

مدل سازی عددی سلول های جریان ثانویه در کانال های دوزنقه ای با زبری یکنواخت

مهدی اژدری مقدم^{۱*}، مهنا تاج نسایی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۸ پذیرش مقاله: اسفند ۱۳۸۸	
واژگان کلیدی: سلول های جریان ثانویه دینامیک سیالات محاسباتی نرم افزار ANSYS CFX زبری یکنواخت توزیع سرعت متوسط عمقی توزیع تنش برشی مرزی	کانال های روباز دوزنقه ای یکی از رایج ترین و بهینه ترین مقاطع مورد استفاده در سیستم های انتقال آب هستند و به همین دلیل بررسی شرایط جریان در آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. از مهم ترین موضوعات بررسی جریان در کانال ها می توان به اثر مؤلفه های عرضی سرعت روی جریان اشاره نمود که بارزترین این اثرات، ایجاد سلول های جریان ثانویه است. عوامل متعددی نظیر زبری جداره های کانال می توانند بر نحوه شکل گیری این سلول ها مؤثر باشند. از آنجایی که بررسی آزمایشگاهی شرایط جریان در کانال ها هزینه های زمانی و مالی زیادی در برداشته و نیازمند دسترسی به آزمایشگاه های مجهز است، محققین به دنبال جایگزینی این بررسی ها با روش های ارزان تری نظیر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می باشند. در مطالعه ای حاضر با بهره گیری از دینامیک سیالات محاسباتی در قالب استفاده از نرم افزار محاسباتی ANSYS CFX شرایط جریان در کانال روباز دوزنقه ای با جداره های زبر مدل سازی شده، تغییرات سلول های جریان ثانویه و توزیع پارامترهای هیدرولیکی جریان نظیر سرعت عمق متوسط و تنش برشی مرزی تحت تاثیر افزایش یکنواخت در زبری جداره های کانال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از تغییر ابعاد و موقعیت قرارگیری سلول ها در اثر افزایش یکنواخت زبری است. همچنین این افزایش موجب کاهش سرعت متوسط عمقی و افزایش تنش برشی مرزی می گردد.

۱- مقدمه

از جمله مطالعات تجربی صورت گرفته در زمینه بررسی سلول های جریان ثانویه و اثرات ناشی از آنها می توان به بررسی آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران (۱۹۸۹) اشاره کرد. تومیناگا و همکاران (۱۹۸۹)، پس از بررسی اثر زبری روی نتایج آزمایشگاهی در کانال مستطیلی (شکل ۱) بیان نمودند که حتی وقتی شرایط زبری مرزی تغییر می یابد، ساختار اصلی جریان های ثانویه به صورت چشمگیری تغییر نمی کند، اما مقیاس عرضی سلول ها بزرگتر می شود [۲]. اما آنها این بررسی را روی جریان در کانال های دوزنقه ای انجام ندادند.

با توجه به اینکه کانال های موجود در طبیعت دارای جداره های زبر می باشند، لذا بررسی اثر زبری جداره ها روی شرایط جریان در کانال های دوزنقه ای یکی از گزینه هایی است که از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۱]. مطالعات تجربی محدودی در زمینه بررسی سلول های جریان ثانویه و اثرات ناشی از آنها انجام شده است.

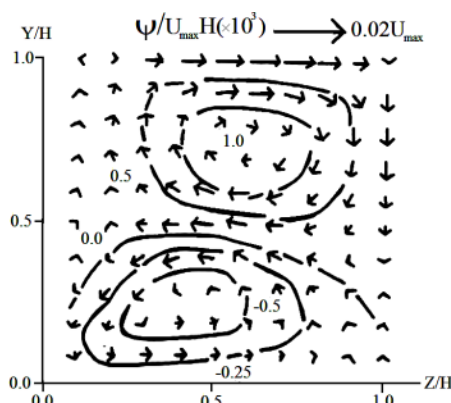
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mazhdary@eng.usb.ac.ir

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیجار، بیجار، ایران

شده و پس از صحت‌سنجی نتایج به کمک نتایج مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران (۱۹۸۹)، اثر تغییر در زبری جداره‌های کانال روی شرایط جریان مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه پس از معرفی اجمالی سلول‌های جریان ثانویه، دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار منتخب، مراحل مدل‌سازی عددی تشریح گردیده و نتایج این بررسی ارائه خواهد شد.

با نظر به اینکه کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای معمول‌ترین شکل مقطع برای انتقال آب به شمار می‌روند، در این پژوهش به بررسی اثر تغییر یکنواخت در زبری جداره‌های کانال بر سلول‌های جریان ثانویه در کانال‌های مستقیم با مقطع دوزنقه‌ای پرداخته شده است. برای این بررسی ابتدا جریان در کانال دوزنقه‌ای مسطح با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی ANSYS CFX مدل‌سازی



شکل ۱- بردارهای جریان ثانویه محاسبه شده برای کانال روباز مستطیلی [۲]

چرخش طولی در جریان آشفته کاملاً توسعه یافته به صورت زیر داده می‌شود:

$$V \frac{\partial \xi}{\partial y} + W \frac{\partial \xi}{\partial z} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v^2} - \overline{w^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \overline{vw} + \mathcal{G} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

در جایکه

$$\xi = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2)$$

V و W به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در عرض کانال (z) و عمود بر بستر کانال (y) و یا به عبارتی مؤلفه‌های سرعت جریان ثانویه هستند و به کمک تابع جریان ψ به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$W = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad V = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (3)$$

\mathcal{G} ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال، \overline{vw} تنش برشی رینولدز، $\overline{v^2}$ و $\overline{w^2}$ تنشهای عمودی رینولدز می‌باشند

۲- جریان‌های ثانویه

جریان‌های ثانویه، به عنوان نتیجه‌ای از ناهمگنی آشفتگی که به دلیل شرایط مرزی بستر، دیواره‌ی جانبی و سطح آزاد، نسبت ابعادی کانال و هندسه‌ی کانال ایجاد می‌شود، تولید و اصلاح شده است. جریان‌های ثانویه، ساختارهای سه‌بعدی ایجاد جریان میانگین اصلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این نوع جریان‌ها نسبت به هندسه‌ی کانال بسیار حساس هستند. از آنجایی که زبری جداره، تنش برشی روی آن و شدت آشفتگی را افزایش می‌دهد، بنابراین ممکن است به طور چشمگیری جریان‌های ثانویه القا شده توسط آشفتگی را تحت تاثیر قرار دهد [۲].

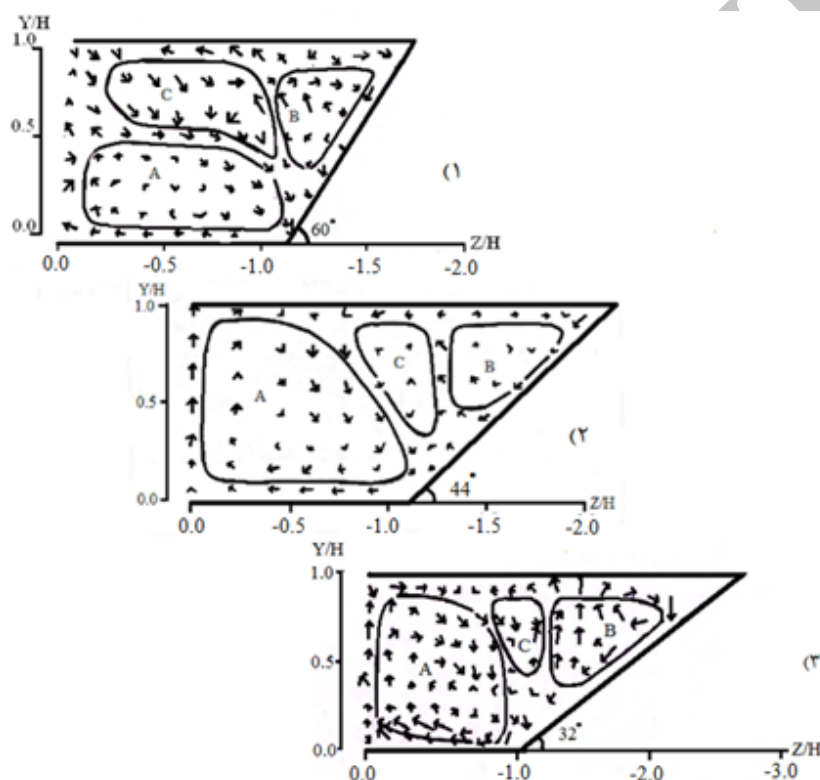
علت ایجاد جریان‌های عرضی در جریان طولی یکنواخت، ناهمسانی تنش‌های رینولدز و به طور اساسی مؤلفه‌های عمودی آن است. مکانیسم تولید جریان‌های ثانویه‌ی القا شده توسط آشفتگی در جریان کانال مستقیم، به کمک معادله‌ی چرخش طولی توضیح داده می‌شود. معادله‌ی

تنش‌های برشی میانگین بستر و دیواره‌ی جانبی به طور چشمگیری تحت تاثیر شکل مقطع عبوری، زبری مرزی و حضور جریان‌های ثانویه است [۴].

الگوی جریان‌های ثانویه در کانال‌های دوزنقه‌ای نسبت به کانال‌های مستطیلی واضح‌تر است. الگوی گردابه‌های طولی در کانال‌های دوزنقه‌ای به زاویه‌ی θ دیواره‌ی جانبی وابسته است. در کانال‌های دوزنقه‌ای حرکت جریان‌های ثانویه به سمت گوشه‌ها قابل توجه است [۲]. شکل (۲) این دو مطلب را به وضوح نمایش می‌دهد.

[۲]. میدان سرعت میانگین طولی به وسیله تنش‌های برشی آشفته تشکیل می‌شود، اما جریان‌های عرضی اثر قابل ملاحظه‌ای روی آن دارند. برای بیان ارتباط نزدیک بین سرعت‌های میانگین و مشخصه‌های آشفستگی باید مطالعات نظری و آزمایشگاهی را به یکدیگر مرتبط ساخت [۳].

جریان‌های ثانویه، ساختارهای سه‌بعدی ایجاد جریان میانگین اصلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲]. داده‌های آزمایشگاهی مشخص می‌کنند که تنش‌های برشی مرزی و



شکل ۲- حرکت به سمت گوشه‌ی سلول‌های جریان و نحوه‌ی تغییر سلول‌های جریان

برای زوایای (۱) $\theta = 60^\circ$ (۲) $\theta = 44^\circ$ و (۳) $\theta = 32^\circ$ [۲]

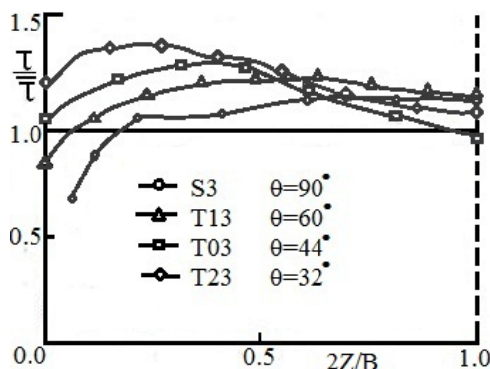
دیواره دور می‌شود، کاهش می‌یابد. در جریان کانال دوزنقه‌ای، تنش برشی بستر نزدیک گوشه بیشتر از آن در کانال‌های مستطیلی است. شکل ۳ مقایسه‌ای بین توزیع تنش برشی در کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای نشان می‌دهد که این مقادیر به کمک تنش برشی میانگین بی‌بعد شده‌اند. این نمودار حاصل کار آزمایشگاهی تومیناگا و همکارانش می‌باشد. همانطور که در این شکل

الگوی سلول‌های جریان ثانویه فقط به وسیله‌ی شکل منحصر به فرد مقطع عبوری و ناهمگنی توزیع زبری آن کنترل می‌شود. بنابراین سطح نهایی آشفستگی برای پیش‌گویی صحیح میدان جریان در CFD استفاده می‌شود [۵].

تنش برشی در ناحیه‌ای که جریان ثانویه به سمت دیواره حرکت می‌کند، افزایش و در نواحی که جریان ثانویه از

مهم‌ترین عامل ایجاد این موضوع را می‌توان به حرکت بیشتر سلول‌های جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای به سمت گوشه دانست.

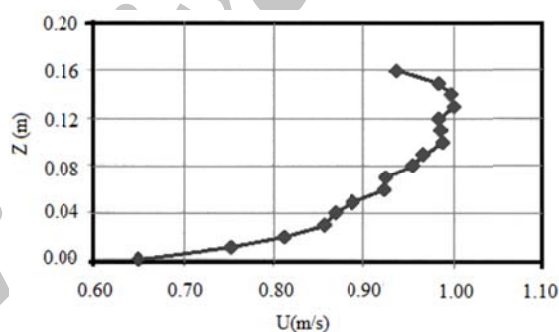
مشاهده می‌شود، مقدار تنش برشی کف کانال در ناحیه‌ی گوشه‌ی کانال (گوشه‌ی سمت چپ در این شکل) در کانال‌های دوزنقه‌ای بیشتر از کانال مستطیلی است و



شکل ۳- مقایسه‌ای بین توزیع تنش برشی در کانال مستطیلی (S3) و کانال‌های دوزنقه‌ای با زاویای $\theta = 60^\circ$ (T13)، $\theta = 44^\circ$ (T03) و $\theta = 32^\circ$ (T23) [۲]

ناشی از مقاومت هوا باشد، تحت تاثیر جریان‌های ثانویه ضعیف می‌باشد [۶]. این مطلب را می‌توان از شکل ۴ به خوبی دریافت.

سرعت بیشینه در هر مقطع قائم، در نزدیکی سطح آب و در فاصله ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ عمق جریان از سطح آزاد اتفاق می‌افتد. علت اصلی اینکه سرعت بیشینه در نزدیکی سطح آزاد پیش می‌آید بیش از آنکه تحت تاثیر تنش برشی



شکل ۴- وقوع سرعت طولی ماکزیمم در نزدیکی سطح آب [۵]

دلایل رشد استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی را می‌توان در ارائه‌ی حل تقریبی برای معادلات ناویر استوکس، کاهش بازه‌ی زمانی برای تغییر پارامترها، طراحی و توسعه‌ی ابزارها، ارزان‌تر بودن نسبت به مدلسازی‌های آزمایشگاهی و نیز قابلیت اعتماد بالای آن برای شبیه‌سازی شرایط جریانی که انجام آن در آزمایشگاه امکان‌پذیر نیست، دانست. حل مسائل سیال در دینامیک

۳- دینامیک سیالات محاسباتی

در حقیقت دینامیک سیالات محاسباتی علم جایگزینی معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم با اعداد و پیشروی این اعداد در مکان و یا زمان برای به دست آوردن یک توصیف عددی نهایی از میدان جریان کامل دلخواه، در مقابل حل تحلیلی در شکل بسته است [۷].

فقد عکس‌العمل، جریان‌های چندفازی، مسائل احتراق و ... را دارا می‌باشد [۹].

نرم‌افزار ANSYS CFX روش عددی حجم محدود مبتنی بر المان را مورد استفاده قرار می‌دهد. در این نرم افزار دو مدل مجزا اولرین-اولرین^۱ برای جریان چند فازی، و ردیابی ذره لانگرانژی^۲ موجود است. جهت مدل سازی سطح آزاد، دو زیر مدل جریان همگن چند فازی^۳ و غیر همگن چند فازی^۴ ارائه شده است که طرح‌های محدود شده اولرین-اولرین هستند [۹].

نرم‌افزار ANSYS CFX قابلیت تحلیل جریان آرام و آشفته، سیالات تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، سیالات نیوتنی یا غیرنیوتنی و جریان با سطح آزاد را دارد و در زمینه‌های گوناگون نظیر هوا-فضا، مهندسی عمران، مهندسی محیط، مسائل دریایی و ... نیز کاربرد دارد [۱]. پس از آشنایی اجمالی با نرم‌افزار مورد استفاده در گام بعدی مراحل مدل‌سازی عددی در این نرم‌افزار ارائه می‌گردد.

۵- مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان

ثانویه

یکی از راه‌های بررسی و مطالعه‌ی پدیده‌های فیزیکی بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. از جمله این پدیده‌های فیزیکی مسائل هیدرولیکی پیچیده‌ای است که امکان بررسی آن‌ها به صورت تحلیلی وجود ندارد و از لحاظ بررسی‌های تجربی نیز با مشکلات عنوان شده مواجه می‌باشند. برای استفاده از CFD در هر مسئله‌ای، نخست باید نتایج آن را با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد و پس از صحت‌سنجی و انطباق قابل قبول نتایج بر بررسی‌های آزمایشگاهی به آن استناد نمود [۱]. در مطالعه‌ی حاضر نخست برای صحت-

سیالات محاسباتی به کمک روش‌های عددی در قالب الگوریتم‌هایی صورت می‌پذیرد [۱].

حل عددی یک معادله‌ی دیفرانسیل از یک دسته اعداد تشکیل یافته که با استفاده از آن‌ها می‌توان توزیع متغیر وابسته را به دست آورد. به عبارت دیگر، راه‌حل عددی شبیه یک تجربه‌ی آزمایشگاهی است که طی آن قرائت‌هایی از روی دستگاه انجام می‌گیرد و در نتیجه ما قادر خواهیم بود که توزیع کمیت‌های اندازه گرفته شده را در محدوده‌ی مورد بررسی، برقرار سازیم. هم تحلیل‌گر عددی و هم آزمایش‌گر در مواجهه با تعداد محدودی مقادیر عددی به عنوان نتیجه می‌باشند. البته، حداقل در مقاصد عملی، باید تعداد این مقادیر به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد [۸].

برای بهره‌گیری از روش‌های عددی، به دلیل بالا بودن حجم محاسبات، ناگزیر به استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی هستیم. این نرم‌افزارهای محاسباتی، امکان به دست آوردن اطلاعات کامل با جزئیات دقیق‌تر و بیشتری را فراهم می‌کنند. به‌طور مثال به کمک آن‌ها حتی می‌توان مواردی از قبیل تغییرات سرعت، فشار و درجه حرارت را در کل حوزه‌ی مورد مطالعه به دست آورد. در حالیکه کسب این نتایج در شرایط آزمایشگاهی امکان‌پذیر نمی‌باشد [۱]. در ادامه به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده در این مطالعه پرداخته خواهد شد.

۴- معرفی نرم‌افزار ANSYS CFX

نرم‌افزار ANSYS CFX، یک نرم‌افزار با هدف عمومی دینامیک سیالات محاسباتی است که یک حلگر پیشرفته را با قابلیت‌های پیش و پس‌پردازشگر قدرتمند ترکیب کرده و توانایی مدل کردن مواردی از قبیل جریان‌های پایدار و ناپایدار، جریان‌های آرام و آشفته، جریان‌های مادون صوت و در حد صوت و مافوق صوت، نیروی شناوری، جریان‌های غیرنیوتنی، انتقال مؤلفه‌های اسکالر

¹ Eulerian-Eulerian

² Langrangian Particle Tracking

³ Homogeneous Multiphase Flow

⁴ Inhomogeneous Multiphase Flow

گام در مدلسازی عددی، مدلسازی هندسه‌ی کانال می‌باشد.

سنجی نتایج از مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران (مدل T03) بهره گرفته شده است. در جدول (۱) مشخصات این مدل آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. اولین

جدول ۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

شیب کف کانال	سرعت میانگین (cm/s)	زویه دیواره جانبی (°)	نسبت ابعادی	عرض سطح (cm)	عرض کف (cm)	عمق آب (cm)	آزمایش
۰/۰۳۴	۳۷/۳۳	۴۴	۲/۲	۳۸/۹	۲۰/۰۰	۹/۰۵	T03

ایجاد دامنه محاسباتی استفاده می‌شود. شبکه ساختاریافته، دارای مش مربعی در حالت دوبعدی و مکعبی در حالت سه‌بعدی است و شبکه بی‌ساخت که بیشتر جهت پوشش دادن اشکال نامنظم مناسب است، در حالت دوبعدی از المان‌های مثلثی و در حالت سه‌بعدی از المان‌های هرمی و منشوری استفاده می‌کند [۱۰]. در CFD حل مسئله به صورت تکرار یک الگوریتم صورت پذیرفته و تا رسیدن به دقت مورد نظر ادامه می‌یابد. رفع خطاهای موجود در حل مسئله از طریق تغییر در شبکه و بهینه نمودن آن صورت می‌پذیرد و در اکثر موارد تغییر شبکه شامل ریزتر نمودن آن در قسمت‌های مورد نیاز است تا جاییکه نتایج حاصل مستقل از ابعاد سلول‌های موجود در شبکه شده و نتایج کلیدی تغییر نکنند. این امر به کمک سعی و خطا و تکرار حل در دفعات مکرر با شبکه‌بندی‌های متفاوت حاصل می‌شود [۱].

در این مطالعه برای شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان نیز از نرم‌افزار ICEM CFD بهره گرفته شده است. از آنجایی که مسئله‌ی موردنظر به‌شدت نسبت به شبکه‌بندی محدوده جریان، به‌ویژه قسمت سطح آب و دیواره‌های کانال حساس بوده و شبکه‌بندی نزدیک سطح آب در نتایج حاصل از تحلیل کاملاً مؤثر می‌باشد، به‌کمک قابلیت این نرم‌افزار در ایجاد این نوع شبکه، هندسه‌ی کانال شبکه‌بندی گردیده است [۱]. در این راستا تعداد گره‌های موجود در جهات و قسمت‌های مختلف کانال متفاوت بوده و بعد از چندین مرحله حساسیت‌سنجی نتایج نسبت به

۵-۱- مدلسازی هندسی کانال

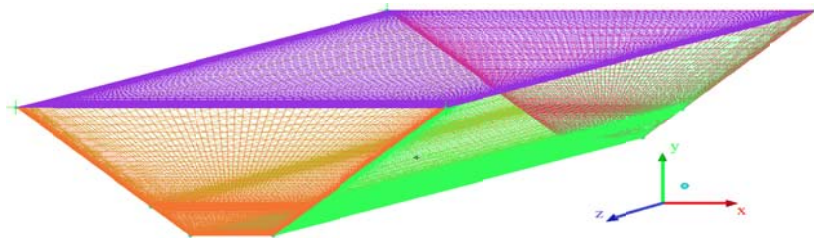
مدلسازی هندسی عبارت از رسم بدنه و محدوده‌ی موردنظر می‌باشد که برای انتقال این هندسه به نرم‌افزارهای دیگر و انجام عملیات محاسباتی روی آن، باید از یک نرم‌افزار کارا در این زمینه بهره گرفت [۱]. نرم‌افزار مورد استفاده برای رسم هندسه‌ی کانال نرم‌افزار ICEM CFD می‌باشد.

این نرم‌افزار جزء نرم‌افزارهای پیوندی و از زیرمجموعه نرم‌افزارهای ANSYS CFX بوده و به علت دارا بودن قابلیت شبکه‌بندی در کنار رسم هندسه به عنوان گزینه‌ی انتخابی مورد استفاده قرار گرفت. رسم هندسه‌ی کانال در این نرم‌افزار در چهار مرحله (مختصات‌دهی نقاط، رسم خطوط، تخصیص سطوح و ایجاد حجم) صورت می‌گیرد [۱]. پس از مدلسازی هندسه‌ی کانال برای ادامه‌ی روند مدلسازی باید محدوده‌ی موردنظر شبکه‌بندی شود.

۵-۲- شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان

ایجاد شبکه‌بندی مناسب برای حل معادلات اساسی حاکم بر مدل، یکی از بخش‌های مهم در مدلسازی می‌باشد. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان در حل معادلات به یک همگرایی مناسب دست یافت و بالعکس انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی مناسب در محاسبات گردد [۱]. در روش CFD از شبکه‌های مختلفی مثل ساختاریافته و بی‌ساخت برای

المان‌های موجود در کل حجم به ترتیب ۲۰۷۹۰۰۰ و ۲۰۱۵۳۱۶ می‌باشد. شبکه‌بندی انجام شده به کمک این نرم‌افزار در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، شبکه‌بندی مطابق نکات یادشده صورت گرفته است.



شکل ۵- شبکه‌بندی محدوده‌ی جریان در محیط نرم‌افزار ICFM CFD

۳. شرط مرزی دیواره^۱: این شرط برای محدود کردن

نواحی سیال با مرز جامد به کار می‌رود. در مسئله‌ی موردنظر، جداره‌ها شامل کف و دو دیواره‌ی کانال می‌باشد. در این جداره‌ها از اصل پذیرش جدار (شرط عدم لغزش) بهره گرفته شده است [۱]. برای صحت‌سنجی نتایج براساس مدل آزمایشگاهی موجود، در مرحله‌ی اول جداره‌ها مسطح^۲ در نظر گرفته می‌شوند؛

شرط مرزی سطح آزاد یا باز شو^۳: در نرم‌افزار ANSYS CFX برای معرفی شرط مرزی سطح آزاد از گزینه‌ی OPENING استفاده می‌شود.

۶- انتخاب مدل آشفتگی

جریان‌های ثانویه به دلیل ناهمگنی آشفتگی ایجاد شده و در نهایت القا شده توسط آشفتگی هستند، بنابراین انتخاب نوع مدل آشفتگی به طوری که بتواند در نمایش سلول‌های جریان مؤثر باشد، از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی عددی جریان‌های ثانویه در کانال‌ها است [۱].

¹ Wall

² Smooth

³ Opening

شبکه‌بندی، شبکه‌ی مناسب انتخاب گردید. المان‌های موجود این شبکه از نوع شش‌وجهی بوده و همانطور که مشاهده می‌شود در قسمت دیواره‌ها و به‌خصوص سطح آزاد متراکم‌تر بوده که این مسئله از زیاد بودن تعداد گره‌ها در این نواحی نشئت می‌گیرد. تعداد گره‌ها و

۵-۳- شرایط مرزی

با توجه به آنکه تمام سیستم‌های فیزیکی در یک فاصله‌ی معین دارای مرز می‌باشند، در محاسبات باید شرایط مشخصی در حدود یا مرزهای سیستم فیزیکی در نظر گرفته شوند. این شرایط، شرایط مرزی نامیده می‌شوند [۱۱]. اکثر شرایط مرزی در کانال‌های روباز شبیه به شرایط مربوطه در مجراهای بسته هستند. تنها شرط مرزی در سطح آزاد بین این دو دسته از جریان‌ها متفاوت است [۹].

شرایط مرزی اعمال شده برای مدل‌سازی عددی موضوع مورد نظر در نرم‌افزار ANSYS CFX به‌صورت زیرانجام گرفت:

۱. شرط مرزی سرعت مشخص در ورودی: شرط

مرزی سرعت برای تعریف سرعت جریان، با تمام خاصیت‌های اسکالر جریان، در ورودی به کار می‌رود [۱۲] ($W = 0.3733 \text{ m/sec}$)؛

۲. شرط مرزی ارتفاع مشخص در خروجی: پس از

انتخاب شرط مرزی سرعت در ورودی و با توجه به زیربهرانی بودن جریان، شرط مرزی که برای خروجی کانال در نظر گرفته شد، عمق جریان بوده که در قالب فشار هیدرواستاتیک به این مقطع اعمال گردیده است ($y = 0.0905 \text{ m}$)؛

در این معادله ϕ_{ij} مربوط به همبستگی فشار-کرنش، P_{ij} عبارت تولید دقیق و $P_{ij,b}$ عبارت تولید به‌علت شناوری است (به علت گسترده بودن معادلات از ذکر جزئیات بیشتر خودداری نموده و توصیه می‌شود جهت دسترسی به معادلات کامل‌تر به مرجع [۱] و [۹] مراجعه شود). مدل SSG به شدت نسبت به شرایط شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره حساس بوده و برای شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه مدل مناسبی است.

۷- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

در ادامه پس از ارائه‌ی نتایج مربوط به صحت‌سنجی، نتایج حاصل از افزایش یکنواخت در زبری جداره‌های کانال نمایش داده شده و اثر این افزایش بر سلول‌های جریان ثانویه و توزیع دو پارامتر هیدرولیکی جریان مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. شایان ذکر است که بنابر مطالعات صورت گرفته بررسی‌ها در سطح همگرایی 10^{-4} در محیط نرم‌افزار صورت گرفته است.

۷-۱- صحت‌سنجی نتایج

همانطور که پیشتر اشاره شد برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی ساخته شده از نتایج مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران گرفته می‌شود. برای این کار نتایج مربوط به سطح آزاد، شکل‌گیری سلول‌های جریان، توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی مرزی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند. شکل ۶ مربوط به صحت‌سنجی سطح آزاد براساس عمق آب در کانال می‌باشد. سطح آب مدل‌سازی شده در کانال مقداری نوسان داشته و البته با مقداری خطا همراه است، حداکثر مقدار خطا در حدود ۰/۱۸٪ می‌باشد. البته بیشترین مقدار این خطا مربوط به نواحی نزدیک به ورودی کانال بوده و این مسئله را می‌توان به طول توسعه-

یک مدل آشفتگی عبارتست از یک رویه‌ی محاسباتی برای بستن سیستم معادلات جریان متوسط، به گونه‌ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد. برای یک مدل آشفتگی در موارد کلی، برنامه‌ی CFD باید دارای کاربرد وسیع، دقیق، ساده و از نظر اقتصادی قابل اجرا باشد [۱۳].

برای انتخاب مناسب‌ترین مدل اغتشاشی جهت مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه، چهار مدل SSG، LRR، SST و $k - \epsilon$ برای مقایسه انتخاب و پس از بررسی و مقایسه‌ی نتایج آن‌ها گزینه‌ی برتر تعیین گردید. تفاوت اصلی این چهار مدل اغتشاشی به نحوه‌ی برخورد آن‌ها با تنش‌های رینولدز و مدل کردن این تنش‌ها، که مهم‌ترین عامل ایجاد جریان‌های ثانویه در کانال‌های مستقیم هستند، مربوط می‌شود.

پس از بررسی‌های انجام شده مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز^۱ SSG که زیر مجموعه مدل‌های آشفتگی معادله تنش‌های رینولدز می‌باشد برای مدل‌سازی سلول‌های جریان مناسب تشخیص داده شد [۱]. این مدل برپایه‌ی معادلات انتقال برای همه‌ی مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز و نرخ استهلاک قرار دارد و فرضیه‌ی ویسکوزیته‌ی ادی را استفاده نمی‌کند اما یک معادله برای تنش‌های رینولدز در سیال به کار می‌گیرد [۹].

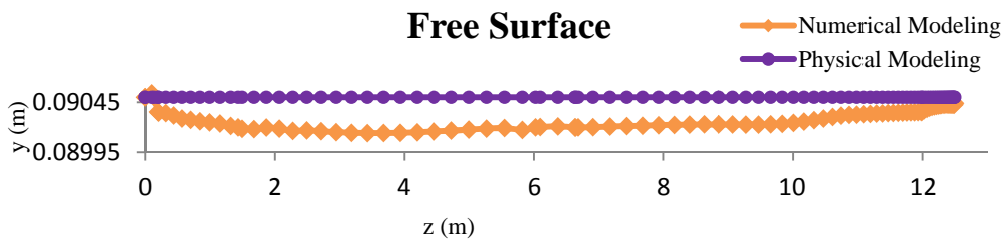
مدل استاندارد تنش رینولدز در نرم‌افزار ANSYS CFX برپایه‌ی معادله‌ی ϵ قرار دارد. حلگر این نرم‌افزار معادلات زیر را برای انتقال تنش‌های برشی رینولدز حل می‌کند [۹]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{U_k \rho u_i u_j}) \\ & - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\eta + \frac{2}{3} C_s \rho \frac{k^2}{\epsilon} \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} \right) \\ & = P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \epsilon + \phi_{ij} + P_{ij,b} \end{aligned} \quad (۴)$$

^۱ SSG Reynolds Stress Model

حاصل از مدل‌سازی سطح آزاد به کمک الگوریتم موجود در نرم‌افزار مورد تأیید قرار می‌گیرد.

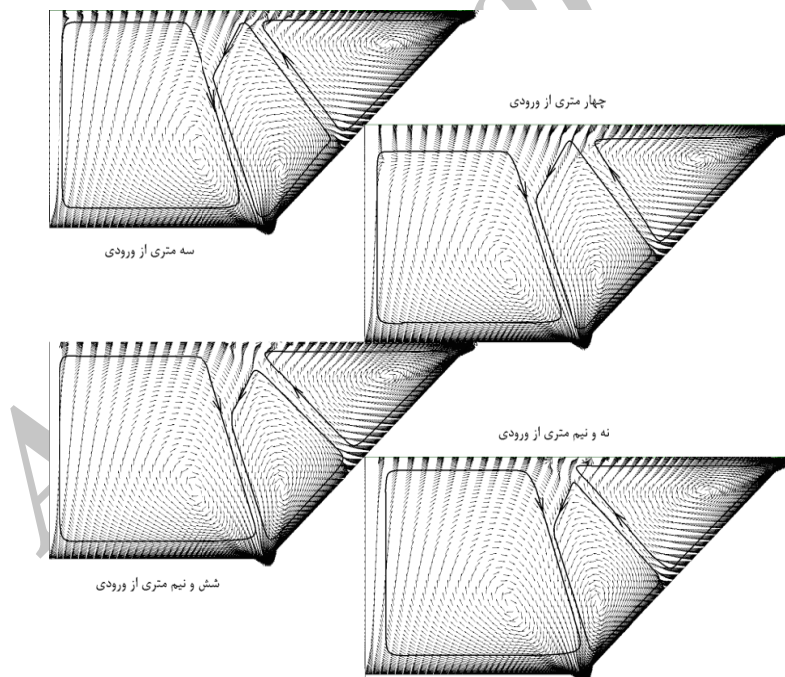
یافتگی مربوط دانست. این مقدار کم خطا را می‌توان ناشی از شبکه‌بندی در اطراف سطح آزاد دانست. بنابراین نتایج



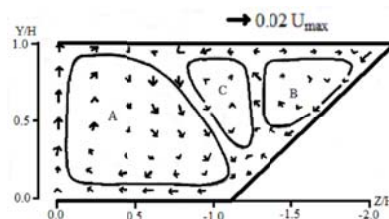
شکل ۶- نمودار سطح آزاد آب در کانال

موقعیت قرار گیری، جهت چرخش هریک از سلول‌ها و حرکت روبه گوشه‌ی هر سه سلول مهم‌ترین نکاتی هستند که با یکدیگر در توافق بوده و در حقیقت این چهار موضوع، مؤید عملکرد صحیح الگوریتم به کار رفته در بررسی شکل‌گیری سلول‌ها جریان ثانویه می‌باشند.

روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه از فاصله‌ی ۳ متری از ورودی کانال تا فاصله ۹/۵ متری در شکل ۷ نمایش داده شده و در شکل ۸ نتایج آزمایشگاهی برای مقایسه ارائه شده است. با مقایسه‌ی این دو شکل مشاهده می‌شود که وجود سه سلول در نصف مقطع کانال،



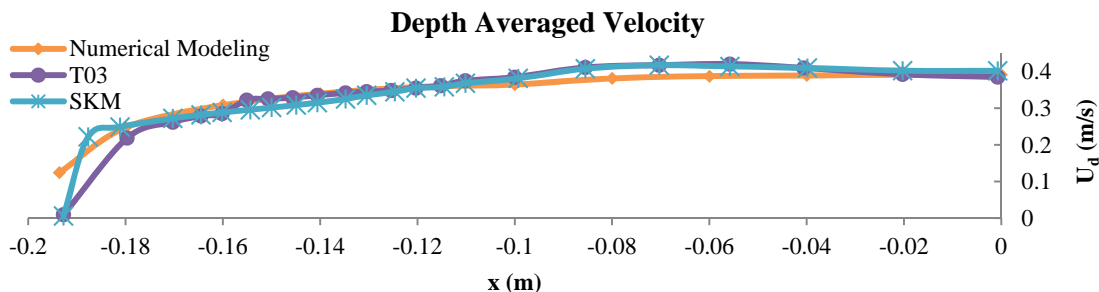
شکل ۷- سلول‌های جریان ثانویه حاصل از مدل‌سازی عددی



شکل ۸- سلول‌های جریان ثانویه در آزمایش تومیناگا و همکاران

علاوه بر نتایج آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران از نتایج تحلیلی شینو و نایت (Shiono and Knight method (SKM)) نیز بهره گرفته شده است.

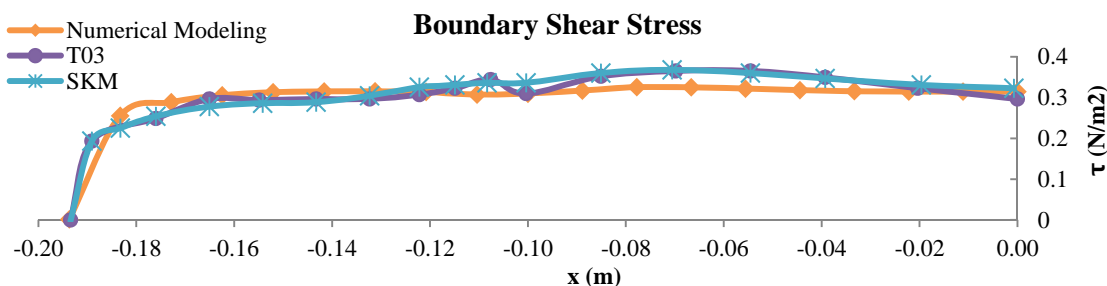
در گام بعدی نتایج مربوط به سرعت متوسط عمقی و تنش برشی مورد صحت‌سنجی واقع و نتایج آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است. برای این منظور



شکل ۹- صحت‌سنجی نتایج مربوط به سرعت متوسط عمقی

طرفی به نقص نرم‌افزار و الگوریتم به‌کار رفته در آن برای محاسبه‌ی سلول‌های جریان مربوط دانست. تنش برشی یکی از مسائل اساسی در بررسی اثرات جریان روی جداره‌های کانال (شامل کف و دو دیواره‌ی جانبی) بوده، از جمله مسائلی است که بسیار مورد توجه قرار دارد. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، نتایج مدل-سازی عددی تنش برشی دیواره‌ها و کف کانال با حداکثر خطایی در حدود ۱۱٪، انطباق نسبتاً خوبی با نتایج مدل-سازی آزمایشگاهی و تحلیلی داشته و در این مورد نیز صحت مدل‌سازی عددی و قابلیت دینامیک سیالات محاسباتی تأیید می‌گردد. بنابراین می‌توان از این مدل عددی به عنوان جایگزینی برای مدل‌های آزمایشگاهی در موارد مشابه بهره برد.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود نمودار سرعت عمق میانگین (سرعت میانگین شده در عمق) محاسبه شده به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انطباق خوبی با نتایج کار آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی داشته و فقط در ناحیه‌ی نزدیک به گوشه‌ی کانال ($-0.1 < x < -0.05$) مقداری خطا در حدود ۵٪ وارد محاسبات شده است. به نظر می‌رسد این مقدار خطا مربوط به حرکت سلول‌های جریان ثانویه به سمت گوشه‌ها می‌باشد که همانطور که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود، در مدل‌سازی عددی حرکت سلول‌ها به سمت گوشه بیشتر از مدل تجربی آن است. این موضوع را از یک طرف می‌توان به کم بودن تعداد نقاط در اندازه‌گیری آزمایشگاهی مربوط دانست (۱۰۰ نقطه‌ی اندازه‌گیری در نصف مقطع) و از



شکل ۱۰- صحت‌سنجی نتایج مربوط به تنش برشی مرزی

جریان، سطح آزاد و سرعت عمق میانگین و دقت خوب در مدل‌سازی تنش برشی جداره‌ها می‌باشد. با استناد به این

نتایج این صحت‌سنجی‌ها و بررسی‌ها حاکی از انطباق خوب مدل‌سازی عددی در زمینه‌ی مدل‌سازی سلول‌های

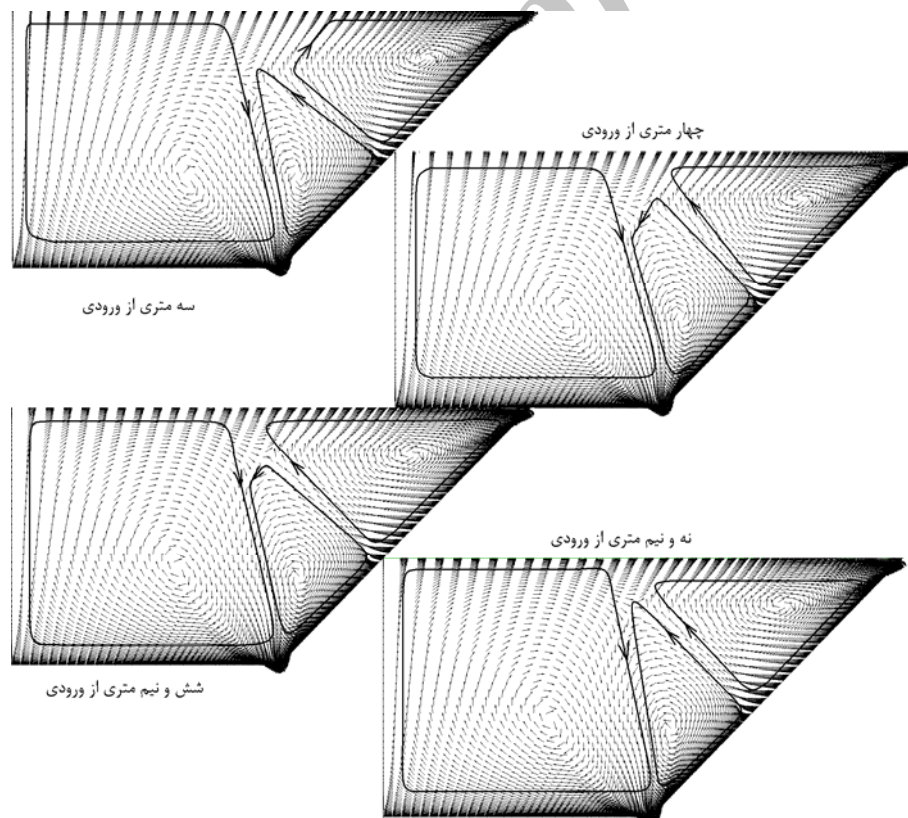
که برای این پارامتر در نرم‌افزار ANSYS CFX در نظر گرفته شده است، مقدار ضریب زبری را بر حسب ارتفاع ماسه‌ی هم‌ارز دریافت نموده و در محاسبات در نظر می‌گیرد [۱]. در ادامه نتایج حاصل از این بررسی‌ها ارائه می‌گردد.

برای این بررسی دو ارتفاع معادل زبری $0/003$ متر و $0/01$ متر برای جداره‌ها در نظر گرفته شد و اثر تغییر زبری روی شرایط جریان بررسی گردید. با افزودن زبری به جداره‌ها شرایط همگرایی تغییر یافته و همگرایی نتایج دیرتر صورت می‌گیرد. در اولین گام از این بررسی، اثر این افزایش بر روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه مورد بحث قرار خواهد گرفت. نتایج مربوط به این بررسی‌ها در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است

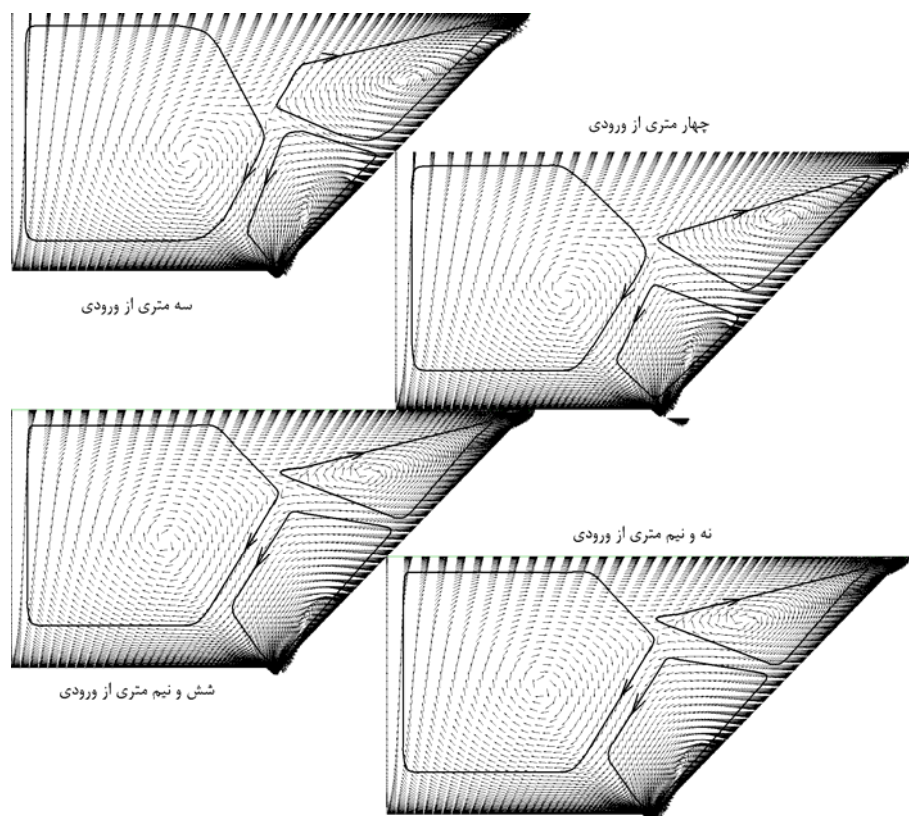
نتایج، می‌توان مدل‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی را قادر به پیش‌بینی موارد مشابه دانست. با تکیه بر نتایج این صحت‌سنجی، در ادامه اثر تغییر در زبری کف کانال بر خصوصیات جریان بررسی می‌شود.

۲-۷- بررسی اثر افزایش یکنواخت زبری جداره‌های کانال بر نتایج عددی

زبری سطوح به صورت موضعی به افزایش آشفتگی در نزدیکی دیواره و در نتیجه افزایش تنش برشی دیواره منتهی می‌شود [۹]. پس از بررسی نتایج در حالت مسطح بودن جداره‌های کانال و اطمینان از صحت آن‌ها، در این بخش اثر افزایش یکنواخت زبری جداره‌ها روی نتایج بررسی خواهد شد. برای در نظر گرفتن اثر زبری جداره‌ها، باید ضریب زبری آن‌ها در محاسبات وارد شود. گزینه‌ای



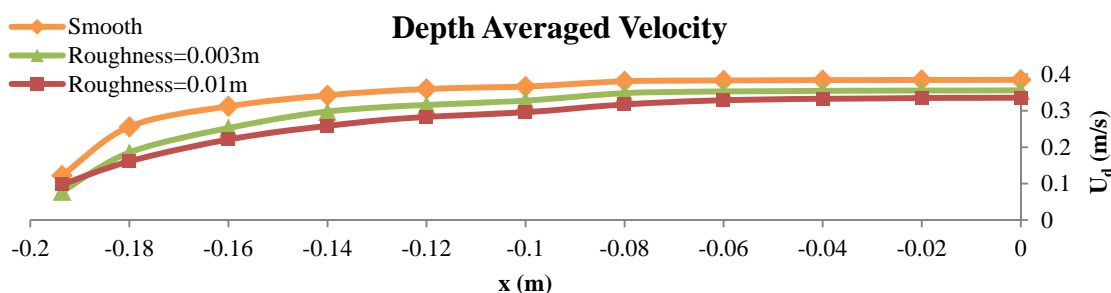
شکل ۱۱- روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در حالت جداره‌های با ارتفاع زبری معادل $0/003$ متر



شکل ۱۲- روند شکل‌گیری سلول‌های جریان در حالت جداره‌های با ارتفاع زبری معادل ۰/۰۱ متر

سطح آب قرار می‌گیرد. در ادامه اثر زبری بر دو پارامتر دیگر جریان بررسی خواهد شد. مقایسه‌ی بین نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای جداره‌های مسطح و ارتفاع زبری معادل ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱ متر جداره‌ها در شکل (۱۳) صورت گرفته است. این نتایج حاکی از کاهش میزان سرعت عمق میانگین با افزایش در مقدار زبری جداره‌ها است. کاهش سرعت در قسمت دیواره‌های کانال چشمگیرتر می‌باشد.

مطابق نظر تومیناگا و همکاران (۱۹۸۹)، بارزترین اثر تغییر زبری جداره‌های کانال بر سلول‌های جریان، در مقیاس عرضی روی می‌دهد و این مسئله به وضوح در نتایج مدل عددی مشاهده می‌شود. همانطور که در دو شکل (۱۱) و (۱۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش ارتفاع زبری ابعاد سلول قرار گرفته روی کف کانال افزایش یافته، سلول مربوط به گوشه‌ی کانال کوچکتر شده و از موقعیت اولیه‌ی خود پایین‌تر می‌آید. با ادامه روند افزایش زبری، این سلول کاملاً زیر سلول روی جداره‌ی جانبی و نزدیک

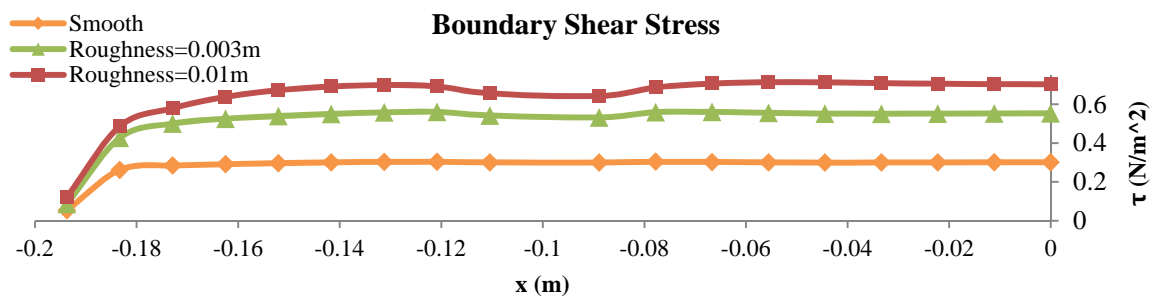


شکل ۱۳- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی سرعت عمق میانگین برای جداره‌های مسطح و جداره‌ها با ارتفاع زبری معادل ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱ متر

میانگین با یکدیگر نسبت معکوس دارند، به‌گونه‌ای که افزایش یکی از این دو پارامتر منجر به کاهش پارامتر دیگر می‌شود. اما با دقت در نحوه‌ی این تغییرات به‌وضوح مشاهده می‌شود که میزان افزایش تنش برشی مرزی ($0/3 < \tau < 0/7$) چشمگیرتر از تغییرات سرعت ($0/33 < U_d < 0/38$) است.

در شکل (۱۴)، نتایج مدل‌سازی تنش برشی کف و دیواره برای مسطح و زیر بودن جداره‌ها مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ی این نتایج بیانگر افزایش تنش برشی مرزی با افزایش زیری جداره‌ها بوده و همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود این افزایش در عرض کانال به صورت یکنواخت می‌باشد که این مسئله را می‌توان به افزایش یکنواخت زیری جداره‌ها ارتباط داد.

با در نظر گرفتن نحوه‌ی تغییرات سرعت و تنش برشی مرزی می‌توان گفت که تنش برشی مرزی و سرعت عمق



شکل ۱۴- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی تنش برشی کف و دیواره برای جداره‌های مسطح و جداره‌ها با ارتفاع زیری معادل ۰/۰۰۳ و ۰/۰۱ متر

۵. افزایش یکنواخت زیری جداره‌های کانال موجب افزایش یکنواخت میزان تنش برشی مرزی به صورت عرضی خواهد شد؛
۶. میزان افزایش تنش برشی مرزی ($0/3 < \tau < 0/7$) در اثر افزایش زیری جداره‌ها چشمگیرتر از تغییرات سرعت ($0/33 < U_d < 0/38$) است و
۷. نتایج حاکی از وجود رابطه‌ی معکوس بین سرعت متوسط عمقی و توزیع تنش برشی مرزی در این مورد خاص است. به این معنی که افزایش یکی از این دو پارامتر منجر به کاهش پارامتر دیگر می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

- در یک جمع‌بندی کلی می‌توان نتایج حاصل از این بررسی را به صورت زیر بیان نمود:
۱. الگوریتم بکار رفته در این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی سلول‌های جریان، توزیع سرعت و تنش برشی مرزی می‌باشد؛
 ۲. شرایط مرزی اعمالی مناسب می‌باشد؛
 ۳. اعمال زیری به صورت یکنواخت در جداره‌های کانال تاثیر محسوس روی روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه ایجاد نخواهد کرد؛
 ۴. با افزایش یکنواخت زیری جداره‌های کانال سرعت متوسط عمقی در عرض کانال به صورت یکنواخت کاهش می‌یابد؛

مراجع

- [۱] تاج‌نسایی، مهنا؛ (۱۳۸۹). بررسی عددی سلول‌های جریان ثانویه، توزیع سرعت و تنش برشی در جریان کانال‌های دوزنقه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- [2] Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K., Nakagava, H., (1989). "Tree-dimensional turbulent structure in straight open channel flows", Journal of Hydraulic Researcher, VOL27, NO.1.
- [3] Shnipov, F.D., (1989). "Three-dimensional kinematic structure of a flow in trapezoidal channels", Translated from *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stov*, No.9, pp. 48-52, September.
- [4] Khodashenas, S.R., Abderrezzak, K.E.K., Paquier, A., (2008). "Boundary Shear Stress in Open Channel Flow; A Comparison among Six Methods", Journal of Hydraulic Researcher, VOL46, NO.5, pp.598-609.
- [5] Knight, D.W., Omran, M., Tang, X., (2007). "Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flow", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 1, ©ASCE, pp. 39-47.
- [۶] حسینی، سید محمود. ابریشمی، جلیل؛ (۱۳۸۱). هیدرولیک کانال‌های باز، دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد، چاپ نهم.
- [7] Javarehshkian. M.H., (1993), Secondary Flow in a 90 Degree Bend Having Rectangular Cross-Section, Thesis of Master of Science (Engineering), The University of Liverpool, England, September.
- [۸] پاتانکار، سوهاس، (۱۳۷۳)، روش‌های عددی در انتقال حرارت و جریان سیال، ترجمه اسماعیل‌زاده. ا.، (انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- [9] ANSYS CFX user manual. V12.0. (2009). ANSYS, Inc. ANSYS Europe. Ltd.
- [۱۰] پناهیان، ع.؛ (۱۳۸۷)، محاسبات دینامیکی سیالات راه حل تئوری جهت بررسی و پیش‌بینی عملکرد و درک مطالعه؛ <http://cfd-center.blogfa.com/post-1.aspx>
- [۱۱] حنیف‌چادری، م، (۱۳۷۶) جریان کانال‌های باز، ترجمه سیدعلی‌اکبر صالحی‌نیشاپوری، تقدیسین. س.م. چاپ اول، انتشارات جزیل، تهران.
- [۱۲] سلطانی، م. رحیمی‌اصل، م. ر؛ (۱۳۸۶)، دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم‌افزار FLUENT، چاپ چهارم، نشر طراح، تهران.
- [۱۳] ورستیگ، ه.ک، مالاسکرا. و، (۱۳۸۶)، مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی. ترجمه شجاعی‌فرد، م.ح. نورپورهشترودی، ع.ر. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه علم و صنعت. تهران.