



Hydrodynamic Study of Turbulent Flow Pattern in River Bend Using 3D Numerical Model

A. Safarzadeh¹ and S. A. A. Salehi Neyshabouri²

Abstract

In this research, using complete form of Navier-Stokes equations, the 3-D turbulent flow pattern in a 180-degree river bend is simulated. The k- ϵ and k- ω turbulence models are used to close the system of equations and modeling Reynolds stresses. Equations are solved numerically using FVM method as implemented in the commercial code FLUENT. Experimental results in a 180-degree bend in Tarbiat Modarres Hydraulic lab (MHL) are used to verify the numerical results. Simulation showed that both of turbulence models accurately predicted the flow pattern in this bend. The prediction accuracy of the k- ω model, especially in the outlet region of the bend, is however higher than the k- ϵ model. The results of first model showed that as the experimental model, there are two secondary flow cells in the $\theta=180^\circ$ cross section but the k- ϵ model predicted only one cell. Distribution of bed and side wall shear stresses showed that there are two probable scouring regions in two halves of the bend. Previous experimental investigations with mobile bed models confirm these results.

Keywords: River Bend, Secondary Flow, Momentum Lateral Transfer, Shear Stress, Numerical Model

مطالعه هیدرودینامیکی الگوی جریان آشفتنه در قوس رودخانه با استفاده از مدل عددی سه بعدی

اکبر صفرزاده^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲

چکیده

در این تحقیق، الگوی جریان آشفتنه در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه به صورت سه بعدی با بکار بردن معادلات کامل ناویر استوکس و استفاده از دو مدل آشفتگی k- ϵ استاندارد و مدل k- ω جهت مدل سازی تنش های رینولدز و بستن سیستم معادلات حاکم (معادلات رینولدز) با روش عددی استفاده شده است. حل معادلات به روش حجم محدود صورت گرفته است. برای صحت سنجی نتایج حاصله، از نتایج مدل آزمایشگاهی دانشگاه تربیت مدرس (MHL) استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصله نشان می دهد که هر دو مدل مزبور، الگوی کلی میدان جریان در قوس رودخانه را بخوبی مدل نموده و نتایج انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. دقت مدل k- ω در پیش بینی میدان جریان نسبت به مدل قبلی بالاتر بوده و این مدل بخوبی الگوی جریان ثانویه را در کل طول میدان پیش بینی می کند، در حالیکه مدل اول در پیش بینی جریان ثانویه دوم در خروجی قوس ناتوان است. بررسی توزیع تنش برشی در مرزهای صلب فلوم مورد مطالعه نشان می دهد که بخاطر تاثیرات ناشی از جریان ثانویه، مدل k- ω بازه های محتمل وقوع آبستنگی و رسوبگذاری را بهتر از مدل قبلی پیش بینی کرده و احتمال وقوع دو چاله فرسایشی در هر دو نیمه کانال در حالت بستر متحرک وجود دارد.

کلمات کلیدی: قوس رودخانه، جریان ثانویه، انتقال جانبی مومنتم، تنش برشی، مدل عددی

1 - M.Sc Student of Water Engineering- Tarbiat Modarres University
E-mail: Safarzad@modares.ac.ir
2 - Associate Professor of Hydraulic Structures- Tarbiat Modarres University
E-mail: Salehi@modares.ac.ir

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب - دانشگاه تربیت مدرس
E-mail: Safarzad@modares.ac.ir
۲ - دانشیار سازه های هیدرولیکی - دانشگاه تربیت مدرس
E-mail: Salehi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

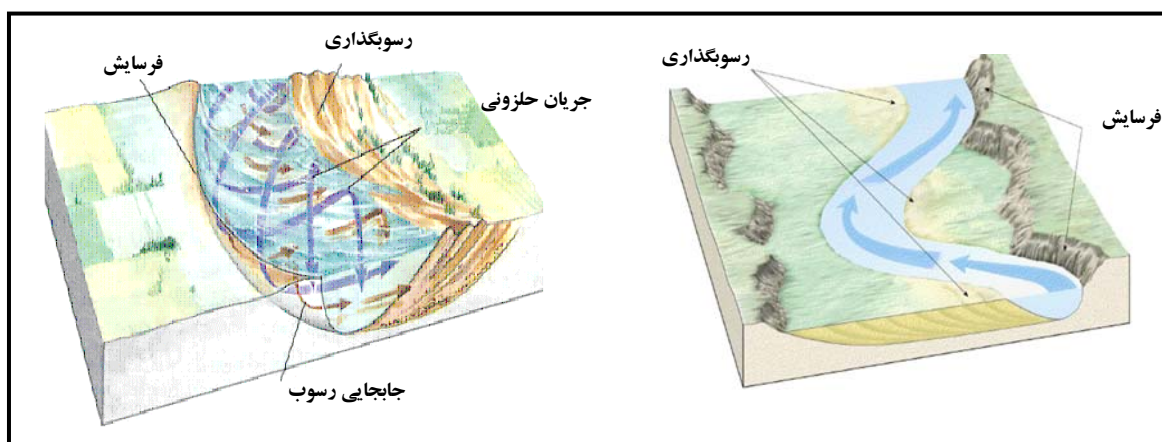
جانبی (کنترل رسوب با استفاده از مفهوم جریان ثانویه) و نیز شناخت ساختار پخش آلودگی در رودخانه‌ها اشاره کرد.

شناخت و مطالعه بر روی چنین پدیده‌ای نیازمند یک ابزار قوی می‌باشد. مدل‌های فیزیکی بخاطر هزینه‌بر بودن، محدودیت اندازه‌گیری پارامترهای جریان و نیز خطای ایجاد شده در آنها به خاطر اختلاف مقیاس با مدل اصلی، به تنهایی قادر به ارائه درک روشنی از پدیده‌های حاکم بر مسائل پیچیده هیدرودینامیکی نمی‌باشند. در مقابل، روش‌های عددی به عنوان یک ابزار بسیار قدرتمند به موازات پیشرفت روزافزون کامپیوتر، در کنار مطالعات فیزیکی می‌توانند درک مطلوبی را از فیزیک حاکم بر این پدیده‌ها ارائه کنند. وقتی می‌توان به صحت مدل‌سازی عددی اطمینان حاصل کرد که به صورت کمی، پارامترهای پیش بینی شده توسط این روش با نتایج موجود در طبیعت و یا یک مدل آزمایشگاهی مقایسه شود. بدین منظور، در این تحقیق الگوی جریان آشفته به صورت سه بعدی، در یک قوس ۱۸۰ درجه با مقطع مربع مدل‌سازی عددی شده، پروفیل‌های سرعت پیش‌بینی شده، با نتایج آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس مقایسه شده و به بحث و بررسی دقیق پدیده‌های حاکم بر این میدان پرداخته شده است.

۲- مروری بر سوابق تحقیقات

نگاهی به مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که محققین اولیه از فرض برقراری جریان پتانسیل در قوس استفاده کرده و از روابط گردابه آزاد مبنی بر ثابت بودن مولفه طولی جریان بر روی یک مسیر شعاعی ثابت ($V_{\theta} \times r = Cte.$) جهت بیان میدان جریان استفاده کرده‌اند. با توجه به عدم اعمال تاثیر اصطکاک در روابط گردابه آزاد و نیز عدم توجه پدیده انتقال جانبی مومنت طولی بخاطر حذف جریان ثانویه، تئوری مزبور از اعتبار کافی برخوردار نیست (Mockmore, 1944)

بازه‌های پیچانوردی و در حالت کلی، قوس رودخانه‌ها یکی از بازه‌های پیچیده جریان آب بوده که این پیچیدگی نه تنها بخاطر آشفتنی جریان و طبیعت سه بعدی آن، بلکه بخاطر توپوگرافی غیرعادی و نیز تغییرات عمق می‌باشد که در اثر پدیده‌های فرسایش، انتقال رسوب و نیز رسوبگذاری حاصل میشوند. با ورود جریان به قوس رودخانه، نیروی گریز از مرکز بر ذرات آب اثر کرده و باعث می‌شود تا سطح آب در کنار جداره بیرونی بالا رفته و در مقابل، کاهش عمق در جداره داخلی اتفاق می‌افتد. در اثر این پدیده اختلاف فشاری بین دو سمت قوس ایجاد می‌شود. بین نیروی گریز از مرکز، اختلاف فشار مزبور و نیز مقاومت برشی بستر اندرکنشی ایجاد شده و در صورتی که اختلاف فشار مزبور به حدی باشد که بتواند بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در درون مقطع ایجاد می‌شود که در نزدیک سطح آب بطرف جداره بیرونی بوده و در نزدیکی بستر باعث انتقال ذرات به سمت جداره داخلی می‌شود. جریان مزبور به جریان ثانویه معروف بوده و اندرکنش آن با مولفه طولی سرعت باعث ایجاد جریان حلزونی می‌شود که تاثیر بسیار مهمی بر مورفولوژی رودخانه و انتقال رسوب دارد. شکل (۱) الگوی جریان حلزونی و مکانیسم انتقال سیال و ذرات بستر و متعاقب آن تغییرات مورفولوژیکی ایجاد شده در مسیر پیچانوردی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های مزبور، جریان حلزونی باعث فرسایش جداره بیرونی و رسوبگذاری در جداره داخلی شده است. داشتن دانش قوی هیدرودینامیکی از الگوی جریان خمیده در چنین مواردی از لحاظ کاربردی بسیار حائز اهمیت می‌باشد که از آن جمله می‌توان به پدیده‌های جلوگیری از رسوبگذاری، محافظت جداره‌های رودخانه و جلوگیری از فرسایش خاک حاصلخیز کنار رودخانه، تعیین مسیر مناسب کشتیرانی، تثبیت دینامیکی توپوگرافی رودخانه، انتخاب محل مناسب آبیگری



شکل ۱- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس رودخانه [صفرزاده، (۱۳۸۳)].

Rosovskii (1961) طی سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۱ تحقیقات گسترده‌ای بر روی الگوی جریان در قوس انجام داد. وی با اعمال تاثیر جریان ثانویه بر معادلات دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق، الگوی جریان را در یک قوس ۱۸۰ درجه با نسبت $R_c/B=1$ که R_c شعاع انحناء مرکزی و B عرض کانال بود، شبیه‌سازی کرده و به پدیده انتقال حداکثر سرعت بطرف جداره‌های خارجی و داخلی در طول میدان اشاره کرده است. یکی از اساسی‌ترین کارهای صورت گرفته در این زمینه، مدل‌سازی جریان آشفته در قوس ۱۸۰ درجه توسط (1978) Rodi و Leschziner بوده است. این دو محقق بصورت سه بعدی الگوی جریان را در قوس تند Rozovskii با بکارگیری مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، مدل‌سازی عددی کرده و با اشاره به این نکته که اگر حداکثر برابندی سطح آب از ۱۰ درصد عمق کانال تجاوز نکند، تغییرات سطح آب تاثیر چندانی روی نتایج ندارد، شرط مرزی تقارن را برای سطح آب اعمال کردند.

(1988) Bergs و Odgaard به بررسی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه با بستر متحرک پرداختند. فلوم مورد مطالعه عبارت بوده است از یک قوس ۱۸۰ درجه با مقطع دوزنقه‌ای که بستر آن متحرک بود. نسبت R_c/B آن برابر ۵/۴ بوده و قوس مورد مطالعه، ملایم بوده است. محققین مزبور با اندازه‌گیری تغییرات سرعت و نیز تغییرات تراز بستر، به این نتیجه رسیدند که مهمترین تغییرات بستر، در نیمه اول و قبل از راس قوس رخ داده است. الگوی فرسایش دارای رفتار نوسانی با پریود ۳۰ متر (در طول کانال) می‌باشد، بطوریکه در خروجی قوس نیز در کنار دیواره بیرونی فرسایش رخ داده است. (2001) Graf و Blanckaert طی تحقیقات متعددی که بر روی الگوی جریان در قوس ۱۲۰ درجه انجام دادند، به مطالعه آزمایشگاهی و عددی این پدیده پرداختند. در قسمتی از تحقیقات، محققین مزبور تحقیقات خود را بر روی الگوی جریان در مقطع عرضی ۶۰ درجه متمرکز کرده و به وقوع دو سلول چرخشی در این مقطع اشاره کرده‌اند. وجود یک جریان چرخشی تحت عنوان سلول چرخشی مرکزی و علاوه بر آن یک جریان چرخشی دیگری در خلاف جهت این جریان در نزدیکی قوس بیرونی در کار این دو محقق گزارش شده است. محققین مزبور وجود جریان ثانویه دوم را عاملی برای جلوگیری از فرسایش قوس بیرونی دانسته و دلیل خود را برای این امر، وقوع حداکثر سرعت در مرز بین دو سلول و دور از دیواره بیرونی عنوان کرده‌اند.

(2003) Booij با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ^۲ (LES)، الگوی جریان در یک خم ۱۸۰ درجه بسیار ملایم ($R_c/B > 10$) را مدل‌سازی کرد. برخلاف نظریه بلانکارت در مورد خاصیت حفاظتی از دیواره بیرونی برای جریان ثانویه دوم، بویج معتقد است که جریان

ثانویه مزبور باعث میشود که حداکثر سرعت بیشتر از حالت عادی به بستر نزدیک‌تر شود و همین پدیده باعث آبستتگی و فرسایش موضعی شدید در محل دیواره خارجی بصورت زیرشویی این دیواره شده و باعث تخریب آن می‌شود.

نگاهی به تحقیقات صورت گرفته در داخل کشور نشان می‌دهد که اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه بصورت آزمایشگاهی بوده و شبیه‌سازی عددی کمتر در این تحقیقات به چشم می‌خورد. خانجانی و همکاران در سال ۱۳۷۸ با تهیه یک مدل عددی، معادلات ناویر استوکس را در حالت لایه ای و با اعمال توزیع فشار هیدرواستاتیک در عمق برای قوس ۱۸۰ درجه مدل‌سازی کرده و به تشکیل جریان ثانویه و نقش آن در تغییرات توزیع طولی سرعت اشاره کرده‌اند.

اقبالزاده (۱۳۷۹)، به بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه آزمایشگاه هیدرولیک تربیت مدرس (MHL) پرداخته است. وی پارامترهای مربوطه را طوری تنظیم کرده بود که تغییر عمده‌ای در وضعیت بستر رخ ندهد (رییل تشکیل نگردد). نتایج آزمایش‌های صورت گرفته توسط این محقق نشان می‌دهد که در نیمه اول اتفاق خاصی نیفتاده و در نیمه دوم قوس، دو چاله فرسایشی در مقاطع عرضی ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه تشکیل می‌شود. مقایسه نتایج وی و نتایج گزارش شده توسط اودگارد و سایرین نشان می‌دهد که با وجود گزارش‌های متعدد صورت گرفته مبنی بر تشکیل چاله فرسایشی در نیمه اول، این محقق در کار آزمایشگاهی وقوع چاله مزبور را گزارش نکرده است. پیرستانی در سال ۱۳۸۳ در رساله دکتری خود به بررسی آزمایشگاهی میدان جریان در قوس ۱۸۰ درجه MHL پرداخت. وی با استفاده از یک سرعت سنج دوبعدی، مقادیر سرعت در عمق و عرض کانال مزبور را اندازه‌گیری کرده و الگوی جریان ایجاد شده به ازای مقادیر دبی ورودی مختلف در فلوم مزبور را مورد بررسی قرار داد. پدیده‌های انتقال سرعت حداکثر بطرف جداره‌های داخلی و خارجی و تشکیل جریان ثانویه در قوس توسط این محقق نیز گزارش شده است (پیرستانی، ۱۳۸۳). در مطالعه حاضر برای صحت سنجی نتایج مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی پیرستانی استفاده شده است.

با توجه به کارهای صورت گرفته، اکثر مطالعات بر روی فلوم ۱۸۰ درجه انجام شده است که علت اصلی آن کامل بودن مراحل رشد و استهلاک جریان ثانویه در آن می‌باشد. در یک قوس رودخانه عوامل موثر بر الگوی جریان عبارتند از: زاویه مرکزی قوس (θ)، نسبت شعاع انحناء مرکزی به عرض مقطع جریان (R_c/B)، نسبت عمق جریان به عرض مقطع جریان (B/D) (این پارامتر به Aspect Ratio

معروف می‌باشد)، زبری بستر کانال و دیواره‌های جانبی و شرایط جریان ورودی.

▪ مطالعه دقیق ساختار جریان ثانویه در میدان مزبور و بررسی سازوکار این جریان بر وقوع فرسایش درکف و جداره‌های قوس.

دو عامل اول به عنوان عوامل اصلی شکل‌گیری جریان در قوس رودخانه مطرح بوده، بطوریکه برای نسبت $R_c/B < 3$ ، قوس تند نامگذاری شده و برای مقادیر $R_c/B > 3$ ، قوس مزبور، ملایم نامیده می‌شود (Rodi and Laschziner, 1978).

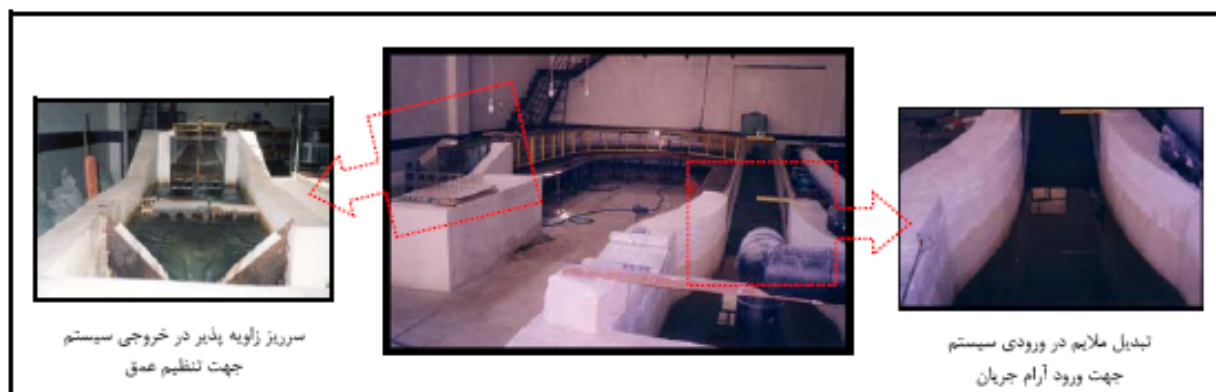
۴- مشخصات هندسی و هیدرولیکی میدان

در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی پیرستانی (۱۳۸۳) برای صحت‌سنجی مدل عددی استفاده شده است. نامبرده داده‌های آزمایشگاهی خود را از یک فلوم خمیده با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه، مقطع مربعی به ابعاد (۶۰×۶۰ cm) و نسبت $R_c/B=4.33$ که جزو قوس‌های ملایم می‌باشد برداشت کرده است. در شکل (۲) فلوم مزبور و شرایط ورودی و خروجی آن نشان داده شده است. ابعاد و مشخصات دقیق‌تر این فلوم در شکل (۳) نشان داده شده است. بستر و دیواره‌های کانال کاملاً صلب بوده و از پلکسی گلاس با ضریب مانینگ $n=0.008$ تشکیل یافته است. ورودی سیستم دارای یک تبدیل ملایم می‌باشد که جهت هدایت جریان با کمترین میزان آشفتگی از مخزن به داخل فلوم تعبیه شده است. در انتهای فلوم، یک سرریز زاویه پذیر جهت تنظیم عمق جریان نصب شده است. دبی جریان ورودی ۳۰ لیتر بر ثانیه بوده و عمق جریان برابر ۱۵ سانتیمتر می‌باشد. جهت اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج دو بعدی (P-ems) استفاده شده است که دقت اندازه‌گیری آن ± 0.1 (m/s) می‌باشد. با مشخصات مزبور، عدد فرود جریان ورودی ۰/۴۱ و عدد رینولدز آن ۴۹۵۰۰ می‌باشد. بنابراین، جریان ورودی زیر بحرانی بوده و حالت آشفته دارد.

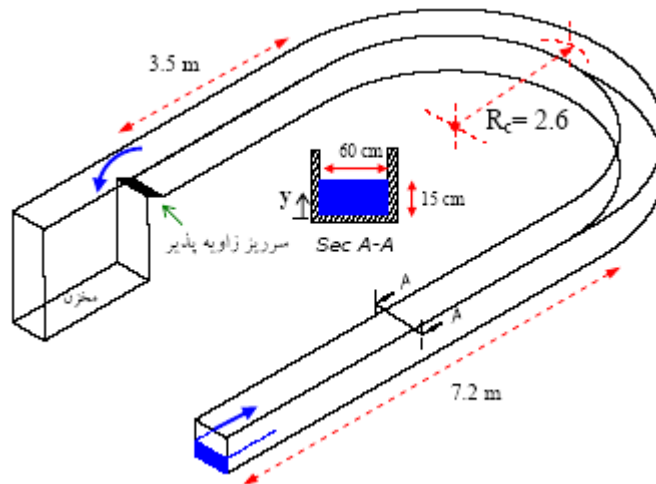
۳- اهداف تحقیق اخیر

نگاهی به مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که در اکثر این تحقیقات، دو نقص اصلی وجود داشته است: ۱- بحث مدل‌سازی جریان ثانویه ۲- استفاده از یک مدل آشفتگی که بتواند الگوی سه بعدی حاکم را با بیان مناسب تنش‌های رینولدز بخوبی پیش‌بینی کند. بجز مدل عددی Booij که از لحاظ محاسباتی مقرون به صرفه نمی‌باشد (زمان محاسبات بالا بوده و روند مدل‌سازی پیچیده می‌باشد)، در هیچکدام از مطالعات صورت گرفته، مدل آشفتگی مناسبی جهت بررسی میدان معرفی نشده و علاوه بر آن ساختار جریان ثانویه و تاثیر آن بر مرزهای اطراف به ویژه دیواره‌های جانبی میدان به خوبی بررسی نشده است. لذا در این تحقیق دو هدف کلی زیر مد نظر بوده است:

▪ بررسی نحوه عملکرد مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای در پیش‌بینی میدان جریان در قوس رودخانه و انتخاب مدل مناسب.



شکل ۲- فلوم آزمایشگاهی خمیده با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه آزمایشگاه هیدرولیک مدرس و شرایط ورودی و خروجی آن [پیرستانی (۱۳۸۳)].



شکل ۳- مشخصات هندسی فلوم ۱۸۰ درجه آزمایشگاه هیدرولیک تربیت مدرس [پیرستانی(۱۳۸۳)].

۴- روابط حاکم بر میدان

معادلات حاکم بر میدان جریان ناشی از حرکت یک سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادلات مومنتم، که برای جریان آشفته تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان میشوند. این معادلات به معادله ناویر استوکس معروف می‌باشند (Celik, 1999):

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

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲)، u_i مولفه سرعت در جهت x_i ، فشار کل، P ، چگالی سیال، ρ ، شتاب ثقل در جهت x_i و τ_{ij} تانسور تنش بوده که در حالت جریان آشفته بصورت معادله (۳) بیان می‌شود:

(۳)

$$\tau_{ij} = \left[\rho(v + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho(k + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right]$$

در رابطه (۳)، ν_t و ν به ترتیب بیانگر ویسکوزیته سینماتیکی سیال و ویسکوزیته آشفتگی می‌باشند. k انرژی جنبشی آشفتگی بوده و δ_{ij} معرف دلتای کرونگر می‌باشد. در این معادله نسبت به معادلات مربوط به جریان لایه ای، ترم زیر اضافه شده است [10]:

$$-\overline{u_i u_j} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (4)$$

ترم فوق به تنش رینولدز معروف بوده که در سیستم معادلات سه بعدی، باعث افزودن ۶ مجهول دیگر به معادلات می‌شود. جهت بستن دستگاه معادلات حاکم و به عبارت بهتر برقراری ارتباط بین تنش‌های رینولدز و مولفه‌های سرعت متوسط جریان، از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد وسیع مدل‌های دو معادله ای، در این مقاله نیز از دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\omega$ استفاده شده است. جهت آشنائی بیشتر با مدل‌های مذکور می‌توان به (Celik (1999) مراجعه نمود.

۵- حل عددی میدان جریان

۵-۱- شرایط مرزی

در ورودی میدان از شرط مرزی سرعت استفاده شده و دبی مزبور بصورت سرعت ثابت در این مرز به میدان اعمال شده است. با توجه به اینکه طول مسیر مستقیم قبل از ورودی قوس به اندازه کافی زیاد می‌باشد، لذا پروفیل سرعت در ورودی قوس حالت توسعه یافته خواهد داشت. با توجه به عدم اندازه‌گیری توزیع آزمایشگاهی پارامترهای آشفتگی، مقادیر این پارامترها، نظیر انرژی جنبشی آشفتگی (k)، استهلاک (ε) و نوسان (ω) از فرمول‌های تجربی موجود که بر مبنای سرعت مینا، شدت آشفتگی (T_i) و طول مشخصه آشفتگی (L) می‌باشند، استفاده شده است (Celik, 1999):

(۵)

$$k = \frac{3}{2} (U_{ref} T_i)^2; \quad \varepsilon = C_\mu \frac{k^{3/2}}{L}; \quad \omega = \frac{\varepsilon}{k}; \quad 1 = 0.07L;$$

در روابط فوق، U_{ref} عبارت است از سرعت مینا که سرعت متوسط ورودی میدان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به استفاده از تبدیل بسیار ملایم در ورودی فلوم آزمایشگاهی مورد نظر، جریان ورودی آشفتگی چندانی نداشته و می‌توان مقدار تقریبی ۱ درصد را برای

شدت آشفتگی اختصاص داد (Celik, 1999). البته لازم به ذکر است که با توجه به اینکه آشفتگی در داخل خود میدان ایجاد می‌شود (نسبت به ورودی)، شبیه سازی‌های صورت گرفته با مقادیر متفاوت شدت آشفتگی نشان داد، تغییر این پارامتر در ورودی میدان، تاثیر چندانی بر نتایج حاصل از مدل عددی نداشت. C_{μ} یک ثابت تجربی بوده و مقدار آن برابر 0.09 می‌باشد. L بیانگر مقیاس طول بوده و L طول مشخصه‌ای از میدان می‌باشد که در کانال‌های غیر دایروی، توسط قطر هیدرولیکی بیان شده و برای میدان مزبور مقدار 0.15 بدان اختصاص داده می‌شود (Celik, 1999).

با توجه به نکات فوق، مقادیر پارامترهای آشفتگی k ، ϵ و ω برای دبی ورودی در این مرز به ترتیب برابر $3.8E-05$ ، $1.2E-05$ و $2.1E-01$ محاسبه شده اند. در خروجی کانال اصلی از شرط مرزی خروجی (گرادیان طولی برابر با صفر) استفاده شده است. با توجه به تغییرات ناچیز سطح آب، شرط مرزی تقارن به سطح آب اعمال شده است (Rodi and Leschziner, 1978 و پیرستانی ۱۳۸۳). شرط مرزی دیواره به مرزهای صلب اعمال شده و از تابع استاندارد دیواره برای برقراری ارتباط بین ناحیه کاملاً آشفته و نواحی متاثر از لزجت مولکولی استفاده شده است.

۵-۲- شبکه بندی، انفصال معادلات و حل میدان جریان

برای تهیه هندسه میدان از نرم افزار Gambit استفاده شده است. در این نرم افزار که به عنوان یک پیش پردازنده^۳ عمل می‌کند، هندسه میدان تشکیل داده شده و پس از شبکه بندی آن، شرایط مرزی مورد نظر به مرزهای میدان اعمال می‌شود. پس از انجام مراحل فوق نیاز به یک حل کننده مناسب^۴ و پس پردازنده^۵ می‌باشد که بدین منظور از نرم افزار حل میدان جریان Fluent استفاده شده است. این نرم افزار برای حل معادلات جریان از روش حجم محدود (FVM) استفاده می‌کند. برای انفصال بخش انتقالی معادلات حاکم از روش آپویند مرتبه دوم (SOU) استفاده شده و جهت کوپل کردن ترم‌های سرعت و فشار، الگوریتم تکراری SIMPLE بکار رفته و حل میدان جریان تا رسیدن باقیمانده‌ها به مقدار 10^{-4} ادامه داده شده است. با توجه به اینکه مدل‌های آشفته مورد استفاده، رویکردهای متفاوتی در رابطه با اعمال شرایط مرزی دیواره بر میدان حل دارند و علاوه بر آن بخاطر لزوم حساسیت سنجی حل نسبت به شبکه بندی میدان، شبکه بندی‌های مختلف با رعایت ضوابط مربوط به هر مدل، بکار رفته و در نهایت شبکه بندی مناسب برای هر حالت تعیین شد.

شبکه بندی مورد استفاده، شبکه منحنی الخط متعام (Orthogonal-Curvilinear) بوده و برای مدل‌های $k-\epsilon$ استاندارد و $k-\omega$ به ترتیب شبکه بندی‌های $(120 \times 25 \times 35)$ و $(120 \times 35 \times 45)$

در جهات طول، عمق و عرض انتخاب شده و ادامه محاسبات با شبکه بندی‌های مزبور صورت گرفت.

۶- ارائه نتایج

۶-۱- انتخاب مدل مناسب

جهت بررسی نحوه عملکرد مدل‌های آشفتگی در پیش بینی میدان مورد نظر، پروفیل‌های سرعت در مقطع عرضی 180° درجه (خروجی قوس) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در شکل (۴) پروفیل‌های مزبور نشان داده شده است.

با توجه به این شکل، پروفیل‌های پیش‌بینی شده با هر دو مدل آشفتگی همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند بطوریکه متوسط خطای پیش بینی مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ به ترتیب برابر $5/83\%$ و $5/5\%$ درصد می‌باشد. ولی با نگاه دقیق می‌توان به عدم همخوانی پروفیل قائم سرعت حاصل از مدل $k-\epsilon$ در کنار دیواره بیرونی پی برد؛ بطوریکه متوسط خطای پیش‌بینی در این ناحیه برای مدل اول $6/8\%$ و برای مدل دوم $4/1\%$ می‌باشد. علت این امر وجود جریان ثانویه دوم در این منطقه می‌باشد که در ادامه بدان پرداخته شده است. مدل آشفتگی $k-\omega$ در این ناحیه عملکرد بهتری از خود نشان داده و پروفیل سرعت پیش بینی شده توسط این مدل، همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. بطوریکه این مدل حالت برگشت پروفیل سرعت در ناحیه نزدیک سطح آب را بهتر از مدل قبلی پیش بینی می‌کند. لازم به ذکر است که علت وجود اختلاف نسبتاً زیاد بین مقادیر آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در نزدیکی بستر، عدم همواری و وجود زائده‌های موضعی در کف کانال و تاثیر آن بر توزیع سرعت در این نواحی می‌باشد که زبری میدان را شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد. (این نتیجه گیری در بررسی صورت گرفته از فلوم مزبور حاصل شد). در امتداد قائم 0.55 که نزدیک دیواره بیرونی کانال می‌باشد، مدل آشفتگی $k-\omega$ ، بخوبی پدیده پائین افتادگی سرعت حداکثر به زیر سطح آب را پیش‌بینی کرده ولی نتایج حاصل از مدل دیگر، بیانگر عدم وجود گرادیان عمقی سرعت در نواحی بالای سطح آب می‌باشد. علت کارایی بهتر مدل $k-\omega$ را نسبت به مدل $k-\epsilon$ می‌توان موارد ذیل ذکر کرد:

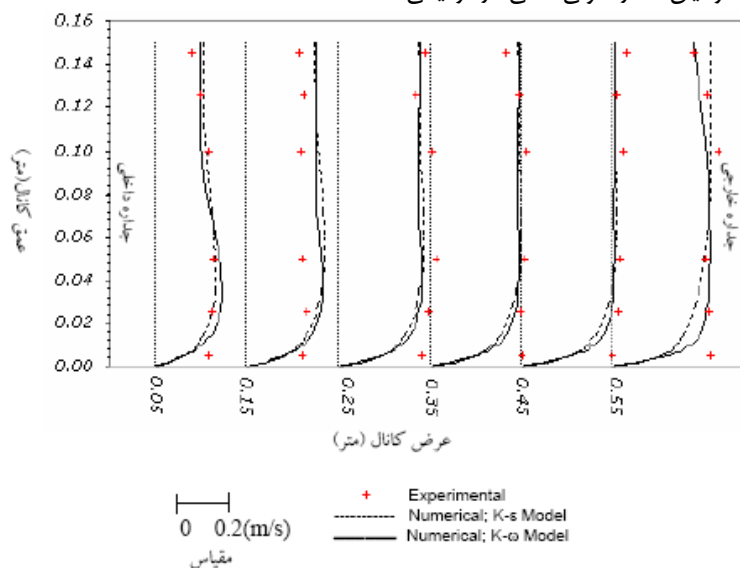
- قابلیت مدل $k-\omega$ در پیش بینی جریان‌های با عدد رینولدز کم بخاطر عدم استفاده از تابع دیواره برای شرایط مرزی دیواره.
- قابلیت مدل $k-\omega$ در پیش بینی نواحی متاثر از گرادیان معکوس فشار (نظیر خروجی قوس که امکان جدائی جریان در این ناحیه وجود دارد).

دیواره داخلی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات آب می‌شود و در مقابل، در نزدیکی قوس بیرونی با گرادیان فشار طولی مثبت همراه بوده و سرعت سیال در این ناحیه کم می‌شود. روند مزبور تا مقطعی بین $\theta = 20^\circ$ و $\theta = 30^\circ$ (نزدیکی مقطع عرضی $\theta = 25^\circ$) ادامه داشته و بعد از این مقطع، حداکثر سرعت به نزدیکی دیواره بیرونی منتقل می‌شود. علت این پدیده، تولید جریان‌های ثانویه در داخل مقطع عرضی می‌باشد بطوریکه این جریان‌ها که در نزدیک سطح آب بطرف دیواره بیرونی و در نزدیکی بستر بطرف دیواره داخلی برقرار هستند، بر گرادیان طولی فشار غالب شده باعث انتقال عرضی مومنت طولی جریان و یا به عبارتی باعث بازتوزیع آن می‌شوند. پدیده انتقال حداکثر سرعت بطرف دیواره بیرونی بتدریج در طول نیمه اول تشدید شده و در مقطع عرضی $\theta = 70^\circ$ تا حد زیادی به دیواره بیرونی نزدیک می‌شود. از مقطع مزبور به بعد، محل وقوع حداکثر سرعت تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. با توجه به پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی واقع در نیمه دوم قوس، جریان در این ناحیه به حالت کاملاً توسعه یافته رسیده و تغییر چندانی در مقادیر سرعت بین دو مقطع عرضی متوالی وجود ندارد. در مقاطع انتهایی قوس سرعت در نزدیکی دیواره بیرونی افزایش یافته و پروفیل سرعت، حالت تیزتری به خود می‌گیرد. علت این پدیده، مشابه ورودی قوس، تاثیر گرادیان طولی فشار می‌باشد که در این قسمت از میدان، در امتداد دیواره بیرونی گرادیان طولی منفی و در امتداد دیواره داخلی گرادیان طولی مثبت حاکم می‌باشد. در نتیجه، دو عامل جریان ثانویه و گرادیان طولی فشار در این حالت به عنوان عوامل همسو عمل کرده و باعث افزایش بیشتر سرعت در ناحیه نزدیک دیواره بیرونی می‌شوند.

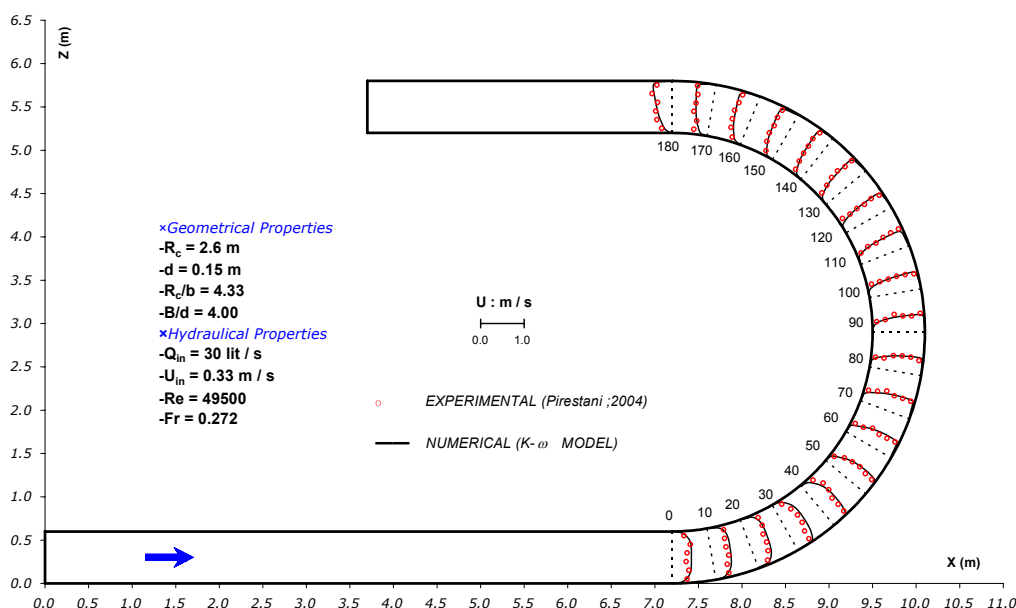
بخاطر فرض هموزن بودن لزجت گردابه‌ای در معادلات مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای، این مدل‌ها از دقت کافی در پیش‌بینی جریان‌های پیچیده‌ای نظیر جریان‌های ثانویه برخوردار نمی‌باشند و علت عدم انطباق کامل نتایج حاصل از مدل $k-\omega$ با نتایج آزمایشگاهی می‌تواند در این مورد باشد. پدیده پائین افتادگی سرعت، ناشی از تاثیر جریان ثانویه و پدیده بازتوزیع سرعت توسط این جریان می‌باشد که در قسمت‌های بعدی تشریح خواهد شد.

۶-۲- بررسی نحوه تغییرات مولفه طولی سرعت

در شکل (۵) پروفیل طولی سرعت پیش‌بینی شده با مدل $k-\omega$ در مقاطع عرضی مختلف صفحه نزدیک سطح آب ($Y=0.145m$) با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، پروفیل سرعت در ورودی قوس ($\theta = 0^\circ$) حالت گسترش یافته دارد. انطباق نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در حالت کلی بسیار خوب بوده و فقط در مقاطع ابتدایی قوس، کمی بین مقادیر سرعت حاصل از مدل عددی و مقادیر متناظر اندازه گیری شده اختلاف وجود دارد ولی روند تغییرات سرعت در عرض کانال برای تمامی مقاطع عرضی همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. کمینه، متوسط و بیشینه خطای مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی به ترتیب برابر $2/2\%$ ، $3/6\%$ و $5/7\%$ می‌باشد که کمینه و بیشینه این مقادیر به ترتیب در مقاطع عرضی $\theta = 140^\circ$ ، $\theta = 10^\circ$ اتفاق می‌افتد. با ورود جریان به داخل قوس و بخاطر گرادیان طولی فشار ناشی از نیروی جانب مرکز (در بازه کوتاهی از ورودی قوس، بخاطر تغییر ناگهانی انحنا، در امتداد جداره داخلی کاهش فشار و در امتداد جداره خارجی افزایش فشار اتفاق می‌افتد)، حداکثر سرعت بطرف دیواره داخلی منتقل می‌شود. در قسمت کوتاهی از اول قوس، گرادیان فشار طولی منفی در نزدیکی



شکل ۴- بررسی عملکرد دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ در پیش‌بینی پروفیل‌های قائم سرعت.



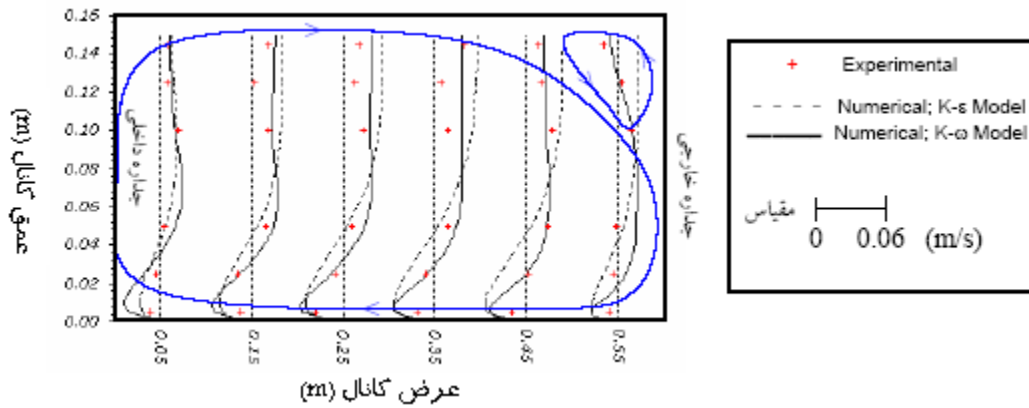
شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت پیش بینی شده در صفحه نزدیک سطح آب ($Y=0.145$) با نتایج آزمایشگاهی برای دبی $Q = 30 \text{ lit/s}$.

۳-۶- بررسی جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی مختلف

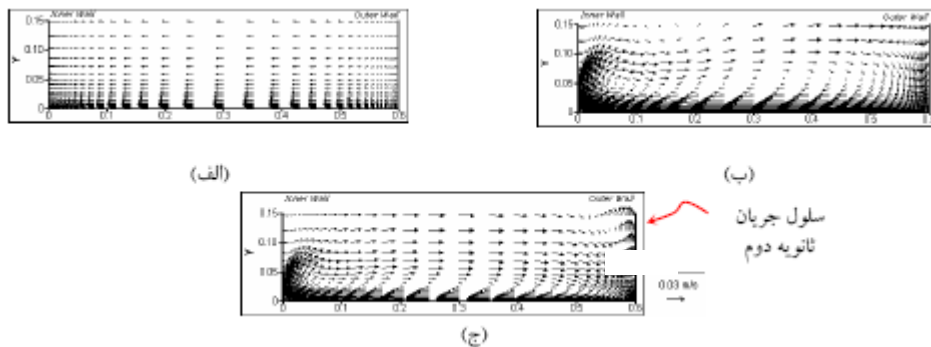
شکل‌گیری الگوی کلی جریان حاکم می‌باشد. بعد از مقطع مذکور، نیروی گریز از مرکز کمی قدرت گرفته، بطوریکه قدرت جریان‌های نزدیک بستر بطرف دیواره بیرونی بیشتر از جریان‌های سطحی می‌باشد. در طول کانال و با کاهش تاثیر گرادیان طولی فشار، نیروی گریز از مرکز بر میدان حاکم شده و جریان ثانویه بصورت یک سلول چرخشی واحد در داخل مقاطع عرضی نمایان می‌شود. همانطوریکه در بخش قبل گفته شد، پدیده بازتوزیع سرعت و انتقال جانبی مومنم طولی در مقطع عرضی $\theta = 25^\circ$ رخ می‌دهد. مقطع مزبور محل آغاز تشدید قدرت جریان ثانویه می‌باشد. شکل (۷-ب) بخوبی نشان دهنده شکل‌گیری سلول کامل جریان ثانویه در راس قوس می‌باشد. این سلول، دارای چرخش ساعتگرد بوده و وجود یک جریان شعاعی بطرف دیواره بیرونی در نزدیکی بستر و جریانی در خلاف جهت آن در سطح آب کاملاً مشهود است. شکل (۷-ج) حاوی نکات مهمی بوده و نشان از وجود دو سلول چرخشی دارد. یکی سلول اصلی ساعتگرد که قسمت اعظم مقطع را اشغال کرده است و دیگری سلول کوچکتری در کنار دیواره بیرونی که چرخش پادساعتگرد داشته و محدود به ناحیه نزدیک سطح آب می‌باشد. سلول کوچکتر، از حوالی مقطع عرضی $\theta = 165^\circ$ درجه شروع شده و تا انتهای قوس ادامه دارد. محققین قبلی به وجود چنین جریانی در قوس بیرونی اشاره کرده‌اند. علت اصلی تشکیل چنین ساختاری از جریان ثانویه، تاثیر سلول چرخشی اصلی و نقش آن در ایجاد غیر همسانی تنش‌های قائم رینولدز در این ناحیه می‌باشد.

در شکل (۶) پروفیل‌های سرعت شعاعی پیش‌بینی شده، با مقادیر متناظر آزمایشگاهی در مقطع خروجی قوس، مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، همخوانی بهتر نتایج حاصل از مدل آشفتگی $k-\omega$ نسبت به مدل قبلی مشهود است، بطوریکه مدل اخیر توانایی پیش‌بینی پدیده برگشت پروفیل سرعت در نزدیکی جداره بیرونی را بخاطر عدم پیش‌بینی جریان ثانویه دوم ندارد. بیشینه خطای پیش‌بینی توسط مدل‌های $k-\omega$ و $k-\epsilon$ به ترتیب برابر $4/81\%$ و $3/73\%$ می‌باشد.

شکل (۷) نشان دهنده بردارهای سرعت جریان‌های عرضی در مقاطع $\theta = 0^\circ$ ، $\theta = 90^\circ$ و $\theta = 180^\circ$ می‌باشد. این شکل به خوبی نشان دهنده روند رشد و کاهش شدت جریان ثانویه در طول کانال می‌باشد. همانطوریکه در این شکل نشان داده شده است، در مقاطع اولیه قوس هیچ جریان حلزونی وجود نداشته و یک جریان شعاعی یک سو به طرف دیواره داخلی برقرار است. علت برقراری چنین جریانی، همانگونه که در بخش قبلی ذکر شد، گرادیان‌های طولی مثبت و منفی فشار در امتداد دیواره‌های داخلی و خارجی می‌باشد (Rodi and Leschziner, 1978)، بطوریکه جهت برقراری پیوستگی در مقاطع اولیه میدان، وجود چنین جریانی لازم است. بررسی جریان‌های داخل مقطع نشان داد که تا مقطع عرضی ۴ درجه، جریان یکطرفه مذکور برقرار بوده و گرادیان طولی فشار، بر



شکل ۶- مقایسه مولفه شعاعی سرعت (جریان عرضی) در مقطع عرضی $\theta = 180^\circ$.



شکل ۷- بردارهای سرعت جریان ثانویه در مقاطع عرضی: (الف) $\theta = 0^\circ$ ، (ب) $\theta = 90^\circ$ و (ج) $\theta = 180^\circ$.

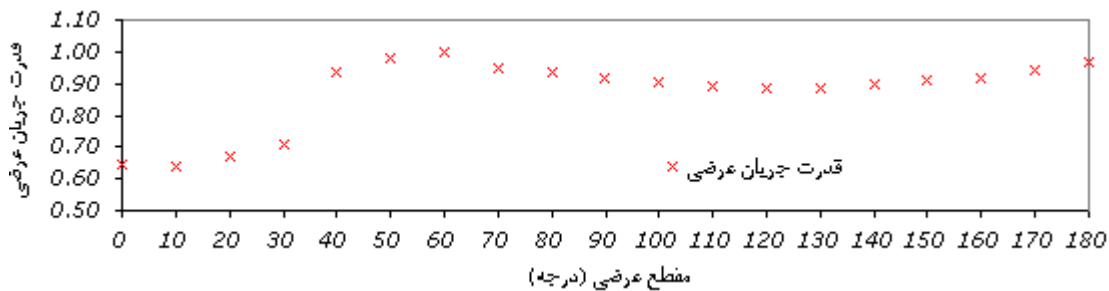
شکل ۸ نشان داده شده است. این پارامتر بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \quad (۶)$$

با توجه به شکل ۸، نرخ رشد جریان حلزونی در 30° درجه اول کانال کم بوده ولی در گذر از مقطع 30° به مقطع 40° ، رشد شدیدی در قدرت جریان ثانویه ایجاد شده و در مقطع 60° به حداکثر قدرت خود می‌رسد. با توجه به شکل ۵، انتقال شدید حداکثر سرعت بطرف قوس بیرونی در گذر از مقطع 60° نشان دهنده قدرت بالای جریان ثانویه در این مقطع می‌باشد. از مقطع مزبور به بعد قدرت جریان ثانویه بتدریج کاهش یافته و از مقطع عرضی 110° تا 130° دارای مقدار نسبتاً ثابتی می‌باشد. وجود پروفیل‌های توسعه یافته سرعت در بازه مزبور در شکل ۵ موید ثابت بودن قدرت جریان ثانویه در این بازه است. با نزدیک شدن به خروجی قوس، بتدریج دوباره بر قدرت جریان ثانویه افزوده می‌شود که علت این امر، وجود جریان ثانویه دوم و تشدید Vorticity جریان می‌باشد.

همانطوریکه در شکل ۴ نشان داده شد، پروفیل قائم سرعت در نزدیکی دیواره بیرونی دارای پائین افتادگی شدیدی می‌باشد. پروفیل مذکور تقریباً در محل تقاطع دو سلول چرخشی قرار داشته و وجود جریان ثانویه رو به پائین شدید در این ناحیه، باعث ایجاد فشردگی در پروفیل قائم سرعت می‌شود. این پدیده تاثیر مهمی در مورفولوژی قوس داشته و همانطوریکه در بخش ۲ ذکر شد، محققین مختلف، نظریات متفاوتی در مورد عملکرد این جریان ارائه کرده‌اند. در بخش‌های بعدی، به دقت به بررسی نقش این پدیده پرداخته شده است.

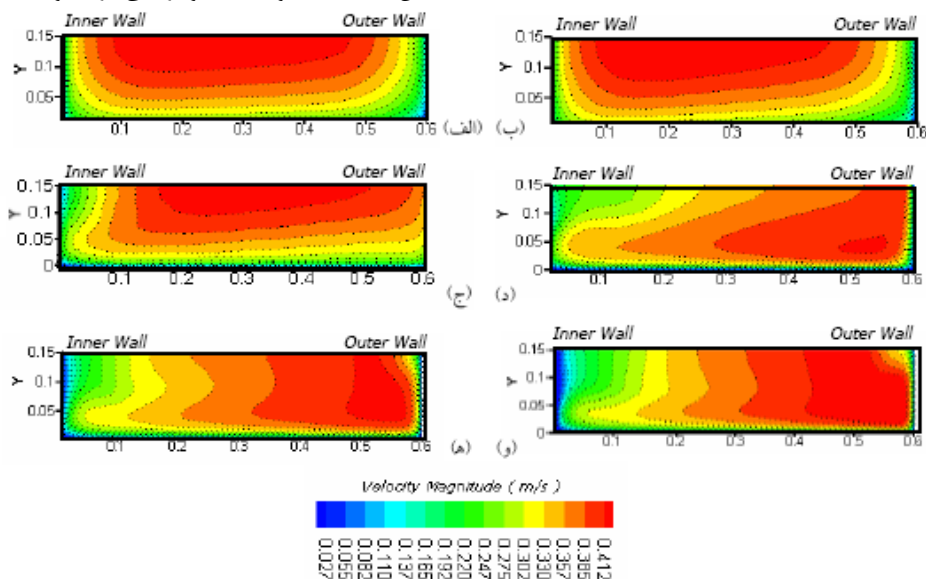
جهت بررسی دقیق روند رشد و استهلاک جریان ثانویه و ایجاد ارتباط بین این جریان و پدیده‌های مشاهده شده در کل میدان، پارامتر Vorticity (متوسط مجموع چرخش وجوه ΔX و ΔY پادساعتگرد یک المان به ابعاد $\Delta X \times \Delta Y$ حول محور Z)، به عنوان معرف قدرت جریان ثانویه در طول کانال حساب شده و در



شکل ۸- تغییرات قدرت جریان ثانویه در طول قوس ۱۸۰ درجه

نشان دهنده انتقال شدید حداکثر سرعت بطرف دیواره بیرونی و قرار گرفتن هسته پرسیعت در ناحیه نزدیک بستر می‌باشد.

نگاهی به دو شکل ۹-ج و ۹-د نشان می‌دهد که ناحیه کم سرعت نزدیک دیواره داخلی، در عرض کانال گسترش یافته و حالت تحدب نزدیک دیواره داخلی، شدیدتر می‌شود. در مقطع عرضی $\theta = 160^\circ$ دو نکته قابل توجه وجود دارد. یکی فشردگی ناحیه پرسرعت در نیمه بیرونی و افزایش گرادیان سرعت نزدیک بستر و دیگری پیدایش ناحیه کوچک کم سرعت در نزدیکی سطح آب، در کناره بیرونی کانال. علت تشکیل ناحیه کم سرعت ناشی از تاثیر سلول چرخشی کنار دیواره بیرونی می‌باشد که در بخش قبل بدان اشاره شد. در مقطع عرضی $\theta = 180^\circ$ ، ناحیه پر سرعت واقع در نیمه دوم، بطرف داخل کانال گسترش یافته و باعث شده است تا عرض بیشتری از نیمه بیرونی نزدیک بستر دارای گرادیان سرعت بالایی شوند. عرض ناحیه کم سرعت نزدیک سطح آب در کنار دیواره بیرونی افزایش یافته است. نحوه تغییرات سرعت در نواحی نزدیک بستر، تاثیر بسزایی بر روند توزیع تنش برشی بستر دارد که در بخش‌های بعدی مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.



شکل ۹- خطوط هم سرعت در مقاطع عرضی: (الف) $\theta = 0^\circ$ ، (ب) $\theta = 10^\circ$ ، (ج) $\theta = 30^\circ$ ، (د) $\theta = 90^\circ$ ، (ه) $\theta = 160^\circ$ و (و) $\theta = 180^\circ$.

۶-۴- تغییرات توزیع سرعت در مقاطع عرضی مختلف

جهت بررسی نحوه توزیع سرعت در عمق و نیز تغییرات آن در طول کانال، خطوط هم سرعت در مقاطع عرضی مختلف در طول کانال، در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در مقطع عرضی $\theta = 0^\circ$ ، سرعت در عرض مقطع، توزیع متقارن چندانی نداشته و خطوط پرسرعت، کمی بطرف دیواره داخلی منحرف شده‌اند. افزایش سرعت از بستر بطرف سطح آب در این شکل قابل مشاهده است. در مقطع بعدی ($\theta = 10^\circ$)، انتقال حداکثر سرعت بطرف دیواره داخلی کاملاً مشهود است. شکل‌های ۹-ب و ۹-ج دارای اختلاف عمده‌ای با هم می‌باشند، بطوریکه در گذر از مقطع $\theta = 10^\circ$ به مقطع عرضی $\theta = 30^\circ$ ، حداکثر سرعت از نزدیکی دیواره داخلی بطرف دیواره بیرونی منتقل شده و علاوه بر این، خطوط هم سرعت، بطرف گوشه داخلی مقطع حالت تحدب پیدا کرده‌اند.

بعد از مقطع عرضی $\theta = 30^\circ$ ، حداکثر سرعت بطرف دیواره بیرونی نزدیکتر شده و به علت تشدید قدرت جریان ثانویه، حداکثر سرعت از سطح آب دور شده و به بستر نزدیکتر می‌شود. شکل ۹-د بخوبی

۶-۵- بررسی توزیع تنش برشی در مرزهای صلب و

پیش‌بینی نواحی محتمل آبشستگی

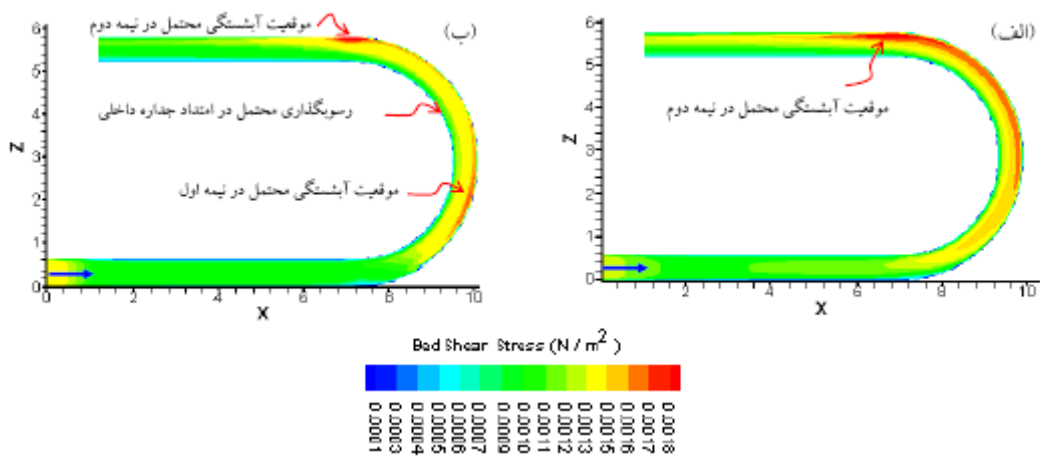
مدل‌های انتقال رسوب استفاده شده در علم مهندسی رودخانه، از رویه معروف نیروی کششی متوسط^۶ جهت بررسی انتقال رسوب بستر و پیش‌بینی فرسایش استفاده می‌کنند. بدین صورت که مصالح بستر^۷ زمانی جابجا خواهند شد که تنش برشی بستر، از یک مقدار حدی^۸ فراتر رود (نظریه شیلدز). اگرچه تحقیق اخیر با فرض بستر صلب صورت گرفته است، لیکن توزیع تنش برشی بستر تا حد زیادی می‌تواند در کسب درک کیفی از الگوی فرسایش میدان کارساز بوده و در حالت کلی می‌تواند محل آغاز حرکت بار بستر را پیش‌بینی کند. با توجه به اینکه از دو مدل آشفتگی جهت مدل‌سازی استفاده شده است، ابتدا کارائی این دو مدل در پیش‌بینی الگوی تنش برشی بستر با استناد به نتایج گزارش شده توسط محققین قبلی که بصورت آزمایشگاهی به مطالعه تغییرات بستر کانال ۱۸۰ درجه ملایم پرداخته اند، بررسی شد. شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب) به ترتیب بیانگر کانتورهای پیش‌بینی شده تنش برشی بستر، با استفاده از دو مدل $k-\epsilon$ و $k-\omega$ می‌باشند. اودگارد و برگس در تحقیقات خود بر روی یک قوس ۱۸۰ درجه ملایم با بستر متحرک، به وقوع دو چاله فرسایشی مشخص در نیمه اول (مقطع ۵۵ درجه) و خروجی نیمه دوم اشاره کرده‌اند (شکل ۱۱). نگاهی به شکل (۱۰-الف) نشان می‌دهد که مدل $k-\epsilon$ استاندارد، تنها قادر به پیش‌بینی چاله فرسایشی محتمل در خروجی قوس بوده و در پیش‌بینی چاله فرسایشی نیمه اول، ناتوان است.

برخلاف مدل $k-\epsilon$ استاندارد، تنش برشی پیش‌بینی شده توسط مدل $k-\omega$ ، همخوانی بسیار خوبی با نتایج گزارش شده توسط این دو محقق دارد. همانگونه که در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است، مدل اخیر بطور مشخص از وجود دو ناحیه با مقادیر تنش برشی بالاتر دو نیمه خبر می‌دهد. در نیمه اول، ناحیه مذکور از مقطع عرضی $\theta = 40^\circ$ شروع شده و به حداکثر خود در مقطع عرضی $\theta = 50^\circ$ می‌رسد.

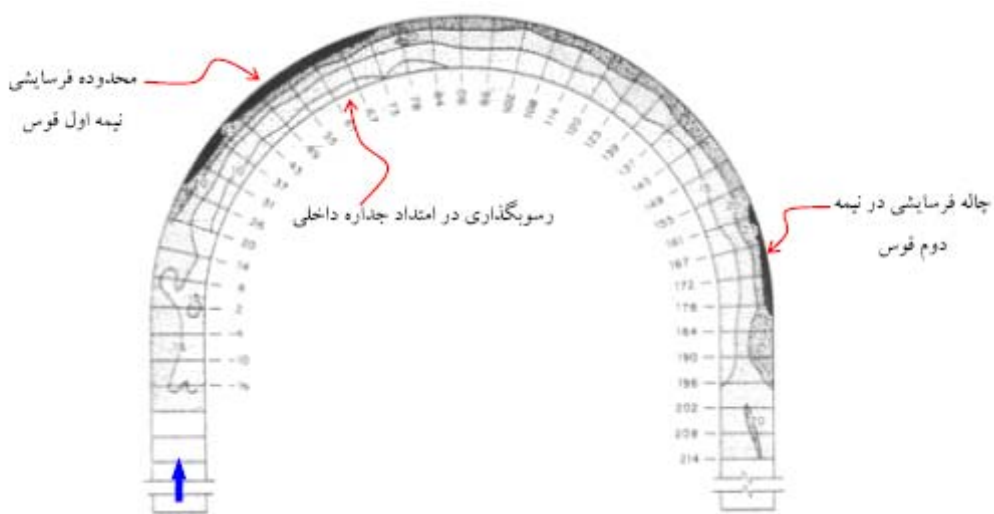
از مقطع مزبور تا مقطع $\theta = 70^\circ$ تنش برشی بستر تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین وقوع حفره آب‌شستگی در بازه $30^\circ < \theta < 70^\circ$ تا حد زیادی محتمل است. علت تشکیل این ناحیه با توجه به نحوه تغییرات قدرت جریان ثانویه در بازه مزبور (شکل ۸) قابل توجیه است. وجود قدرت بالای جریان ثانویه در این بازه باعث انتقال شدید

خطوط جریان بطرف دیواره بیرونی شده و همین پدیده باعث تشکیل نواحی با گرادیان سرعت بالا در نواحی نزدیک بستر و در نتیجه تنش برشی شدید در این ناحیه می‌شود. شکل ۱۲ نشان دهنده توزیع تنش برشی بستر و جداره بیرونی کانال می‌باشد. در شکل مزبور، وجود تنش برشی بالا در بستر و دیواره بیرونی کانال در بازه مزبور قابل مشاهده است. دو ناحیه پرتنش در جداره بیرونی تشکیل شده است. مقایسه دو ناحیه مزبور در نیمه اول و نیمه دوم، نشان می‌دهد که محل وقوع تنش برشی بالا در قسمت بالای جداره خارجی نیمه اول، اتفاق افتاده است در حالیکه برای نیمه دوم، قسمت میانی جداره خارجی تحت تنش برشی شدیدی قرار دارد. علت این امر با توجه به شکل‌های (۹-ج) الی (۹-ه) قابل توجیه است. با توجه به شکل (۹-ج) هسته پرسرعت در نیمه اول کانال به نیمه بالائی کناره خارجی نزدیکتر بوده و در نتیجه، گرادیان سرعت شدیدی در این ناحیه حاکم است. تشکیل سلول چرخشی دوم در خروجی قوس باعث انتقال شدید هسته پر سرعت بطرف ترازهای پائینی و فشرده شدن آن در ناحیه نزدیک دیواره بیرونی میشود. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تشکیل این سلول، جداره بیرونی را شدیداً تهدید کرده و در صورت فرسایش‌پذیر بودن، احتمال تخریب آن وجود دارد. لذا نظریه (Blankaert and Graf (2001) در مورد عملکرد این سلول در جلوگیری از فرسایش، صحت چندانی نداشته و پدیده‌های رخ داده، نظریه (Booij (2003) در مورد نقش این سلول در تشدید فرسایش را تأیید می‌کنند.

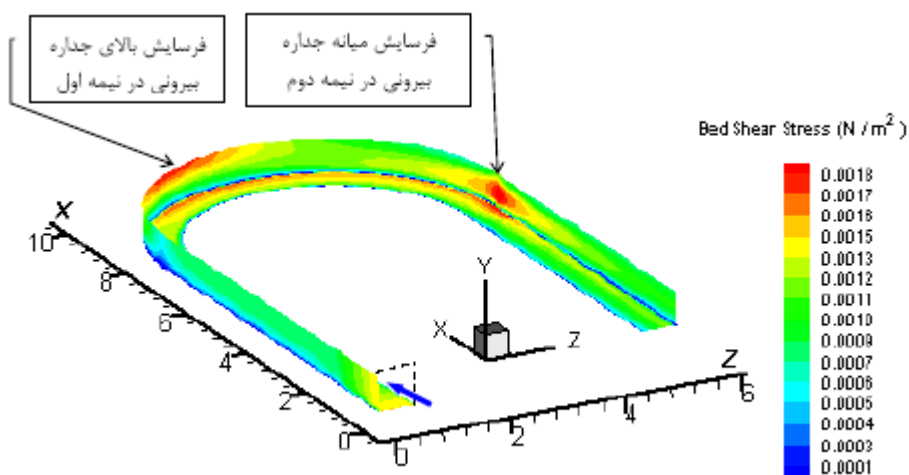
مقدار تنش برشی در چاله فرسایشی محتمل واقع در خروجی قوس بیشتر از نیمه اول بوده و در نتیجه انتظار می‌رود که در آغاز آزمایش با بستر متحرک، تشکیل چاله فرسایشی در این محل سریع‌تر از نیمه اول اتفاق بیافتد. لازم به ذکر است که (Odgaard and Bergs (1998) در نتایج آزمایشگاهی خود، از وقوع فرسایش در مقطع عرضی $\theta = 120^\circ$ درجه خبر داده‌اند در حالیکه مدل عددی اخیر وقوع چنین پدیده‌ای را نشان نمی‌دهد. علت این امر می‌تواند نتیجه اندرکنش فاز رسوب و سیال در کار آزمایشگاهی با توجه به وجود بار بستر باشد. در هر حال و همانطوریکه در ابتدای این بخش نیز عنوان شد، توزیع تنش برشی بستر در حالت بستر صلب فقط قادر به پیش‌بینی حالت شروع فرسایش موضعی بوده و بررسی دقیق تغییرات توپوگرافی بستر نیاز به مدل‌سازی در حالت بستر متحرک دارد.



شکل ۱۰- توزیع تنش برشی بستر، پیش بینی شده توسط مدل‌های آشفتگی: (الف) $k-\epsilon$ استاندارد - (ب) $k-\omega$.



شکل ۱۱- توپوگرافی بستر قوس ۱۸۰ درجه، کار آزمایشگاهی اودگارد و برگس (۱۹۸۸).



شکل ۱۲- توزیع تنش برشی بستر و جداره بیرونی فلوم مورد نظر - مدل آشفتگی $k-\omega$.

۷- بحث و جمع بندی

الگوی سه بعدی جریان آشفته در فلوم قوسی با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه بصورت عددی و با استفاده از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\omega$ و $k-\epsilon$ مدل‌سازی شد. بررسی نتایج حاصله نشان می‌دهد که مدل آشفتگی $k-\omega$ بهتر از مدل $k-\epsilon$ عمل کرده و جریان ثانویه پیش‌بینی شده با این مدل همخوانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی نسبت به مدل $k-\epsilon$ دارد. بررسی توزیع سرعت در صفحه نزدیک سطح آب نشان از انتقال جانبی حداکثر سرعت بطرف جداره‌های داخلی و خارجی دارد که علت این پدیده‌ها، نقش گرادیان طولی فشار و جریان ثانویه در انتقال جانبی مومنت طولی می‌باشد. قدرت جریان ثانویه معیار بسیار مناسبی برای بررسی روند پدیده‌های رخ داده در این میدان می‌باشد، بطوریکه نحوه توزیع سرعت و نیز توزیع تنش‌های برشی در دیواره‌های جانبی و بستر کانال بخوبی با نحوه تغییرات این پارامتر هماهنگ است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که احتمال وقوع دو چاله فرسایشی در نیمه اول و خروجی قوس در شرایط مدل‌سازی شده و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ وجود دارد که صحت این نتایج با استناد به نتایج آزمایشگاهی سایر محققین تأیید شده است.

پی نوشت‌ها

- 1- Modares Hydraulic Lab
- 2- Large Eddy Simulation (LES)
- 3- Pre-Processor
- 4- Solver
- 5- Post- Processor
- 6- Mean Tractive Force
- 7- Bed-load
- 8- Threshold

تاریخ دریافت مقاله: ۲۲ آذر ۱۳۸۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹ مهر ۱۳۸۴

۸- مراجع

اقبالزاده، افشین (۱۳۷۹)، "بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس"، مجموعه مقالات دومین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

پیرستانی، محمد رضا (۱۳۸۳)، "بررسی الگوی جریان و آبستتگی در دهانه ورودی آبگیر کانال‌های دارای انحنا". رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.

خانجانی و همکاران (۱۳۷۸) "حل عددی جریان سه بعدی در پیچ رودخانه و دهانه آبگیر"، مجموعه مقالات ششمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، آبان ۱۳۷۸.

صفرزاده، اکبر (۱۳۸۳) "شبیه سازی عددی الگوی جریان در آبگیری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

Blanckaert K. and Graf W. H. (2001) "Mean Flow and Turbulence in Open-Channel Bend" *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(10), pp. 57-62.

Booij R. (2003) "Measurements and large eddy simulations of some curved flumes" *Journal of turbulence*, 4(8), pp. 35-43.

Celik, I. (1999)., "Introductory Turbulence Modeling", Lectures Notes, Western Virginia University.

Mockmore, C. E. (1944) "Flow around Bends in Stable Channels", *Transactions, ASCE*, 109, 334p.

Odgaard, A. and Bergs A. (1988) "Flow Processes in a Curved Alluvial Channel" *Water Resources Research*, 24(1), pp. 45-56.

Rodi, W. and Leschziner M. A. (1978) "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow" *Journal of the Hydraulic Division*, 105(HY10), pp. 1297-1333.

Rosovskii, I. L. (1961) "Flow of Water in Bends of Open Channels" Israel Program for scientific Translations, Jerusalem.