجه نسبت به تاج؛



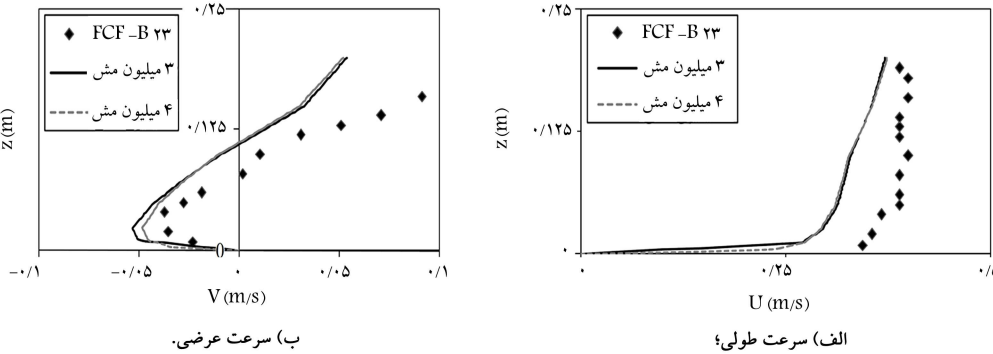
ج) سرعت عرضی مقطع با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به تاج.

شکل ۳. مقایسه‌ی توزیع های مختلف سرعت در مقطع تاج.

دارد. شکل ۳ الف، جریان عرضی در پلان را نشان می دهد که از محل تاج هر خم آغاز می شود و با دور شدن از محل تاج قدرتمندتر و با رسیدن به تاج بعدی میرا می شود. این پدیده به شکل کامل تر در بخش ۷ بررسی شده است. شکل ۳ ب، مدل عرضی جریان را در محل تاج نشان می دهد. مقایسه‌ی شکل مذکور با مدل آزمایشگاهی دیگر (شکل ۳ پ) نشان می دهد که سرعت های عرضی در این مقطع به خوبی شبیه سازی شده اند. شکل ۳ ت، نیز بردارهای سرعت را در این مقطع نشان می دهد که با مدل آزمایشگاهی تطابق قابل قبولی دارد. شکل ۳ ث، مقطع عرضی جریان را در زاویه‌ی ۲۰ درجه نسبت به تاج نشان می دهد. با توجه به شکل اخیر، با دور شدن از مقطع تاج و انحراف مسیر کانال اصلی نسبت به سیلاب دشت، جریان های ثانویه در کانال اصلی به سمت ساحل بیرونی تغییر جهت می دهند. با دور شدن بیشتر از مقطع تاج به سمت پایین دست (شکل ۳ ج)، با توجه به زاویه‌ی کانال اصلی و سیلاب دشت نسبت به یکدیگر، مقدار کمی از جریان در سطح به سمت ساحل بیرونی و عمده‌ی جریان های ثانویه در زیر سطح به سمت ساحل بیرونی حرکت می کنند. این شکل به طور کامل تر در



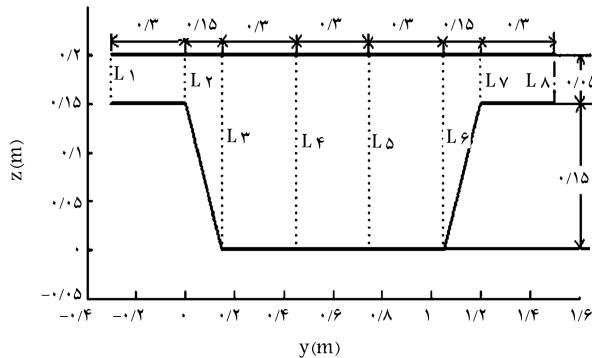
شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج عددی مدل $k - \epsilon$ با داده‌های آزمایشگاهی.



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



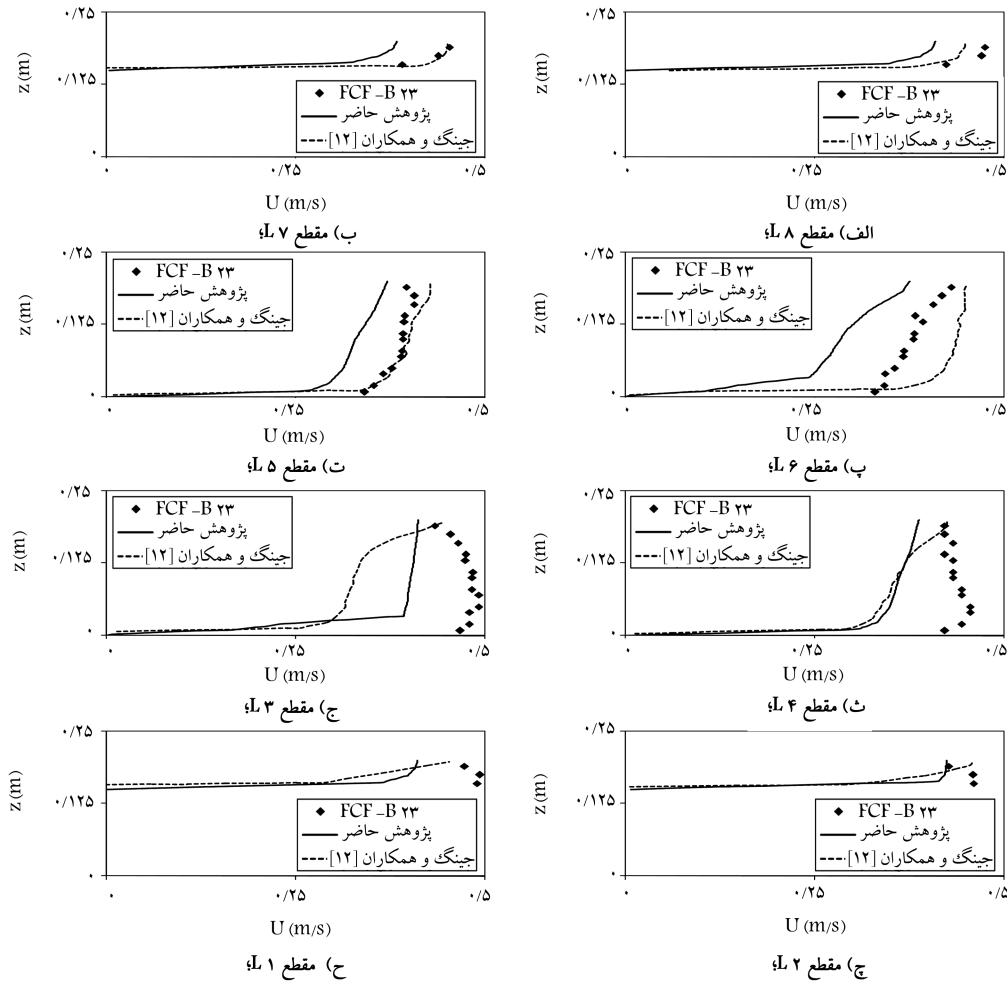
شکل ۶. مقاطع اندازه‌گیری سرعت توسط جینگ و همکاران.^[۱۲]

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 L_1 تا L_8 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

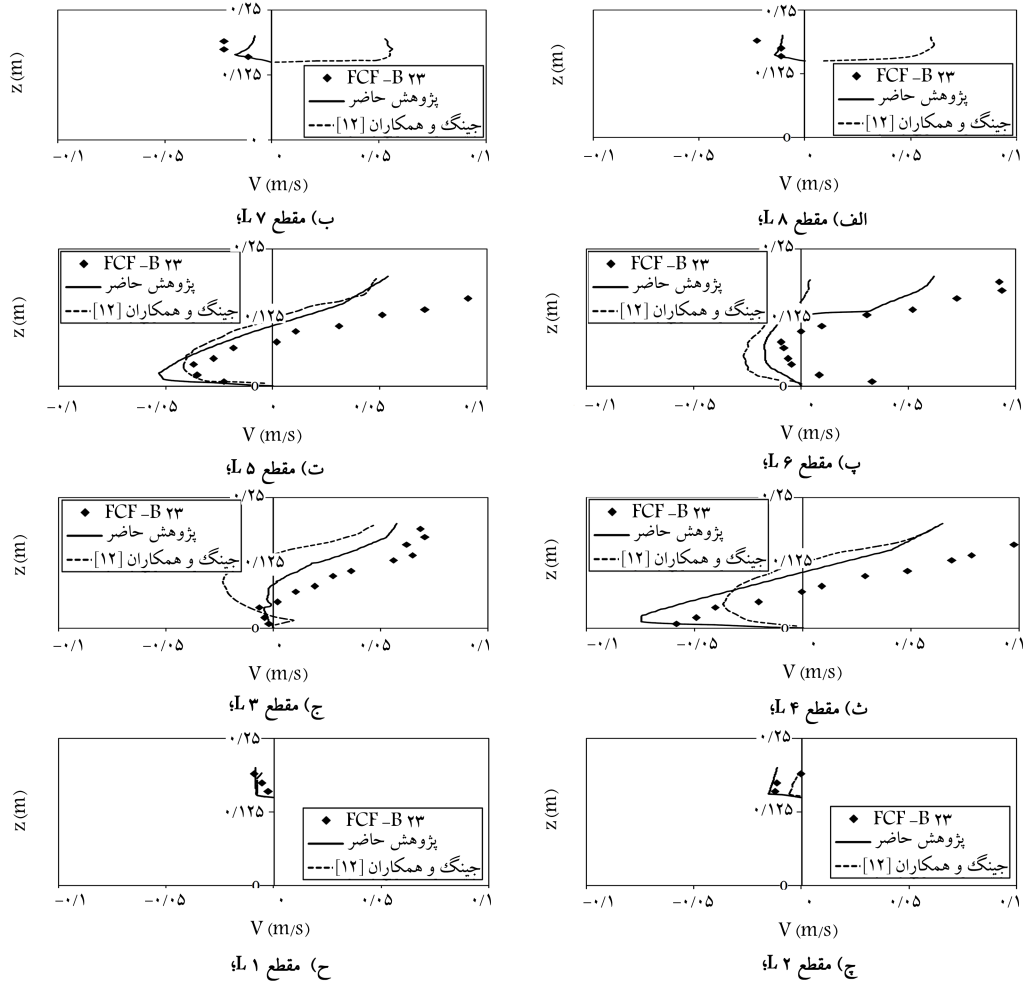
همان‌طور که در بخش ۱ اشاره شد، جینگ و همکاران،^[۱۲] با استفاده از مدل عددی RSM برای جریان ماندگار، مدل آزمایشگاهی معرفی‌شده در پژوهش حاضر را شبیه‌سازی کرده‌اند. آن‌ها توزیع سرعت‌های طولی مرکب واقع در مسیر پیچان‌رود جریان ثانویه‌ی تشکیل می‌شود که جهتی مخالف جهت جریان‌های ثانویه‌ی مقطع



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 به طور 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 مومنتوم 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 مومنتوم 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 مومنتوم 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).