

به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در مدل سازی سلول های جریان ثانویه در کانال ذوزنقه ای*

محمد گیوه چی^(۳)مهنا تاج نسایی^(۲)مهدی اژدري مقدم^(۱)

چکیده جریان عبوری از کانال ها دارای سه مؤلفه ی سرعت، یک مؤلفه در جهت جریان و دو مؤلفه در جهت عرضی کانال است. در اثر ناهمگنی نوسانات سرعت، یک سری گردابه های چرخشی در مقطع کانال ایجاد می گردند که سلول های جریان ثانویه نامیده می شوند. این سلول ها سبب ایجاد تنش برشی عرضی در جداره های کانال می شوند. در نتیجه بحث فرسایش و آبستگي جداره های کانال را مطرح می کنند. ناهمگنی آشفتگی به علت شرایط مرزی بستر، دیواره ی جانبی و سطح آزاد، نسبت ابعادی کانال و هندسه ی کانال به وجود می آید. مکانیزم ایجاد جریان های ثانویه را می توان به کمک معادله ی چرخش طولی بیان نمود. در این تحقیق با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و نرم افزار ANSYS CFX، جریان در کانال های ذوزنقه ای مدل سازی خواهد شد و علاوه بر بررسی عملکرد CFD در مدل سازی سلول های جریان ثانویه، توزیع سرعت عمق میانگین و تنش برشی مرزی در کانال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا برای ارزیابی مدل ساخته شده از مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران و مدل تحلیلی شینو و نایت بهره گرفته شده است. با صحت سنجی مدل عددی ساخته شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی توافق خوبی مشاهده گردید. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل آشفتگی تنش برشی رینولدز SSG در مدل سازی سلول های جریان بود. سطح همگرایی 10^{-4} به دلیل پایداری نتایج در آن به عنوان سطح همگرایی بهینه انتخاب شد.

واژه های کلیدی کانال ذوزنقه ای، سلول های جریان ثانویه، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، سرعت عمق میانگین، توزیع تنش برشی مرزی.

Application of Computational Fluid Dynamics for Modeling of Secondary Flow cells in Trapezoidal Channel

M. Azhdary Moghaddam

M. Tajnesaie

M. Givvehchi

Abstract Channel flows have three components of velocity, 1 component in flow direction and 2 components in spanwise of Channel. Because of heterogeneity of velocity undulations, in the channel section the vortices are formed that are nominated "Secondary Current Cells". These cells cause the lateral shear stress in the channel walls and introduce the erosion and scour of the channel walls. Heterogeneity of the turbulency is caused due to boundary conditions of the bed, side wall and free surface, the aspect ratio and the geometry of the channel. The mechanism of secondary currents can be expressed by longitudinal vorticity equation. In this research, the flow in trapezoidal channels has been modeled using the "Computational Fluid Dynamics" (CFD) with "ANSYS CFX" soft ware, and additional to investigation of sufficiency of CFD in modeling of secondary flow cells, depth averaged velocity and boundary shear stress distributions are perused. For this purpose, the experimental model of Tominaga, and analytical model of Shiono and knight has been used to verify the numerical results. The numerical results are in agreement with the experimental and analytical models.

Keywords Trapezoidal Channels, Secondary Current Cells, Computational Fluid Dynamics (CFD), Depth Averaged Velocity, Boundary Shear Stress Distribution.

★ تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۸/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۱/۱ می باشد.

(۱) نویسنده مسؤول، دانشیار، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران.

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

(۳) استادیار، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران.

مقدمه

با توجه به اهمیت کانال‌ها در بحث انتقال آب و وابستگی اعتبار سیستم‌های مدیریت آبی به میزان توجه آن‌ها به انتخاب شرایط کانال‌های انتقال آب، بررسی شرایط جریان در آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به گونه‌ای که کاهش ظرفیت انتقال آب به کاهش منابع آب قابل دسترس و در نتیجه افت قابل توجه منابع اقتصادی منجر می‌شود. از مهم‌ترین موضوعات بررسی جریان در کانال‌ها، می‌توان به اثر مؤلفه‌های عرضی سرعت روی جریان اشاره نمود، که بارزترین این اثرات ایجاد سلول‌های جریان ثانویه است. در حال حاضر روش‌هایی که برای محاسبه و طراحی کانال‌ها وجود دارد اثر جریان‌های ثانویه و در نتیجه توزیع نیروهای هیدرودینامیکی موجود روی پیرامون مرطوب را نادیده می‌گیرند و این مسأله یکی از مهم‌ترین دلایل تغییر شکل مقطع عبوری، کاهش قابلیت اعتماد عمل کرد و ظرفیت کانال‌ها است.

در این زمینه مطالعات متعددی به صورت آزمایشگاهی و عددی صورت پذیرفته است که در این میان به صورت نمونه می‌توان به مواردی اشاره نمود، از جمله: بررسی توزیع تنش برشی مرزی در کانال‌های منشوری و داکت‌ها به صورت تجربی توسط نایت و دمتریو [۱]، نایت و همکاران [2]، لای و نایت، رودس و نایت [۱] و یانگ و لیم [3]، تومیناگا و همکاران [4]، جابرزاده و همکاران [5]، ابداع روش شینو و نایت SKM (Shiono and Knight Method) برای محاسبه توزیع‌های جانبی سرعت و تنش برشی عمق میانگین برای جریان در کانال‌های منشوری مستقیم، کاربرد روش SKM برای کانال‌های مختلف توسط نایت و همکاران [6]، خداشناس و همکاران [7]. برای جزئیات بیش‌تر از منبع [۱] می‌توان بهره گرفت.

از آنجایی که کانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای معمول‌ترین شکل مقطع برای انتقال آب به شمار می‌روند، در این مقاله به بررسی سلول‌های جریان

ثانویه در کانال‌های مستقیم با مقطع دوزنقه‌ای پرداخته شده است.

مانند سایر پدیده‌های فیزیکی، برای بررسی سلول‌های جریان ثانویه نیز می‌توان از هر سه نوع دینامیک سیالات تجربی، تئوری و محاسباتی بهره جست. اطلاعات دقیق در مورد یک فرآیند فیزیکی غالباً توسط اندازه‌گیری عملی به دست می‌آید. یک پیش‌گویی تئوری حداکثر استفاده را از نتایج مدل ریاضی خواهد کرد و در مقایسه با آن نتایج تجربی را مورد استفاده کم‌تری قرار می‌دهد. در این زمینه فعالیت‌های گسترده‌ای در قالب مطالعات آزمایشگاهی و به‌ویژه تحلیلی صورت گرفته است. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسأله، تأثیر متقابل فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه‌های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از کاربردهای عملی، از جمله دلایلی هستند که استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های عددی محدود می‌کند [۸].

در این مقاله به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی ANSYS CFX نسخه‌ی 12.0 شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه در کانال‌های دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و برای ارزیابی مدل ساخته شده در محیط نرم‌افزار از مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران [4] کمک گرفته شده است.

سلول‌های جریان ثانویه

جریان‌های ثانویه جریان‌هایی هستند که در صفحه‌ی مقطع جریان و یا حول محوری عمود بر صفحه‌ی مقطع جریان به وجود می‌آیند. این‌گونه جریان‌ها در انحنایها به جریان‌های ثانویه‌ی قوی موسوم می‌باشند ولی در کانال‌های بدون انحنا در پلان نیز، به جهت تأثیر

چرخش طولی توضیح داده می‌شود. معادله‌ی چرخش طولی در جریان آشفته کاملاً توسعه یافته به صورت زیر داده می‌شود [4]:

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

در جایی که

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

که در آن 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 پتانسیل ψ به صورت زیر بیان می‌شوند:

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

که در آن g ویسکوزیته‌ی سینماتیکی سیال، $-\overline{vw}$ تنش برشی رینولدز، $\overline{v^2}$ و $\overline{w^2}$ تنش‌های عمودی رینولدز می‌باشند. توزیع تفاضل تنش‌های عمودی ($\overline{v^2} - \overline{w^2}$) نقش اساسی و مهمی را در ساختار جریان‌های ثانویه بازی می‌کند، به گونه‌ای که تفاوت بین الگوی جریان‌های ثانویه در کانال‌های روباز و بسته به کمک توزیع تفاضل تنش‌های عمودی ($\overline{v^2} - \overline{w^2}$) توضیح داده می‌شود. در شکل (۱) توزیع این تفاضل در سه نوع کانال نمایش داده شده است. جرارد نیز این توزیع را تعیین کننده‌ی ساختار جریان‌های ثانویه می‌داند [4].

زبری جدار و نامنظمی مقطع، جریان‌های ثانویه‌ی ضعیف ایجاد می‌گردند [۹].

به طور کلی می‌توان جریانات چرخشی را به سه نوع اصلی چرخش حول محور عمقی، محور عرضی و محور طولی تقسیم‌بندی کرد [۵]. جریان‌های ثانویه، نتیجه‌ای از ناهمگنی آشفتگی هستند که به دلیل شرایط مرزی بستر، دیواره‌ی جانبی و سطح آزاد، نسبت ابعادی کانال و هندسه‌ی کانال ایجاد می‌شوند. این نوع جریان‌ها نسبت به هندسه‌ی کانال بسیار حساس هستند. تومیناگا و همکاران، بررسی جریان‌های ثانویه در مهندسی هیدرولیک در جریان کناهای روباز را به دلیل اثر این جریان‌ها روی میدان جریان میانگین اصلی، قانون اصطکاک، تشکیل اشکال سه‌بعدی بستر از قبیل نوارهای شنی و انتقال رسوب سه‌بعدی با اهمیت می‌دانند [4].

مکانیسم تولید جریان‌های ثانویه

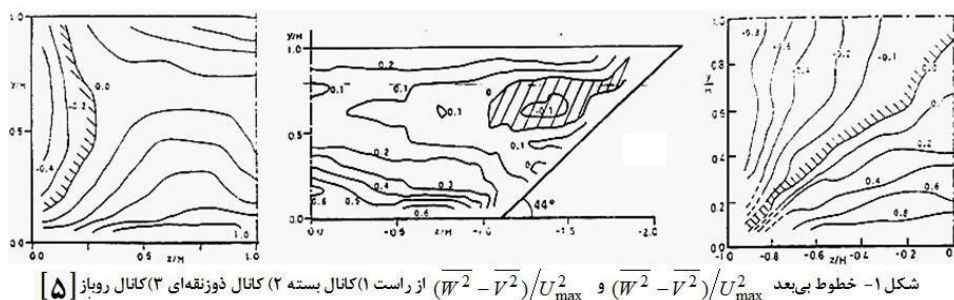
علت ایجاد جریان‌های عرضی در جریان طولی یکنواخت، ناهمسانی تنش‌های رینولدز و به‌طور اساسی مؤلفه‌های عمودی آن است. میدان سرعت میانگین طولی به وسیله‌ی تنش‌های برشی آشفته تشکیل می‌شود، اما جریان‌های عرضی اثر قابل ملاحظه‌ای روی آن دارند [10].

پراتل دو مکانیسم اصلی به وجود آورنده‌ی جریان‌های چرخشی در جهت جریان را به شکل زیر بیان کرد [۱۱]:

۱- انحراف تنش‌های برشی اصلی به وسیله‌ی یک گرادیان فشار عرضی و یا نیروی جسمی (مانند کانال‌های منحنی شکل)

۲- ناهمسانی و نوسانات آشفتگی در صفحه‌ی عمود بر محور چرخش.

مکانیسم تولید جریان‌های ثانویه‌ی القا شده توسط آشفتگی در جریان کانال مستقیم، به کمک معادله‌ی



شکل ۱- خطوط بی بعد $(\overline{W^2} - \overline{V^2})/U_{max}^2$ و $(\overline{W^2} - \overline{V^2})/U_{max}^2$ از راست (۱) کانال بسته (۲) کانال دوزنقه‌ای (۳) کانال روباز (۵)

پدیده‌های همراه نظیر واکنش‌های شیمیایی، بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری است [۸ و ۱۳]. پیچیدگی معادلات حاکم بر مسأله‌ی تأثیر متقابل فیزیکی مختلف، گذرا بودن اغلب مسائل مهندسی، بالا بودن هزینه‌های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری در بسیاری از کاربردهای عملی، از جمله دلایلی هستند که استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های عددی محدود می‌کند [۸].

در نهایت، یک برنامه‌ی CFD خوب شامل تعادل بین حل دقیق و پایداری جواب می‌باشد. بررسی اعتبار CFD، نیازمند اطلاعات بالا در جزئیات مربوط به شرایط مرزی مسأله و به دست آوردن حجم بالایی از نتایج است. برای بررسی اعتبار از یک راه معنی‌دار، ضروری است که داده‌های تجربی در یک میدان تشابه به دست آیند [۱۳].

مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان ثانویه

اندازه‌گیری مستقیم جریان‌های ثانویه در کانال‌های روباز، با توجه به این نکته که سرعت جریان‌های ثانویه درصد کمی از سرعت طولی جریان است، کار دشواری است [۴] و نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی دقیق و دقت بالای کاربر دارد. اگرچه محققان تلاش‌های بسیاری برای شبیه‌سازی تنش برشی مرزی بدون مراجعه به CFD داشته‌اند، آن‌ها خیلی موفق نبوده‌اند [۱۴]. برای

اثرات سلول‌های جریان ثانویه روی جریان اصلی

سرعت ماکزیمم در هر مقطع قائم، در نزدیکی سطح آب و در فاصله‌ی ۰.۰۵ تا ۰.۲۵ عمق جریان از سطح آزاد اتفاق می‌افتد. علت اصلی این که سرعت ماکزیمم در نزدیکی سطح آزاد پیش می‌آید بیش از آن که تحت تأثیر تنش برشی ناشی از مقاومت هوا باشد، تحت تأثیر جریان‌های ثانویه ضعیف می‌باشد [۹].

جریان‌های عرضی (ثانویه) به صورت قابل توجهی فرآیندهای انتقال اختلاط و گرما و جرم را افزایش می‌دهند، نیروهای هیدرودینامیکی را روی پیرامون مرطوب کانال باز توزیع می‌کنند، نواحی با کسر رسوبات ایجاد می‌کنند و به موجب آن وقوع انبساط محیط با پایداری‌های متفاوت را توسعه می‌دهند [۱۰].

وجود جریان‌های چرخشی در مسیر یک رودخانه موجب ایجاد انواع مختلف رسوب‌گذاری در طول رودخانه می‌شود [۵]. جریان‌های ثانویه، ساختارهای سه‌بعدی ایجاد جریان میانگین اصلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴]. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که سلول‌های جریان ثانویه روی توزیع تنش برشی مرزی تأثیر می‌گذارند [۱۲].

دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی عبارت از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و

چندفازی، مسائل احتراق و ... را دارا می‌باشد [12]. در نرم‌افزار ANSYS CFX، چهار سطح همگرایی مقادیر بزرگ‌تر از 10^{-4} (نظیر 10^{-3})، 10^{-4} ، 10^{-5} و مقادیر کم‌تر از 10^{-6} تعریف شده است.

در این نرم‌افزار چهارده مدل برای مدل‌سازی آشفتگی وجود دارد شامل مدل $k-\epsilon$ ، مدل انتقال تنش برشی (Shear Stress Transport) یا SST، مدل تنش رینولدز SSG (SSG Reynolds Stress)، مدل $k-\omega$ و ... می‌باشد. نرم‌افزار ANSYS CFX روش عددی حجم محدود را مورد استفاده قرار داده و از الگوریتم Coupled برای گسسته‌سازی معادلات بهره می‌گیرد.

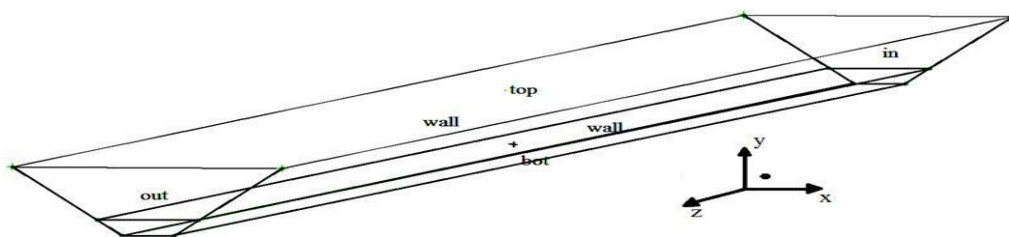
مدل‌سازی هندسی کانال. برای مدل‌سازی هندسه‌ی کانال موردنظر، دو نرم‌افزار Auto Cad و ICEM CFD مورد ارزیابی قرار گرفته و از بین این دو نرم‌افزار گزینه‌ی برتر نرم‌افزار ICEM CFD، به دلیل توانایی آن هم در رسم هندسه و هم در شبکه‌بندی، تشخیص داده شد. رسم هندسه‌ی کانال در این نرم‌افزار در چهار مرحله (مختصات‌دهی نقاط، رسم خطوط، تخصیص سطوح و ایجاد حجم) صورت گرفت. مشخصات کانال مربوط به آزمایش T03 (تومیناگا و همکاران) در جدول (۱) ارائه شده [4] و در شکل (۲) هندسه‌ی کانال ساخته شده در محیط نرم‌افزار ICEM CFD نشان داده شده است. پس از این مرحله حجم ساخته شده به کمک همین نرم‌افزار شبکه‌بندی گردید.

محاسبه‌ی اثر جریان‌های عرضی روی فرآیندهای مختلف، نخست نیاز است که یک مدل ریاضی از میدان سرعت میانگین سه‌بعدی در شکل‌های مختلف مقطع عبوری جریان شامل مرزهای ناهمگن با توانایی مدل‌سازی فرآیندهای جریان در بازه‌ی گسترده‌ای از ناحیه‌ی تغییر محیط‌های کانال ایجاد کنیم. در مرحله‌ی دوم بررسی‌های آزمایشگاهی و تجربی در محل انجام شود مشخصه‌های اصلی توزیع خصوصیات آشفتگی سه‌بعدی معلوم شود و داده‌های تجربی برای مستند ساختن مدل‌های ریاضی ایجاد شده، به دست آید [10]. برای بهره‌گیری از CFD و مدل‌سازی عددی، نیاز به استفاده از نرم‌افزارهایی برای رسم هندسه، شبکه‌بندی، معرفی شرایط جریان، تحلیل جریان و مشاهده‌ی نتایج وجود دارد. برای رسیدن به این اهداف دو نرم‌افزار ICEM CFD و ANSYS CFX انتخاب شده‌اند. در ادامه روند مدل‌سازی به ترتیب ارائه می‌شود.

آشنایی کلی با 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 است و توانایی مدل کردن مواردی از قبیل جریان‌های دائمی و غیردائمی، جریان‌های آرام و آشفتگی، جریان‌های مادون صوت و در حد صوت و مافوق صوت، نیروی شناوری، جریان‌های غیرنیوتنی، انتقال مؤلفه‌های اسکالر فاقد عکس‌العمل، جریان‌های

جدول ۱ مشخصات هندسه‌ی کانال موردنظر

طول کانال (m)	عرض کف کانال (m)	ارتفاع کانال (m)	زاویه‌ی دیواره جانبی ($^{\circ}$)	ارتفاع آب (m)	سرعت جریان ورودی (m/s)
۱۲/۵	۰/۲	۰/۴	۴۴	۰/۰۹۰۵	۰/۳۷۳۳



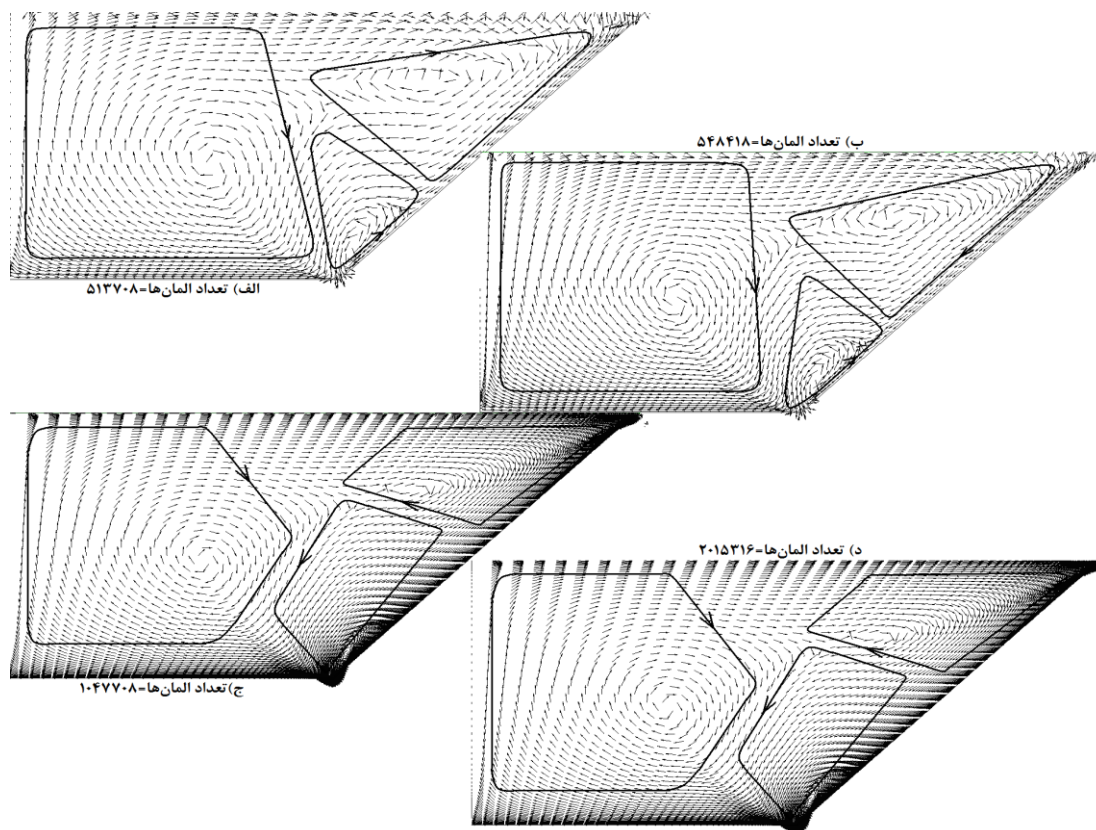
شکل ۲ هندسه‌ی کانال در محیط نرم افزار ICEM CFD

موردنظر به شدت نسبت به شبکه بندی محدوده‌ی جریان، به ویژه قسمت سطح آب و دیواره های کانال حساس است و شبکه بندی نزدیک سطح آب در نتایج حاصل از تحلیل کاملاً مؤثر می باشد، به کمک قابلیت این نرم افزار در ایجاد این نوع شبکه، هندسه‌ی کانال شبکه بندی گردیده است.

در این راستا تعداد گره های موجود در جهات و قسمت های مختلف کانال متفاوت است و بعد از چندین مرحله حساسیت سنجی نتایج نسبت به شبکه بندی، شبکه‌ی مناسب انتخاب می گردد. این شبکه از نوع شش وجهی و در قسمت دیواره ها و به خصوص سطح آزاد متراکم تر است که این مسئله از زیاد بودن تعداد گره ها در این نواحی نشأت می گیرد. تعداد گره ها و المان های موجود در کل حجم به ترتیب ۱۰۷۹۱۰۰ و ۱۰۴۷۷۰۸ می باشد. برخلاف محدوده‌ی عبور جریان آب، شبکه بندی در قسمت بالای سطح آب که شامل هوا است درشت تر می باشد و این مسئله به عدم دخالت آن در نتایج بازمی گردد. این عمل از یک طرف می تواند موجب پایین آمدن سرعت همگرایی و از طرف دیگر به دلیل کاهش تعداد المان ها موجب افزایش سرعت حل شود. در شکل (۳) نتایج مربوط به حساسیت سنجی مش در شکل گیری سلول های جریان ثانویه ارائه شده است.

مش بندی محدوده‌ی جریان. دقت حل مسئله به تعداد سلول های موجود در شبکه بستگی دارد و اصولاً شبکه های غیریکنواخت، با تعداد سلول های مختلف در قسمت های مختلف بدنه بسته به موقعیت آن، در حل یک مسئله قابلیت بیش تری دارند. البته باید در نظر داشت که ایجاد چنین شبکه ای بستگی به عوامل مختلفی از جمله نوع مدل اغتشاشی، شکل ظاهری مدل مانند مقطع عرضی، نوع مسئله‌ی مورد بررسی و مواردی از این قبیل دارد. رفع خطاهای موجود در حل مسئله از طریق تغییر در شبکه و بهینه نمودن آن صورت می پذیرد و در اکثر موارد تغییر شبکه شامل ریزتر نمودن آن در قسمت های مورد نیاز است تا جایی که نتایج حاصل مستقل از ابعاد سلول های موجود در شبکه شوند و نتایج کلیدی تغییر نکنند. این امر به کمک سعی و خطا و تکرار حل در دفعات مکرر با شبکه بندی های متفاوت حاصل می شود.

در این مطالعه برای شبکه بندی محدوده‌ی جریان نیز از نرم افزار ICEM CFD بهره گرفته شده است. این نرم افزار قابلیت ایجاد دو نوع شبکه‌ی چهاروجهی (Tetrahedral) و شش وجهی (Hexahedral) را دارا است و این امکان را در اختیار کاربر قرار می دهد که در قسمت های مختلف تعداد گره ها و المان ها را متناسب با هندسه تنظیم نماید. از آن جایی که مسئله‌ی



شکل ۳ حسایت‌سنجی مش در شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه و انتخاب شبکه‌بندی با تعداد ۱۰۴۷۷۰۸ المان

شرایط اعمالی به جداره‌ها نیز جزو شرایط مرزی محسوب می‌شوند و لازمه‌ی حل معادلات می‌باشند. در زیر به شرایط مرزی اعمال شده برای مدل‌سازی عددی موضوع مورد نظر در نرم‌افزار ANSYS CFX پرداخته خواهد شد.

شرایط مرزی در ورودی کانال (Inlet). با توجه به این‌که جریان در مدل مورد نظر زیربحرانی ($Fr=0.46 < 1$) است، لذا توجه به نکات یاد شده در بالا، محاسبه‌ی عمق جریان در ورودی به نرم‌افزار واگذار شده و از شرط مرزی مقدار مشخص برای سرعت (مؤلفه‌ی کارتیزین سرعت $U=0, V=0$ و $W=0.3733\text{m/s}$) در این مقطع استفاده شده است. مقدار سرعت در این مقطع بر اساس محاسبات تجربی انجام شده توسط تومیناگا و همکاران [4]، $W=0.3733\text{ m/sec}$ (سرعت در طول کانال)، در نظر گرفته شده است. این شرط مرزی در جریان‌های

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 [۱۵]. اکثر شرایط مرزی در کانال‌های روباز شبیه به شرایط مربوط در مجراهای بسته هستند. تنها شرط مرزی در سطح آزاد بین این دو دسته از جریان‌ها متفاوت است [۱۵].

از دیگر شرایط مرزی، شرایط مرزی مربوط به ورودی و خروجی است. در صورتی‌که جریان فوق بحرانی باشد، به هنگام اعمال شرایط مرزی باید عمق جریان در ورودی و خروجی مشخص باشد. اما اگر جریان زیر بحرانی باشد، باید عمق جریان در خروجی معین و از حل عددی عمق جریان در ورودی محاسبه شود و یا این‌که عمق جریان در ورودی معین و از حل عددی عمق جریان در خروجی محاسبه شود [۱۵].

فازها به کمک یک سطح مشترک مشخص از هم جدا می شوند. مثال هایی از جریان های با سطح آزاد شامل جریان کانال های روباز، جریان حول ship hulls، مسائل خاکریزی مخازن و بسیاری از موارد دیگر است. جریان های با سطح آزاد با مدل های همگن باید در مواردی که امکان پذیر است استفاده شوند. جریان های با سطح آزاد با مدل غیرهمگن می توانند برای پذیرفتن جدایش دو فاز جریان استفاده شوند [16].

کاربرد جریان با سطح آزاد در CFX به طور اساسی مشابه حالت چندفازی (همگن یا غیرهمگن) با برخی گزینه های گسسته سازی ویژه برای حفظ تیزی سطح مشترک است. اینها شامل موارد زیر می باشند [16]:

۱- یک طرح متفاوت فشرده برای جابه جایی افقی کسرهای حجمی در معادلات کسر حجمی.
 ۲- یک طرح انتقال فشرده برای معادلات کسر حجمی (اگر مسأله شامل انتقال است).

۳- رفتار ویژه ی ترم های گرادیان فشار و جاذبه برای اطمینان از این که جریان در سطح مشرک در رفتار خوبی باقی می ماند.

در این نرم افزار برای سطح آزاد جریان از شرط مرزی Opening استفاده می شود. نرم افزار ANSYS CFX شرط Opening را به دلیل وجود دو فاز آب و هوا و در سطح مشترک این دو نوع سیال در نظر می گیرد.

انتخاب مدل آشفتگی

یک مدل آشفتگی عبارتست از یک رویه ی محاسباتی برای بستن سیستم معادلات جریان متوسط، به گونه ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان حل کرد. برای یک مدل آشفتگی در موارد کلی، برنامه ی CFD باید دارای کاربرد وسیع، دقیق، ساده و از نظر اقتصادی قابل اجرا باشد [12]. همان طور که اشاره شد، جریان های ثانویه به دلیل ناهمگنی آشفتگی ایجاد شده و در نهایت القا شده توسط آشفتگی هستند،

تراکم ناپذیر مورد استفاده قرار می گیرد. در جریان های تراکم پذیر استفاده از این شرط مرزی به نتیجه های غیرفیزیکی منتهی خواهد شد، زیرا این شرط ورودی اجازه می دهد که شرایط سکون به هر اندازه ای افزایش یابد [۸].

شرایط مرزی در خروجی کانال (Outlet).

خروجی میدان جریان فرض می شود که تغییر کمیت ها (از جمله ارتفاع آب) در راستای جریان قابل اغماض است و خطوط جریان به صورت مستقیم و موازی یکدیگر هستند. بنابراین در این مقطع برای کلیه ی کمیت ها در راستای جریان گرادیان صفر در نظر گرفته می شود. پس از انتخاب شرط مرزی سرعت در ورودی و با توجه به زیرجرانی بودن جریان، شرط مرزی که برای خروجی کانال در نظر گرفته شد، عمق جریان است که در قالب فشار هیدرواستاتیک (Static Pressure) به این مقطع اعمال گردیده است. همان طور که قبلاً ذکر شد عمق آب در کانال برابر مقدار ثابت $y = 0.0905 \text{ m}$ می باشد.

شرط مرزی خروجی فشار احتیاج به بیان فشار (نسبی) استاتیک در مرز خروجی دارد. مقادیر فشار استاتیک معلوم، فقط وقتی به کار می رود که جریان زیرصوت باشد. [۸].

شرایط مرزی جداره های کانال (Wall).

دیوار برای محدود کردن نواحی سیال با جامد به کار می رود. در مسأله ی موردنظر، جداره ها شامل کف و دو دیواره ی کانال می باشد. در این جداره ها از اصل پذیرش (No Slip Wall) جدار بهره جسته شده و برای صحت سنجی براساس مدل آزمایشگاهی موجود، سطح (Smooth Wall) در نظر گرفته می شوند.

شرایط مرزی سطح آزاد (Opening). جریان با سطح آزاد به یک حالت جریان چندفازی اطلاق می شود که

ω استفاده می‌شود. این مدل، همانند دو مدل دیگر RSM، برپایه‌ی معادلات انتقال برای همه‌ی مؤلفه‌های تانسور تنش رینولدز و نرخ استهلاك قرار دارد. این مدل فرضیه‌ی ویسکوزیته‌ی ادی را استفاده نمی‌کند اما یک معادله برای تنش‌های رینولدز در سیال به‌کار می‌گیرد [16]. مدل SSG به‌شدت نسبت به شرایط شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره حساس می‌باشد و برای شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه مدل مناسبی است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار ارائه گردیده است و همان‌طور که در ابتدا اشاره شد برای ارزیابی مدل ساخته شده از نتایج مدل آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران [4] بهره گرفته شده است.

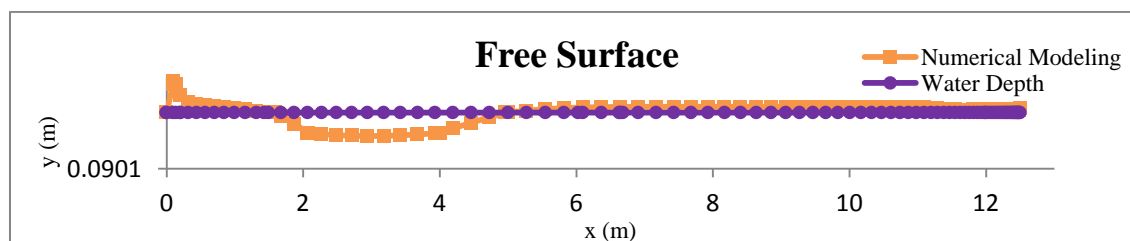
سطح آزاد. شکل (۴) وضعیت سطح آزاد را در قالب نمودار نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در ابتدای کانال و نزدیک ورودی، سطح آب نسبت به مقدار واقعی آن نوسان دارد و با حرکت در طول کانال و رسیدن به طول توسعه‌یافتگی (تقریباً از فاصله‌ی ۶/۵ متری از ورودی)، سطح آب به مقدار ثابت و صحیح آن نزدیک می‌شود و خطای محاسباتی که در ابتدای کانال وجود داشت، از بین می‌رود. لذا می‌توان الگوریتم به‌کار رفته در نرم‌افزار را برای محاسبه‌ی سطح آب مناسب دانست و به آن استناد نمود.

بنابراین انتخاب نوع مدل آشفتگی به‌طوری که بتواند در نمایش سلول‌های این جریان‌ها مؤثر باشد از مهم‌ترین مراحل مدل‌سازی عددی جریان‌های ثانویه در کانال‌ها است.

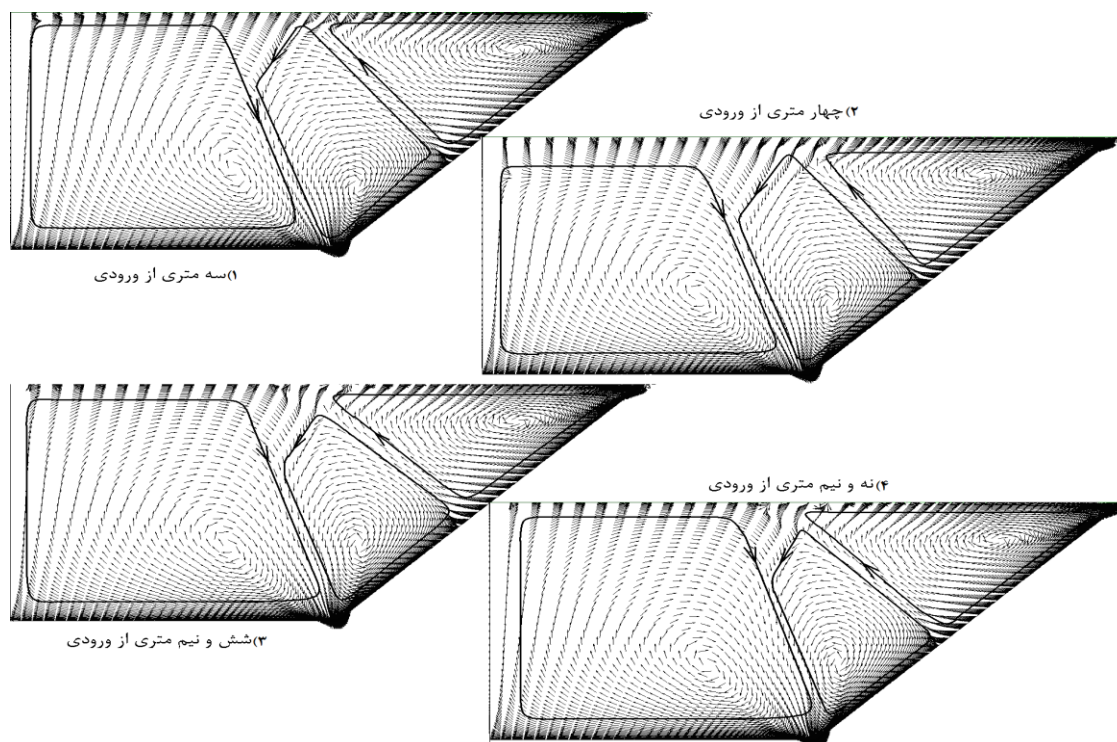
بنابراین پس از بررسی و ارزیابی چندین مدل آشفتگی شامل مدل‌های $k-\varepsilon$ ، SST، SSG و LRR، مدل SSG برای مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه به‌تر از سایر مدل‌ها عمل کرد و نتایج آن در صحت‌سنجی (Verify) مدل قابل قبول‌تر از سایر مدل‌ها تشخیص داده شد [۱]. از این‌رو در مدل‌سازی سلول‌های جریان در کانال مورد نظر از این مدل استفاده شده است. در ادامه به بررسی اجمالی این مدل آشفتگی خواهیم پرداخت.

مدل SSG (SSG Reynolds Stress Model)، یکی از زیرمجموعه مدل‌های آشفتگی معادله‌ی تنش‌های رینولدز (Reynolds Stress Models Equation) محسوب می‌شود. دقت این مدل برای جریان‌های پیچیده بسیار بالا است. همگرایی چرخه‌ی بیرونی در این مدل نسبت به مدل $k-\varepsilon$ کندتر صورت می‌گیرد و علی‌رغم دقت بالای این مدل، همگرایی در آن بسیار آرام صورت می‌پذیرد [16].

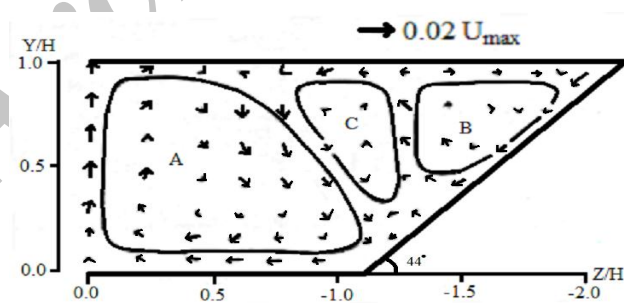
این مدل توسط اسپزیال، سارکار و گاتسکی [17] توسعه یافته است و از یک رابطه‌ی درجه دوم برای همبستگی فشار- کرنش، استفاده می‌کند. برخی از نواقص مدل‌های تنش رینولدز برای شبیه‌سازی لایه‌های مرزی، که از معادله‌ی مربوط به ترم ε نشأت می‌گیرد، سبب توسعه‌ی یک مدل تنش رینولدز شده است که در آن به‌جای معادلات مربوط به ترم ε از ترم



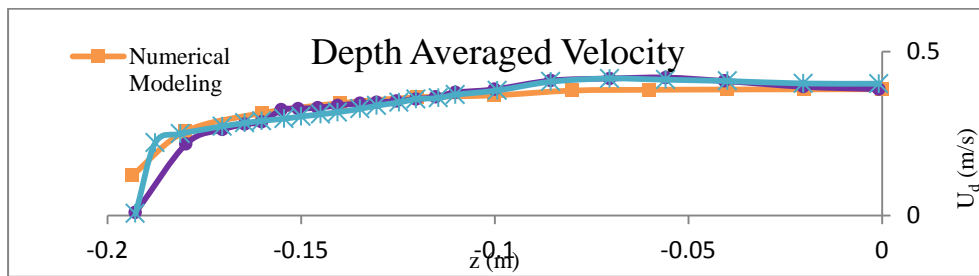
شکل ۴ نمودار سطح آزاد آب در کانال



شکل ۵ روند شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه در مدل عددی به ترتیب در فاصله‌ی (۱) سه، (۲) چهار، (۳) شش و نیم و (۴) نه و نیم متری از ورودی کانال



شکل ۶ سلول‌های جریان ثانویه در آزمایش تومیناگا و همکاران [4]



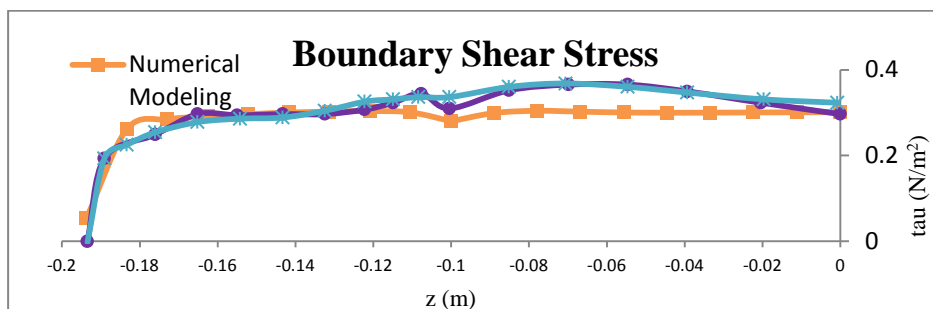
شکل ۷ مقایسه‌ی سرعت عمق میانگین بین نتایج مدل‌سازی عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی

این پدیده کاملاً مشهود است. اما حرکت روبه گوشه‌ی این سلول‌ها در مدل عددی بیش‌تر از مدل آزمایشگاهی 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 طرفی به نقص نرم‌افزار و الگوریتم به‌کار رفته در آن برای محاسبه‌ی سلول‌های جریان، مربوط دانست. اگرچه، بحث درباره‌ی توانایی و عدم توانایی نرم‌افزار نیاز به تسلط کامل بر آن دارد، زیرا به‌عنوان مثال مدل اغتشاشی مورد استفاده ضرابی دارد که هر یک از این ضرایب به نوبه‌ی خود تأثیر خود بحث دیگری را می‌طلبد.

سرعت متوسط‌گیری‌شده‌ی عمقی. برای صحت‌سنجی نتایج عددی مربوط به سرعت عمق متوسط از نتایج کار آزمایشگاهی تومیناگا و همکاران و همچنین نتایج کار تحلیلی شینو و نایت (SKM) [6] استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نمودار سرعت عمق میانگین محاسبه شده براساس سرعت‌های عمقی به‌دست آمده به‌کمک نرم‌افزار تطابق بسیار خوبی با نتایج کار آن‌ها داشته و فقط در نزدیکی گوشه‌ی کانال ($-0.1 < z < -0.05$) مقداری خطا در حدود ۵٪ وارد محاسبات شده است. به‌نظر می‌رسد این مقدار خطا مربوط به حرکت سلول‌های جریان ثانویه به سمت گوشه‌ها می‌باشد که در مدل‌سازی عددی حرکت سلول‌ها به سمت گوشه بیش‌تر از مدل تجربی آن است.

سلول‌های جریان ثانویه. شکل‌گیری سلول‌های جریان ثانویه تقریباً از فاصله‌ی ۳ متری از ورودی کانال روبه تکامل می‌نهند و در فاصله‌ی ۴ متری از ورودی کانال شکل واضحی از این سلول‌ها مشاهده می‌شود (شکل (۵)). تا فاصله‌ی حدود ۶/۵ متری از ورودی شکل این سلول‌ها متغیر است و ابعاد آن‌ها تغییر می‌کند و تقریباً از این فاصله به بعد شکل سلول‌ها ثابت می‌شود و مانند آنچه که در شکل (۵) نشان داده شده است، دیده می‌شوند. این مسأله را نیز می‌توان به توسعه‌یافتگی جریان پس از طی فاصله‌ی ۶/۵ متر از ورودی مربوط دانست که مطابق با نتایج آزمایش‌های تومیناگا و همکاران است (آن‌ها طول لازم برای توسعه‌یافتگی جریان را ۶/۵ متر دانستند). شکل (۶) نتایج کار آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این دو شکل دیده می‌شود، نحوه‌ی شکل‌گیری، جهت چرخش، اندازه و ابعاد، محل قرارگیری سلول‌ها و در نهایت حرکت به سمت گوشه‌ی آن‌ها مشابه یکدیگر است و مؤید صحیح بودن نتایج حاصل از این بررسی عددی است. ابعاد مربوط به دو سلول نزدیک دیواره‌ی مایل و محل قرارگیری آن‌ها در فاصله‌ی ۶/۵ متری از ورودی کانال کاملاً بر نتایج آزمایشگاهی منطبق می‌شود و این مسأله را نیز می‌توان دلیلی بر صحت عملکرد الگوریتم به‌کار رفته در مدل‌سازی سلول‌ها دانست.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، حرکت سلول‌های جریان‌های ثانویه در کانال‌های دوزنقه‌ای به‌سمت گوشه‌ها قابل توجه است و در نتایج مدل‌سازی عددی نیز، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است،



شکل ۸. مقایسه‌ی تنش برشی کف کانال بین نتایج مدل‌سازی عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی

نتیجه‌گیری

در حالت کلی نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان در کانال را به‌صورت زیر می‌توان ارائه نمود:

روش عددی و الگوریتم مورد استفاده برای مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه در این نرم‌افزار مناسب بوده‌است و تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در نمایش سلول‌های جریان وجود دارد. لذا درکل می‌توان دینامیک سیالات محاسباتی را توانمند در مدل‌سازی این سلول‌ها دانست.

۱- مواردی از قبیل تعداد المان‌ها، نوع مدل اغتشاشی، شرایط مرزی و ... در مدل‌سازی سلول‌های جریان بسیار مؤثر است.

۲- مدل اغتشاشی به‌کار گرفته شده (تنش رینولدز SSG) برای این مدل‌سازی مناسب می‌باشد.

۳- نمودار سرعت عمق متوسط تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی دارد.

۴- مقایسه‌ی نتایج حاصل از محاسبه‌ی عددی تنش برشی مرزی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی حاکی از انطباق خوب نتایج به‌ویژه در ناحیه‌ی دیواره‌ی جانبی است.

تنش برشی مرزی. تنش برشی یکی از مسائل اساسی در بررسی اثرات جریان روی جداره‌های کانال است و به دلیل مشکلاتی که در پی دارد، از جمله مسائلی است که بسیار مورد توجه قرار دارد. از این‌رو، در این مقاله یکی دیگر از مواردی که کارایی دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی عددی به‌کمک آن مورد ارزیابی واقع شده است، تنش برشی است.

برای ارزیابی در این زمینه نیز از همان دو مدل آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده شده است. در ادامه مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی شینو و نایت [6] صورت گرفته و نتایج حاصل از مقایسه در شکل (۸) نشان داده شده است. مقایسه‌ی صورت گرفته در این شکل، حاکی از انطباق نسبتاً خوب نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی و تحلیلی در ناحیه‌ی کف و انطباق بسیار خوب این نتایج در ناحیه‌ی دیواره‌ی کانال می‌باشد. البته بیش‌ترین اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مربوط به نواحی نزدیک گوشه‌ی کانال با حداکثر خطایی در حدود ۱۱٪ بوده‌است و این اختلاف نیز به همان عوامل توضیح داده شده در بخش قبل مربوط می‌گردد.

مراجع

۱. تاج‌نسایی، مهنا، «بررسی عددی سلول‌های جریان ثانویه، توزیع سرعت و تنش برشی در جریان کانال‌های دوزنقه‌ای»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران-سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، (۱۳۸۹).
2. Knight. D. W., Yuen. K. W. H., Al-Hamid. A. A. I., Boundary shear stress distributions in open channel flow, In: K.Beven, P.Chatwin, j.Maillbank (eds), Physical Mechanisms of Mixing and Transport in the Environment, Wiley, New York, pp. 51-87, (1994).
3. Yang, S. Q., Lim. S. Y., Boundary Shear Stress Distribution in Trapezoidal Channels, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 43, NO1, pp 98-102, (2005).
4. Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagava, H., "Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, Issue 1, pp. 149-173, (1989).
۵. جابرزاده، مجید، عطاری، جلال، مجدزاده، محمدرضا، ابوالقاسمی، منصور، «مطالعه‌ی آزمایشگاهی جریان‌ات پرخرشی افقی و نقش آن در محل تشکیل نهشته‌ی رسوبی در قوس»، چهارمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، (اردیبهشت ۱۳۸۷).
6. Knight, D. W., Omran, M. and Tang, X., Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 1, ©ASCE, (2007).
7. Khodashenas, S.R., Abderrezak. K.E., Paquier, K., A Boundary shear stress in open channel flow: A comparison among six methods, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, Issue 5, pp. 598-609, (2008).
۸. سلطانی، مجید، رحیمی اصل، روح ا... دینامیک سیالات محاسباتی به کمک نرم‌افزار FLUENT، نشر طراح، چاپ چهارم، تهران، (۱۳۸۶).
۹. حسینی، محمود، ابریشمی، جلیل، هیدرولیک کانال‌های باز، دانشگاه امام رضا(ع)، مشهد، چاپ نهم، تهران، ایران، ص ۳۶، (۱۳۸۱).
10. Shnipov, F. D., Three-dimensional kinematic structure of a flow in trapezoidal channels, Translated from *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stov*, No.9, pp. 48-52, September, (1989).
۱۱. یعقوبی، مهدی، فغفور مغربی، محمود، گیوه‌چی، محمد. اثر جریان‌های ثانویه در تخمین سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مستطیلی با زبری نواری، کنفرانس مدیریت منابع آب دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران، (۱۳۸۶).
12. Imamoto, H., And Ishigaki, T., Experimental Study on Turbulence Structure in Trapezoidal channel, PP 517-522, (1989).
۱۳. ورستیگ، هنگ کارل، مالاسکرا، ویراتونگ، «مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی»، ترجمه‌ی شجاعی فرد، محمدحسن، نورپور هشترودی، علیرضا، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، چاپ دوم، تهران، (۱۳۸۶).

14. Knight, D. W., Omran, M. and Tang, X., Modeling Depth-Averaged Velocity and Boundary shear in Trapezoidal Channels with Secondary Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 1, ©ASCE, (2007).
۱۵. گودرزی، محسن و عظیمیان، احمدرضا، «مدل‌سازی عددی جریان در کانال روباز به‌روش ردیابی سطح آزاد»، مجله‌ی دانشکده فنی دانشگاه تبریز، ص ۴۵-۵۷، (۱۳۹۱).
16. ANSYS CFX user manual. v12.0, ANSYS, Inc. ANSYS Europe. Ltd, (2009).
17. Speziale, C.G., Sarkar, S. and Gatski, T.B., Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 277, pp. 245-272, (1991).

Archive of SID