مطالعه عددی الگوی جریان در کانال قوسی تحت تأثیر تغییرات پارامتر U/U_c با استفاده از نرم افزار Flow-3D

محمد واقفی[1*]، مسعود قدسیان[2] و امیر عظیمی[3]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر. vaghefi@pgu.ac.ir

۲- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران .

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، بوشهر.

تاریخ دریافت: ۹۱/۹/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۵

چکیده

اکثر رودخانه ها دارای مسیرهای قوسی می باشند که الگوی جریان کاملاً پیچیده ای بر آن حاکم می باشد. بـرای مطالعـه رفتـار یک رودخانه لازم است تا الگوی جریان حاکم بر قوس‌های آن کاملاً شناخته شود. مدل‌های عددی به عنوان یـک ابـزار مناسـب و توانمند علاوه بر پیش بینی چنین میدان‌هایی می‌توانند درک مطلوبی از آن ارائه کنند. در مطالعه حاضر با استفاده از مدل عددی سه بعدی Flow-3D، تأثیر پارامتر U/U_c بر الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه با بستر متحرک مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتـایج بـا داده های آزمایشگاهی مقایسه گردید. تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به الگوی جریان در مقاطع عرضی و پلان‌های مختلف از دیگر مـوارد مطرح شده در این مقاله می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: الگوی جریان، پارامتر U/U_c، قوس ۹۰ درجه، مدل عددی، Flow-3D.

Numerical Study of Flow Pattern in the Bend Channels Affected Parameter U/U_c Using Flow-3D Software

M. Vaghefi[1*], M. Ghodsian[2] and A. Azimi[3]

1*- Corresponding Author, Associate Professor of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr.

2- Professor of Hydraulic, Research of Water Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran.

3- M. Sc. of Civil Engineering, Azad University of Bushehr branch, Bushehr.

Received:5 December 2012 Accepted:5 January 2015

Abstract

Most rivers have bend routs that the quite complex flow pattern is dominated on them. It is necessary to study the behavior of a river, the flow pattern is well known that the dominant bend. Numerical models as a powerful instrument for the prediction of such areas can provide a good understanding of them. In the present study using three-dimensional numerical model Flow-3D, Parameters of U/U_c the flow pattern at a 90 degree arc of the moving bed is placed. The results were compared with experimental data.Analysis of results relevant to flow pattern in cross sections and different plans are among other points introduced in this paper.

KeyWords: Flow pattern, U/U_c Parameter, 90 Degree bend, Numerical model, Flow-3D

مقدمه

الگوی جریان و فرسایش ناشـی از آن، مسـاله ای مرکـب از جریان ثانویه و دانه بندی رسوبات می باشد. لازم به ذکر است در محل قوس ها سطح آزاد جریان و تراز کف در طـول عمـود بـر مسیر جریان ثابت نبوده و تعیین آنها مشکل می باشد. تعیین این دو پارامتر متأثر از عواملی چون طبیعت سه بعدی الگوی جریـان

در محل خم ها، فرسایش پذیری دیواره ها، جدایی مصالح بستر و شیب جانبی سطح آب می باشد. با توجه به اهمیت الگوی جریان در قوس، درگذشته مطالعات عددی و آزمایشگاهی در این زمینه انجام شده است. مک مور[1] (۱۹۴۳) با انجام آزمایش بر روی دو قوس ۱۸۰ درجه و اندازه گیری پروفیل های سرعت طولی، نتیجه گرفت که جریان در نزدیکی دیواره داخلی بیشتر از دیواره خارجی می‌باشد. همچنین با استفاده از توزیع سرعت گردابه آزاد، الگوی جریان در قوس را به دست آورد و نشان داد که توزیع سرعت در عرض مقطع به گونه ای است که حاصل ضرب سرعت مماسی و شعاع انحنا مقداری ثابت است. شکری[2] (۱۹۵۰) با انجام مطالعاتی بر روی جریان در قوس رودخانه، معیاری برای قدرت جریان ثانویه معرفی کرد. این معیار عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی. همچنین نتیجه گرفت که در یک قوس، انرژی جنبشی جریان جانبی در مقایسه با انرژی جنبشی جهت طولی کوچک می‌باشد. رزوروفسکی[3] (۱۹۵۷) رابطه ای برای تعیین طول مشخصه برای زمانی که جریان ثانویه به قدرت نهایی برسد، ارائه نمود. وی با استفاده از این رابطه نتیجه گرفت که برای کانال‌های کم عمق، قوسی با زاویه مرکزی حداقل ۱۰۰ درجه و برای کانال‌های عمیق، زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه برای توسعه جریان ثانویه لازم می‌باشد. همچنین مشاهده کرد که فرض توزیع لگاریتمی برای پروفیل سرعت، نتایج بسیار خوبی حاصل می کند. ایپن و درینکر[4] (۱۹۶۲) با تزریق ماده رنگی مشاهده نمودند که رشته های رنگی در بستر کانال به طرف قوس داخلی می باشد در حالی‌که مسیر رنگی ایجاد شده در سطح آب تمایل به ساحل خارجی دارد. لچزینر و رودی[5] (۱۹۷۹) جریان در قوس ۱۸۰ درجه با انحنا شدید را در حالت آشفته و با استفاده از مدل عددی کا-اپسیلون[6] به صورت عددی مدل‌سازی کرد. در معادلات مورد استفاده، فرض عدم وجود پرش هیدرولیکی و جدایی جریان اعمال شده است. وی مشاهده کرد که با نزدیک شدن به خروجی قوس، محل وقوع سرعت حداکثر به طرف قوس بیرونی متمایل می‌شود. دی وریند و گلدف[7] (۱۹۸۳) به بررسی صحرایی و مدل‌سازی عددی جریان در یک بازه کوتاه از رودخانه دامل در هلند پرداختند. مقطع مورد نظر شامل دو قوس ۹۰ درجه که به صورت متوالی و در جهت مخالف هم قرار دارند و بین این دو قوس، یک بازه مستقیم کوتاه می باشد. نتایج نشان داد که حداکثر سرعت در ورودی قوس در نزدیکی دیواره داخلی بوده و در نواحی نزدیک به خروجی قوس به طرف قوس خارجی متمایل می‌شود. داماسا‌کینیدجورجیادو و و اسمیت[8] (۱۹۸۶) به مطالعه آزمایشگاهی و عددی جریان در یک قوس ۹۰ درجه پرداختند که سطح مقطع کانال به تدریج و با نزدیک شدن به طرف خروجی قوس کاهش می یافت. ایشان نتیجه گرفتند که توزیع سرعت در جهت قائم از توزیع لگاریتمی تبعیت می کند. همچنین توزیع سرعت مماسی متوسط گیری شده در عمق برای مقاطع مختلف در طول کانال را نشان دادند. برگز[9] (۱۹۹۰) با مطالعه آزمایشگاهی یک کانال U شکل با مقطع ذوزنقه ای و بستر متحرک، به بررسی الگوی جریان و تغییرات توپوگرافی بستر پرداخت و به این نتیجه رسید که حرکت حلزونی جریان بلافاصله پس از ورود به جریان به داخل قوس نمایان می شود و در سه تا پنج متری قوس توسعه می یابد و با خارج شدن از قوس کاملا محو می شود. لین و همکاران[10] (۱۹۹۹) با استفاده از مدل دو بعدی متوسط گیری شده در عمق، الگوی جریان در دو قوس ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه را بررسی کردند. تاثیر جریان ثانویه در این مدل از طریق محاسبه تانسور انتشار تنش در نظر گرفته شده است. علاوه بر تنش های انتشار، نیروهای مهم موجود در طول کانال ها نیز مقایسه شده که نشان می دهد، جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه قوی تر از قوس ۹۰ درجه می‌باشد. وو و همکاران[11] (۲۰۰۰) به بررسی سه بعدی الگوی جریان با در نظر گرفتن رسوبات به صورت بار بستر و معلق در یک قوس ۱۸۰ درجه پرداختند. این مدل به خوبی جریان ثانویه را پیش‌بینی کرد. همچنین به تعیین توزیع زاویه تابیدگی بردار سرعت به صورت متوسط گیری شده پرداخت و نتیجه گرفتند که در سطوح بالایی برای مقاطع واقع در نزدیکی دیواره خارجی بیشتر از مقاطع سمت مقابل می‌باشد. جانگ و یون[12] (۲۰۰۰) به مطالعه الگوی جریان و توپوگرافی بستر در یک قوس ۱۸۰ درجه ملایم پرداختند. آن ها نشان دادند که در قوس های ملایم در حالت کلی و برای هر نوع مصالح بستر، محل وقوع حداکثر سرعت برای نواحی ورودی قوس در نیمه اول، به طرف دیواره داخلی متمایل بوده و به تدریج و با نزدیک شدن به خروجی قوس، مکان هندسی مزبور به طرف دیواره ی خارجی منتقل می‌شود. شمس و همکاران[13] (۲۰۰۲) با استفاده از برنامه فلوئنت به تحلیل عددی انتقال رسوب در خم رودخانه ها و با دانه‌بندی مختلف دانه بندی بستر پرداختند. الگوی جریان در یک کانالی که با مقیاس ۱:۱۰۰ ساخته شده بود توسط ایشان اندازه گیری شد و با مدل عددی مقایسه گردید و نتیجه گرفتند که کمیت های متوسط جریان با مدل عددی شباهت دارد اما پارامترهای آشفتگی با مدل عددی متفاوت می باشد. بلانکارت[14] (۲۰۰۲) با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک فلوم قوسی ۱۲۰ درجه با بستر متحرک، محل حداکثر فرسایش بستر در

1- Mockmore
2- Shukry
3- Rozovski
4- Ippen and Drinker
5- Leschziner and Rodi
6- K-ε
7- De Vriend and Geldof
8- Damaskinidou-Georgiadou and Smith
9- Bergs
10- Lien *et al.*
11- Wu *et al.*
12- Jung and Yoon
13- Shams *et al.*
14- Blanckaert

قوس و همچنین الگوی جریان ثانویه را مورد بررسی قرار داد. نتایج ایشان شکل گیری دو چاله در قوس را نشان داد. بلانکارت و گراف [1] (۲۰۰۴)، به مطالعه باز توزیع سرعت و تنش برشی مرزی و شکل و خصوصیات توپوگرافی بستر در کانال‌های قوسی پرداختند. آن ها با در نظر گرفتن یک ناحیه مرکزی به عنوان یک سلول که می‌تواند دارای چرخش نیز باشد و یک مدل شبه سه بعدی، به تعیین دینامیک توپوگرافی بستر در کانال‌های قوسی پرداختند. یانگ [2] (۲۰۰۵) به بررسی اندر کنش تنش برشی مرزی و توزیع سرعت و جریان های ثانویه در کانال های باز پرداخت و توزیع سرعت و تنش برشی را در حالت جریان یکنواخت و ماندگار و همچنین متلاطم به کار برد و با در نظر گرفتن اثر سرعت عمود بر دیواره کانال به تبیین معادله‌های حاکم برای توزیع تنش برشی رینولدزی و تنش برشی مرزی پرداخت. معادله‌های به دست آمده از تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی که در گذشته به دست آمده است، برخوردار بود. روتر و اولسن [3] (۲۰۰۵) جریان ثانویه و انتقال رسوب را در یک کانال ۹۰ درجه باریک با استفاده از مدل آشفتگی کا-اپسیلون مدل‌سازی نمودند و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج حاصل از مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که جهت حرکت ذرات رسوب بستگی به جهت تنش برشی نزدیک بستر دارد. سو و همکاران [4] (۲۰۰۶) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی موضعی در یک کانال با قوس ۹۰ درجه پرداختند و تأثیر پارامترهایی چون عدد فرود، شیب و عرض دیواره محافظ و اندازه ذرات بستر بر میزان آبشستگی در نزدیکی بستر را مورد بحث و بررسی قرار دادند. قدسیان و موسوی (۲۰۰۶) به مطالعه تغییرات بستر با توجه به فاکتورهای عمق جریان، سرعت جریان و خصوصیات مواد بستر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عمق حداکثر آبشستگی با عدد فرود در ارتباط است. زنگ و همکاران [5] (۲۰۰۸) به بررسی جریان و انتقال رسوب در کانال های قوسی با شیب تند (معادل عرض کانال) پرداختند و برای این منظور دو حالت بستر تخت و تعادل یافته مربوط به دو فاز ابتدایی و انتهایی مرحله آبشستگی و رسوب گذاری را در نظر گرفته و نتیجه گرفتند که بهبود کیفی مدل های آشفتگی و مدل های انتقال رسوب باعث پیش بینی و سازگاری بهتر مدل های ترکیبی می گردد. واقفی و همکاران (۱۳۸۷) به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آبشستگی در قوس ۹۰ درجه پرداختند. نتایج به دست آمده بیانگر تشکیل جریانی در خلاف جهت جریان ثانویه اصلی، موسوم به جریان ثانویه دوم در نزدیکی ساحل خارجی است. این جریان از مقاطع میانی نیمه اول قوس تا انتهای قوس مشهود است. همچنین قدرت جریان ثانویه اصلی و مقدار چرخش سلول‌ها در موقعیت ۴۵ درجه بیشترین مقدار را دارد. دهقانی و همکاران (۱۳۸۶) به بررسی تغییرات بستر کانال های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه پرداختند و نتیجه گرفتند که در شرایط هیدرولیکی متفاوت انجام آزمایش‌ها، در نیمه دوم قوس یک تپه رسوبی در قوس داخلی و یک چاله فرسایشی روبروی این تپه رسوبی شکل می گیرد. همچنین در نیمه دوم قوس، تپه رسوبی در قوس داخلی و چندین ناحیه فرسایشی در قوس داخلی شکل می گیرد که محل چاله های فرسایشی، تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان می باشد. فضلی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه در شرایط مختلف جریان پرداختند و نتیجه گرفتند که در حالت $1/24<U/Uc<1/33$ دو چاله فرسایشی در جداره خارجی قوس تشکیل می شود. اما در حالت $U/Uc<1$ فقط یک چاله فرسایشی در نزدیکی خروجی قوس به وجود می‌آید و در حالت $1<U/Uc<1/1$ دو چاله فرسایشی در جداره خارجی به یکدیگر نزدیک یا در هم ادغام می شوند. ناجی ابهری و همکاران (۲۰۱۰) به شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداخته و به این نتیجه رسیدند که الگوی جریان در خم کانال به طور گسترده ای توسط جریان ثانویه و نیروی گریز از مرکز را تحت تاثیر قرار می گیرد و مقایسه بین داده های تجربی و مدل عددی نشان داد که نرم افزار SSIIM قادر به شبیه سازی دقیق الگوی جریان در یک خم۹۰ درجه می باشد. لیاقت و همکاران (۲۰۱۴) به مطالعه عددی هیدرولیک جریان در یک کانال U شکل با عرض متغیر با استفاده از نرم افزار SSIIM پرداختند. آن‌ها مؤلفه های سه بعدی سرعت جریان، تنش برشی، قدرت جریان ثانویه و حلزونی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی پیرستانی (۱۳۸۲) مقایسه نمودند.

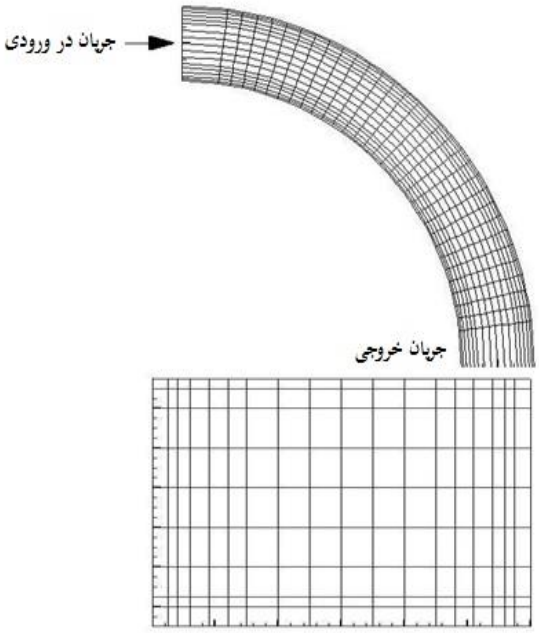
ضرورت انجام تحقیق

با توجه به این که پدیده آبشستگی می تواند صدمات جدی در کف و دیواره های کانال قوسی داشته باشد، محققین و دانشمندان بسیاری در طول دهه‌های گذشته در این زمینه تحقیقات علمی فراوانی انجام داده اند. این تحقیقات به‌طور کلی شامل بررسی شناخت اثر شرایط و نوع جریان بر آبشستگی و اثر نوع و خصوصیات رسوب بر آبشستگی و الگوی جریان بوده است. اما بررسی تأثیر پارامتر U/Uc بر الگوی جریان در کانال های قوسی از مواردی است که تاکنون کمتر مورد توجه محققین قرار داشته است. به همین دلیل در این مقاله به صورت عددی به شبیه سازی پدیده الگوی جریان در کانال قوسی ۹۰ درجه تحت تأثیر پارامتر U/Uc پرداخته شده و همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار Flow 3D با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت سنجی شده است.

1- Blanckaert and Graf
2- Yang
3- Ruther and Olsen
4- Sui *et al.*
5- Zeng *et al.*

جدول ۱-مقادیر سرعت و ارتفاع جریان بر اساس تغییرات پارامتر U/U_c با استفاده از روش نیل

شماره مدل	دبی (لیتر بر ثانیه)	عرض کانال (سانتی متر)	نسبت سرعت به سرعت بحرانی	سرعت (سانتی متر بر ثانیه)	ارتفاع جریان (سانتی متر)
۱	۲۵	۶۰	۰/۹۸	۰/۳۵	۱۲
۲	۲۵	۶۰	۰/۹	۰/۳۳	۱۲/۵
۳	۲۵	۶۰	۰/۸	۰/۳۱	۱۳/۶
۴	۲۵	۶۰	۰/۷	۰/۲۸	۱۵



شکل ۱- شمایی از شبکه بندی

مواد و روش‌ها

میدان مورد نظر یک کانال خمیده با زاویه ۹۰ درجه با نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر چهار، عمق کانال ۷۰ سانتی متر و عرض آن ۶۰ سانتی متر می باشد. بستر کانال از یک لایه ماسه یکنواخت به ضخامت ۳۵ سانتی‌متر با قطر متوسط ۱/۲۸میلی‌متر پوشیده شده است. جریان آب در کانال زیر بحرانی و آشفته می باشد. دبی جریان در کلیه مدل ها ثابت و برابر با ۲۵ لیتر بر ثانیه است. در این مدل‌سازی به بررسی الگوی جریان چهار حالت مختلف پارامتر U/U_c (۰/۹۸، ۰/۹، ۰/۸و ۰/۷) نسبت به یکدیگر در شرایط بستر صلب پرداخته شده است.

برای محاسبه سرعت بحرانی از روش نیل[1] استفاده گردیده است. در منحنی های نیل اگرقطر متوسط رسوبات از ۰/۰۰۰۳ متر بیشتر و از ۰/۰۳ مترکمتر باشد از رابطه زیر برای محاسبه سرعت بحرانی در زمان آغاز حرکت استفاده می شود (ایپن و درینکر، ۱۹۶۲):

$$U_c=K_{U1}11.5h_m^{x}d_s^{0.3} \quad (۱)$$

که در آن توان X به صورت زیر محاسبه می شود:

$$X= K_{U2}(0.123/d_s^{0.20}) \quad (۲)$$

$$_{U1}=0.3048^{(0.65-x)} \quad (۳)$$

در روابط فوق h_m: ارتفاع جریان در حالت تعادل بر حسب متر، d_s: قطر متوسط رسوبات بر حسب متر و K_{U2}=۰/۷۸۸ می باشد.

1- Neil

از حل روابط بالا پارامترهایی به‌دست می آید که در جدول (۱) ذکر شده است.

معرفی نرم افزار Flow-3D

Flow-3D یک نرم افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط شرکت علوم جریان[1] است. این نرم افزار برای کمک به تحقیق در زمینه رفتار دینامیکی مایعات و گازها در موارد کاربردی وسیع طراحی شده است. Flow-3D برای مسائل یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های عمده این نرم افزار برای تحلیل‌های هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد می باشد. نرم افزار FLOW-3D برای جریان های سه بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند نیز کاربرد دارد و از روش حجم محدود در شبکه بندی با ساختار استفاده می نماید. به لحاظ استفاده از روش احجام محدود در یک شبکه منظم، شکل معادله‌های گسسته شده مورد استفاده نظیر معادله‌های گسسته شده در روش تفاضل محدود می باشند. بر این اساس نرم افزار از روش های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می برد. در این نرم افزار از دو روش عددی برای شبیه سازی هندسی استفاده می شود:

۱- روش حجم سیال[2]: این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می گیرد که شامل سه جزء است:

نمایش موقعیت سطح

شبکه بندی

شرایط مرزی سطح

۲- روش کسر مساحت – حجم مانع[3]: این روش برای شبیه سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

از آنجایی که این نرم افزار برای مدل کردن سطح آزاد از روش حجم سیال استفاده می کند، احتیاج به تعریف تابع حجم(F) دارد که از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{Vs}\left(\frac{\partial(FAxu)}{\partial x}+\frac{\partial(FAyu)}{\partial y}+\frac{\partial(FAyu)}{\partial y}\right)=FDIF \qquad (۴)$$

$$FDIF=\frac{1}{Vs}\left(\frac{\partial(\nu Ax\frac{\partial F}{\partial x})}{\partial x}+\frac{\partial(\nu Ay\frac{\partial F}{\partial y})}{\partial y}+\frac{\partial(\nu Az\frac{\partial F}{\partial z})}{\partial z}\right) \qquad (۵)$$

که در آن ∂F: کسر حجم باز به جریان، ρ: چگالی حجم سیال است. مؤلفه های سرعت (u،v،w) در جهات (x،y،z) می باشند. Ax: سطح جریان در جهت x است. Ay و Az: به طور مشابه در جهت y و z می باشند. ضریب نفوذ به صورت $Vs=CF\mu$ می باشد که CF یک عدد ثابت است. شکل F وابسته به نوع مسئله ای است که مدل می شود. مسائل غیر قابل تراکم شامل یک سیال با سطح آزاد یا دو سیال با سطح مشترک هستند. برای سیال یک فازی، F تابع حجم سیال است و بیانگر حجم اشغال شده توسط سیال می باشد بنابراین F=1 نشانگر وجود سیال و F=0 نشانگر وجود حباب و حفره است.

از کاربرد های FLOW-3D در مهندسی آب می توان به پایه های پل، هواگیری در پرش هیدرولیکی، سریز دایره ای، هواگیری در سریزها، شکست سد، پارشال فلوم، آبشستگی، جریان روی یک پلکان، جریان های با عمق کم، جریان در کانال های کنترل پرش هیدرولیکی، موج های کم ارتفاع، دریچه های کشویی و جریان سریز اشاره کرد.

تولید و تنظیم شبکه بندی میدان حل

در نرم افزار FLOW-3D تولید شبکه به دو روش کارتزین و استوانه‌ای صورت می‌گیرد و این امکان وجود دارد که با توجه به اهمیت برخی مقاطع، تعداد و اندازه شبکه هایی که برای تولید میدان حل مورد نیاز می باشد ریزتر (پر اهمیت) و یا درشت تر (کم اهمیت) در نظر گرفته شود. زمان اجرای محاسبات و میزان مطابقت نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، دو عامل مهم در انتخاب شبکه بندی بهینه خواهد بود. در این تحقیق با توجه به قوسی بودن کانال از روش استوانه ای برای تولید شبکه استفاده شده است و با در نظر گرفتن دو فاکتور فوق ابعاد ۲۷×۳۳×۱۹ انتخاب شده است که به ترتیب نشان دهنده تقسیمات در راستای شعایی، زاویه ای و ارتفاعی می باشد و با توجه به تغییرات U/U_c که باعث تغییر در ارتفاع جریان می شود، این شبکه بندی در راستای z تغییر می کند.

تحلیل مدل ها با نرم افزار نشان می‌دهد که ریزتر کردن شبکه باعث تغییر اساسی در دقت محاسبات نشده است. برای نمونه وقتی تعداد مش ها به دو برابر افزایش یافت تغییر قابل ملاحظه ای در نتایج حاصل نگردید و فقط موجب افزایش زمان اجرای برنامه گردیده است که این مساله از نظر اقتصادی توجیه مناسبی نخواهد داشت.

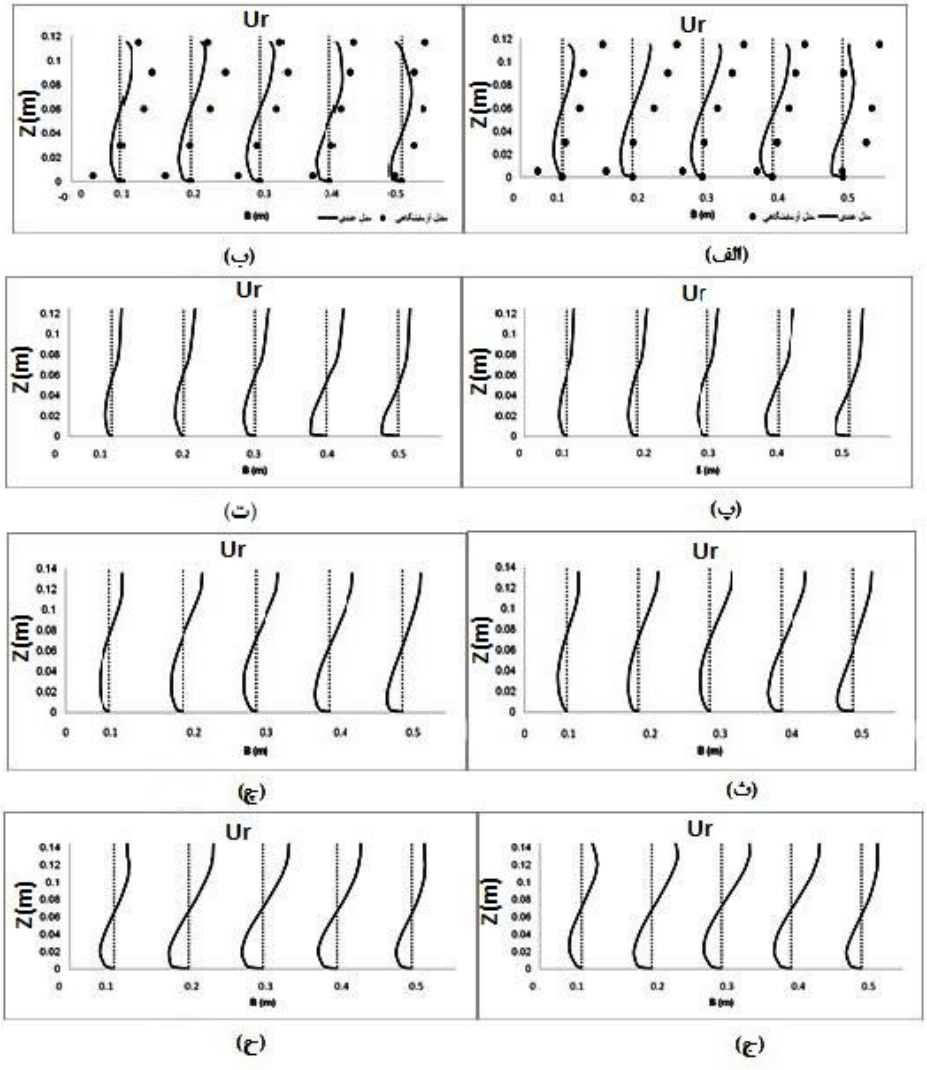
مدل تلاطمی استفاده شده در نرم افزار مدل گروه نرمال شده[4] می‌باشد. این نرم افزار، مدل آشفتگی جدیدی بر مبنای گروه‌های نرمال شده رینولدز پیاده سازی کرده است. این دیدگاه شامل روش‌های آماری برای استحصال یک معادله متوسط گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی است. این مدل کمتر بر ارقام ثابت تجربی تکیه می کند و برای توصیف دقیق تر آشفتگی جریان‌های با شدت کمتر و جریان هایی با مناطق دارای برش، قوی‌تر شناخته شده است. شکل (۱) شمایی از شبکه بندی تولید شده را نشان می دهد.

1- Flow science, Inc

2 -VOF

3 -FAVOR

4- RNG



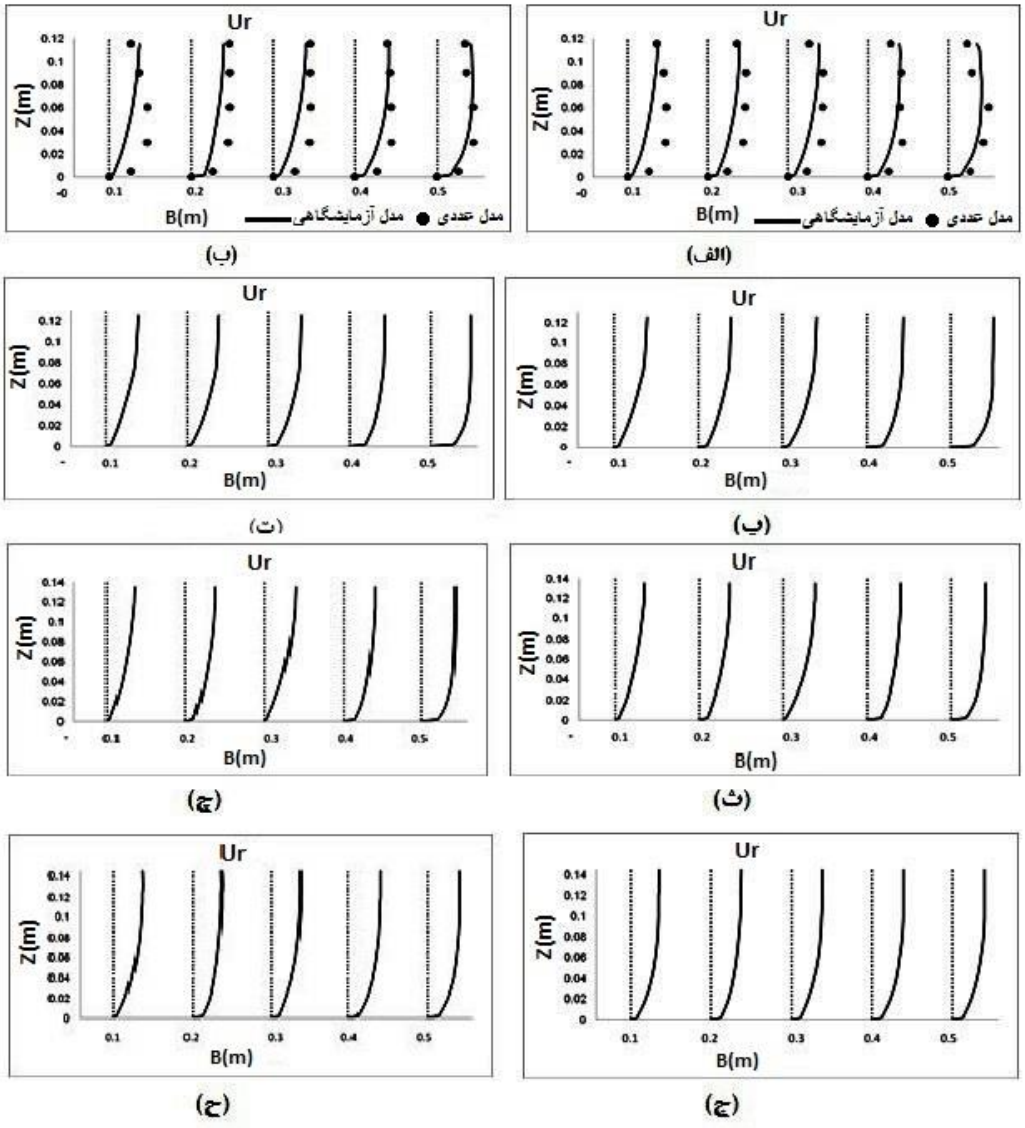
شکل ۲- نمونه ای از تغییرات سرعت شعاعی (U_r) بر حسب متر بر ثانیه برای U/U_c=۰/۹۸ در مقاطع (الف)۴۰ و (ب)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۹ در مقاطع (پ)۴۰ و (ت)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۸ در مقاطع (ث)۴۰ و (چ)۵۰ درجه و U/U_c=۰/۷ در مقاطع (ج)۴۰ و (ح)۵۰ درجه

نتایج و بحث

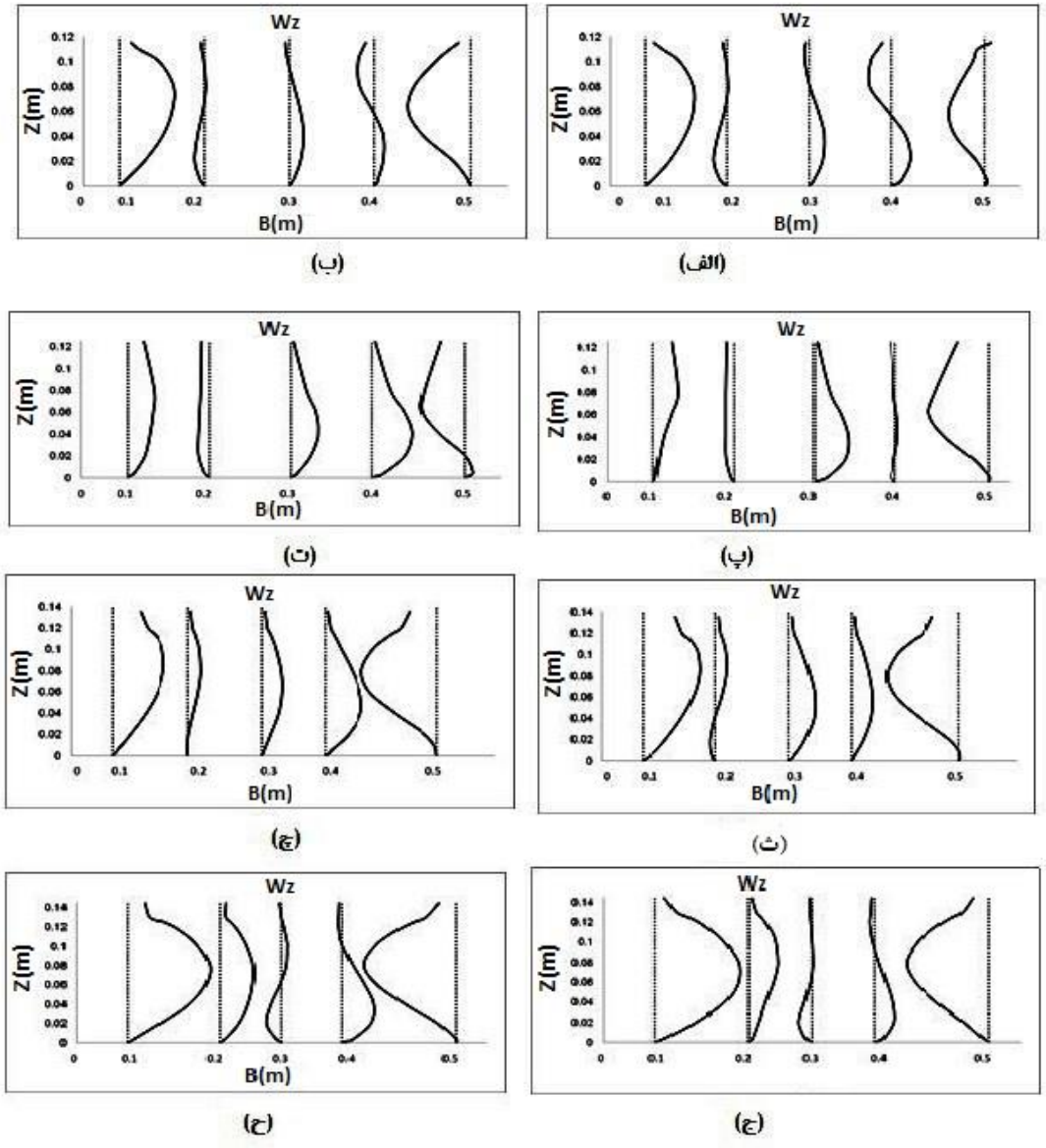
در شکل ۲ تغییرات سرعت شعاعی U_r بر حسب متر بر ثانیه برای U/U_cهای مختلف در مقاطع ۴۰ و ۵۰ درجه قوس نشان داده شده است که در آن z راستای قائم بر حسب متر و B راستای شعاعی است که از قوس داخلی اندازه گیری می شود و بر حسب متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می شود در نزدیک بستر در مقاطع مختلف جهت سرعت به سمت قوس داخلی و در سطح آب بسمت قوس خارجی می‌باشد که دلیل آن شکل گیری یک جریان عرضی در مقطع بوده که هسته این جریان ثانویه نزدیک به کف می‌باشد. این روند از مقطع ۴۰ درجه به ۵۰ درجه دارای روندی افزایشی می‌باشد. همچنین تطابق بین داده های آزمایشگاهی واقفی و همکاران (۱۳۸۷) و نتایج عددی در نقاط نزدیک به سطح بهتر است. همچنین با کاهش مقدار U/U_c سرعت عرضی بیشتر می گردد.

شکل (۳) نمونه‌ای از تغییرات مؤلفه طولی سرعت (U_θ) بر حسب متر بر ثانیه برای U/U_cهای مختلف در مقاطع ۴۰ و ۵۰ درجه قوس نشان داده شده است که در آن z راستای قائم بر حسب متر و B راستای شعاعی است که از قوس داخلی اندازه گیری می‌شود و بر حسب متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه به ساحل خارجی نزدیک می شود سرعت طولی افزایش می‌یابد که این پدیده بیانگر وجود سرعت بیشینه در نزدیکی قوس خارجی در مقاطع میانی می باشد این بدان معنی است که سرعت بیشینه از موقعیت حدود یک سوم قوس داخلی در مقاطع ابتدایی قوس به نزدیکی ساحل خارجی در مقاطع میانی

قوس منتقل گردیده و این موقعیت سرعت بیشینه در نزدیکی قوس خارجی در مقاطع پایانی قوس حفظ می‌گردد همچنین افزایش سرعت از تراز کف تا سطح آزاد، از توزیع شبه لگاریتمی پیروی می‌کند. مقایسه قسمت‌های مختلف شکل (۳) برای تمام حالات U/U_c بیانگر افزایش سرعت در لایه های نزدیک بستر با حرکت از قوس داخلی به سمت قوس خارجی می‌باشد و این موضوع بیانگر افزایش تنش برشی بستر در نزدیکی قوس خارجی بوده که در صورت متحرک بودن بستر، نشان دهنده وجود آبشستگی احتمالی در نزدیکی سواحل خارجی می‌باشد این پدیده با حرکت به سمت مقاطع انتهایی قوس محسوس‌تر می‌شود و نیز با نتایج آزمایشگاهی واقفی نیز هم‌خوانی دارد همچنین داده‌های سرعت طولی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی موجود در U/U_c معادل ۰/۹۸ (شکل‌های الف و ب شکل ۳) از تطابق نسبتا خوبی برخوردار می باشد.

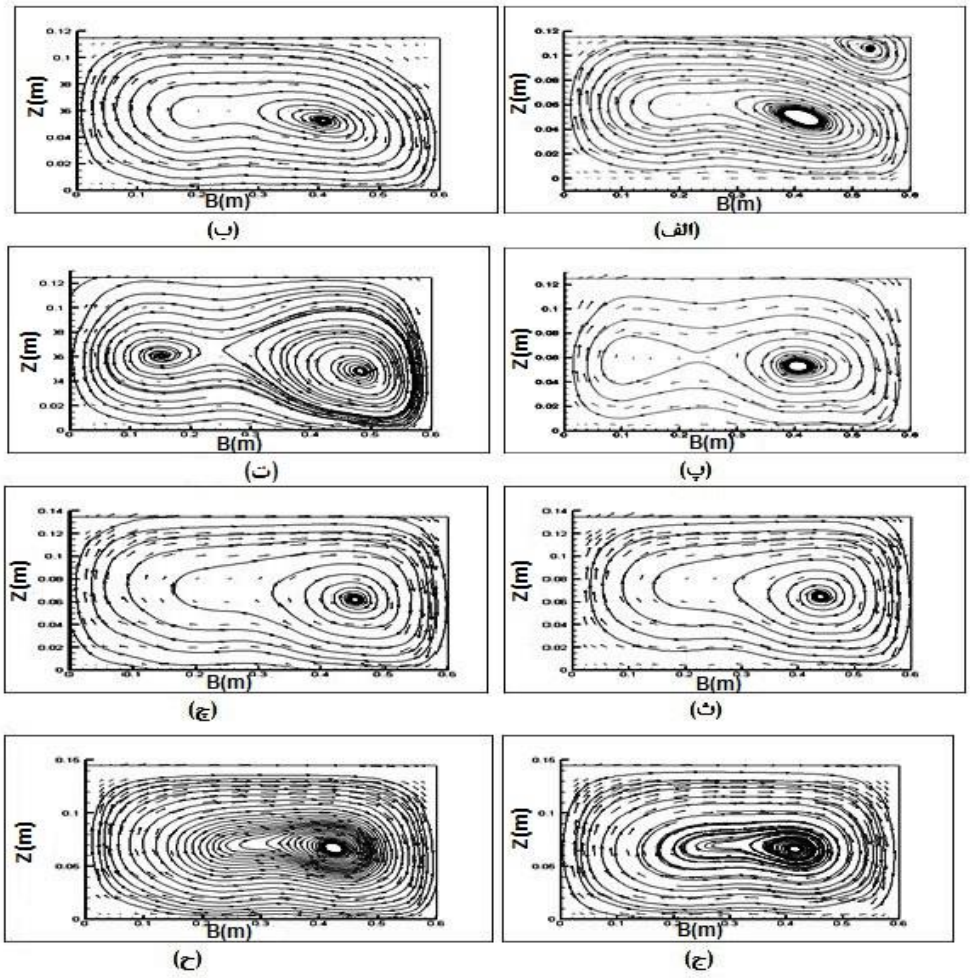


شکل ۳- نمونه ای از تغییرات سرعت طولی (U_θ) بر حسب متر بر ثانیه برای U/U_c=۰/۹۸ در مقاطع (الف)۴۰ و (ب)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۹ در مقاطع (پ)۴۰ و (ت)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۸ در مقاطع (ث)۴۰ و (چ)۵۰ درجه و U/U_c=۰/۷ در مقاطع (ج)۴۰ و (ح)۵۰ درجه



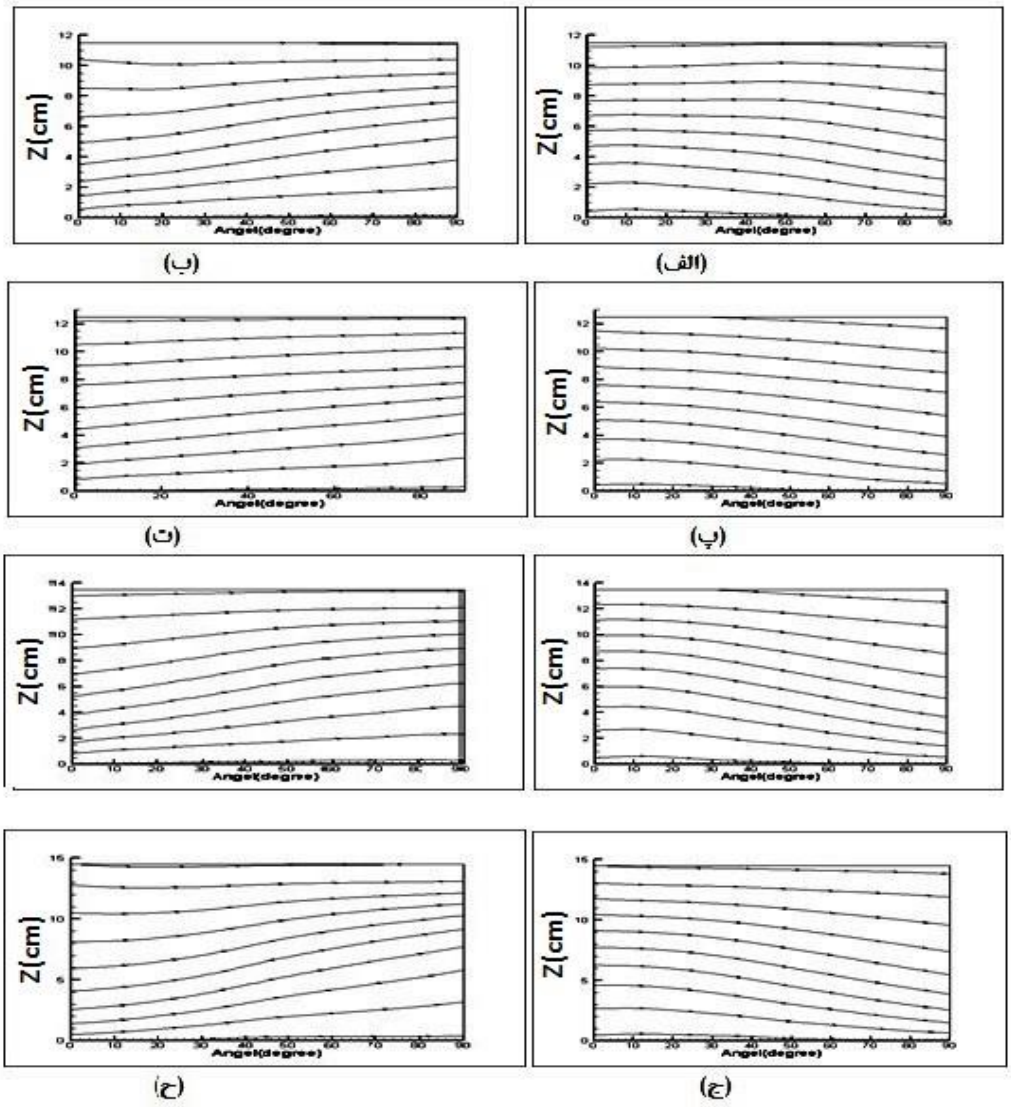
شکل ٤- نمونه ای از تغییرات سرعت عمقی (W_z) بر حسب متر بر ثانیه U/U_c=۰/۹۸ در مقاطع (الف)٤۰ و (ب)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۹ در مقاطع (پ)٤۰ و (ت)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۸ در مقاطع (ث)٤۰ و (چ)۵۰ درجه و U/U_c=۰/۷ در مقاطع (ج)٤۰ و (ح)۵۰ درجه

شکل (۴) نمونه ای ازتغییرات سرعت عمقی (W_z) بر حسب متر بر ثانیه برای U/U_cهای مختلف در مقاطع ۴۰ و۵۰ درجه را نشان می دهد. تغییر علامت در توزیع قائم مولفه عرضی سرعت مؤید وجود جریان ثانویه در مقطع می باشد. همان‌طور که مشاهده می شود، برای U/U_cهای مختلف در نزدیکی قوس خارجی جریان رو به پایین و در نزدیکی قوس داخلی نیز جریان رو به بالا حاکم است که این پدیده با الگوی جریان ثانویه در قوس‌ها همخوانی دارد و باعث فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی و در مقاطع پایین دست می گردد. در مقاطعی که در نزدیکی قوس داخلی جریان رو به پایین (۰/۲ متر) و در نزیکی قوس خارجی جریان رو به بالا (۰/۳ و ۰/۴ متر) می باشد نشان دهنده وجود گرابه‌ای دیگر یعنی ایجاد دو گردابه در مقطع می باشد.



شکل ۵- نمونه ای از بردارهای سرعت و خطوط جریان برای U/U_c=۰/۹۸ در مقاطع (الف)۴۰ و (ب)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۹ در مقاطع (پ)۴۰ و (ت)۵۰ درجه، U/U_c=۰/۸ در مقاطع (ث)۴۰ و (چ)۵۰ درجه و U/U_c=۰/۷ در مقاطع (ج)۴۰ و (ح)۵۰ درجه

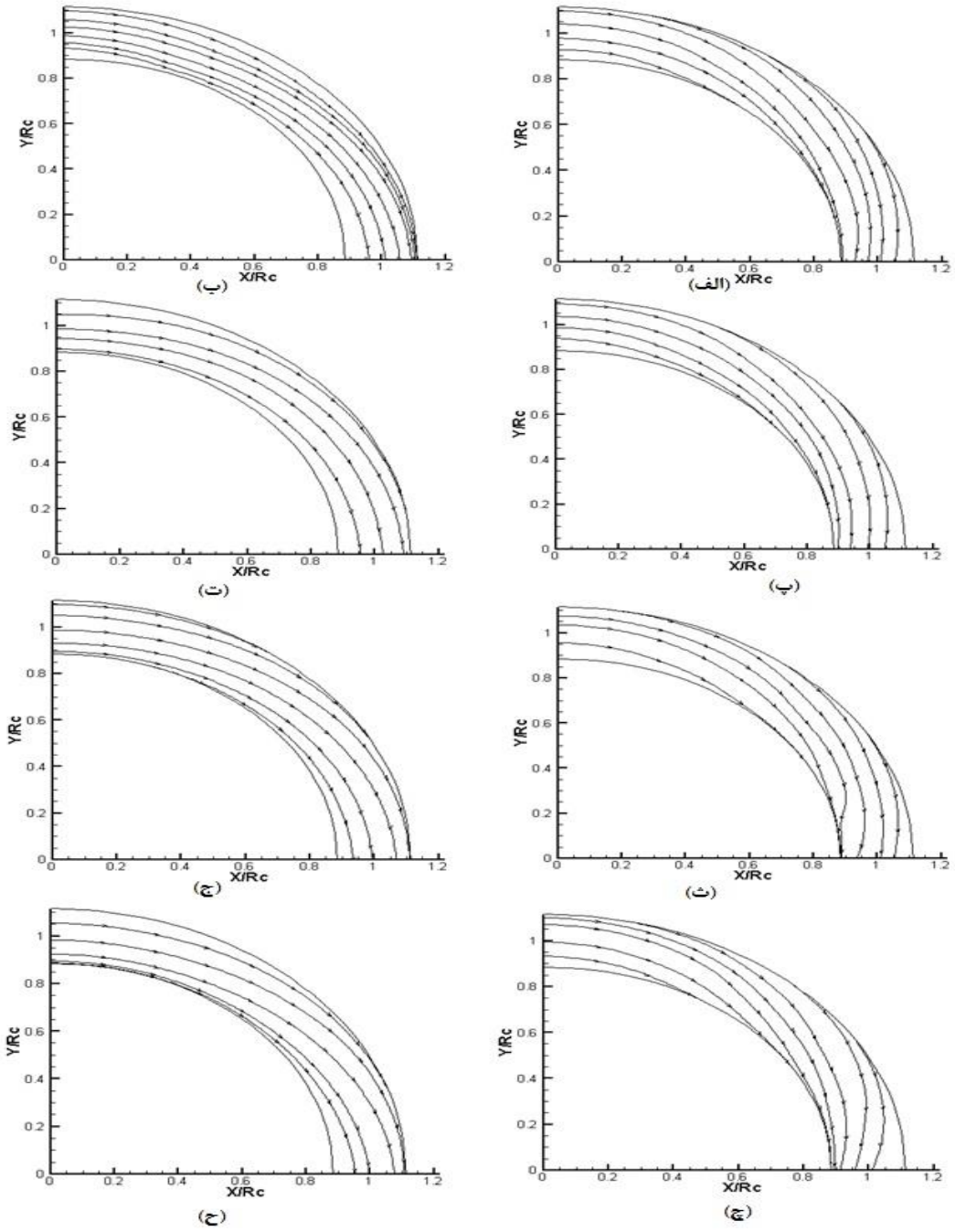
در شکل (۵) نمونه‌ای از بردارهای سرعت و خطوط جریان برای U/U_cهای مختلف در مقاطع ۴۰ و۵۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ورود جریان به قوس ذرات سیال تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز قرار می‌گیرند و با توجه به اینکه سرعت جریان در سطح آب بیشتر از کف می‌باشد، ذرات در سطح آب، تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز بیشتری قرار می‌گیرند. همچنین نیروی گریز از مرکز موجود در خم باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود به طوری که سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می‌شود. این پدیده باعث گرادیان فشار جانبی در قوس خواهد شد. بنابراین در هر موقعیت از عمق، دو نیرو بر ذره وارد می‌گردد. نیروی ناشی از گرادیان فشار که سعی دارد تا ذره را به سمت قوس داخلی حرکت دهد و نیروی ناشی از شتاب گریز از مرکز که تمایل به حرکت ذره به سمت قوس خارجی دارد. گرادیان فشار در کف بر نیروی گریز از مرکز غلبه می‌کند و در نتیجه باعث انتقال رسوب از قوس خارجی به سمت قوس داخلی در صورت متحرک بودن بستر می‌شود. در میانه عمق جریان برای تمامی نسبت‌های U/Uc، وجود هسته مرکزی گردابه شکل گرفته در نزدیکی ساحل خارجی (یک سوم خارجی عرض مقطع) مشهود بوده که بیانگر تاثیر قوس بر جریان است. البته در مقاطع ابتدایی قوس (تا حدود ۳۰ درجه جریان ثانویه کامل مانند قسمت‌های مختلف شکل (۵) مشاهده نمی‌گردد همچنین در مقاطع انتهایی قوس نیز از شدت و قدرت جریات ثانویه کاسته شده و جریان تحت تاثیر مسیر مستقیم پایین دست قرار می‌گیرد. در شکل (۵-الف) برای حالت U/Uc معادل با ۰/۹۸، همانطور که مشاهده می‌شود با ورود جریان کانال و افزایش سرعت به دلیل ورود به قوس، در زاویه ۴۰ درجه در قوس خارجی در سطح آب، گردابه‌ای کوچک بوجود آمده است که می‌تواند به دلیل برخورد آب به دیواره و به وجود آمدن جریات ثانویه در محلی که سرعت جریان به بیشینه مقدار خود می‌رسد رخ داده باشد.



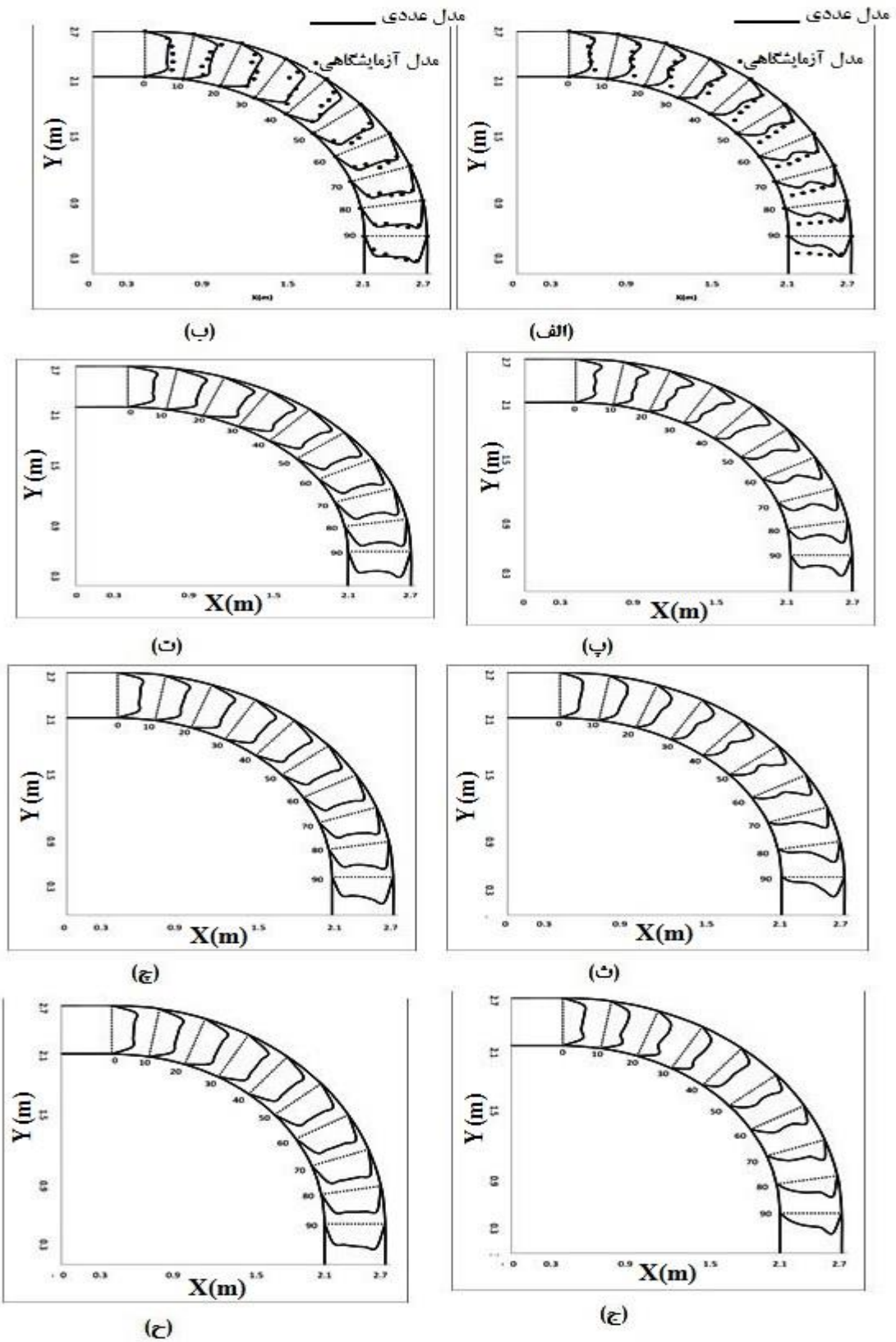
شکل ٦- نمونه ای از خطوط جریان طولی برای U/U_c=۰/۹۸ به فاصله (الف) پنج درصد و (ب)۹۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی، U/U_c=۰/۹ به فاصله (پ) پنج درصد و (ت) ۹۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی، U/U_c=۰/۸ به فاصله (ث) پنج درصد و (چ) ۹۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی و U/U_c=۰/۷ به فاصله (ج) پنج درصد و (ح) ۹۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی

در شکل (۶) نمونه ای از خطوط جریان طولی برای U/U_cهای مختلف به فاصله پنج درصد و ۹۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی را نشان می‌دهد. با ورود جریان به قوس الگوی جریان به علت پیدایش و رشد جریان ثانویه دچار تغییراتی خواهد شد. جریان ثانویه شکل گرفته نیز تأثیر متقابلی بر روی الگوی جریان خواهد داشت. در نتیجه پروفیل‌های سرعت در طول کانال‌های قوسی شکل نسبت به پروفیل‌های سرعت در مسیر مستقیم دچار تغییراتی خواهند شد. در مسیرهای مستقیم در لایه نزدیک به جداره به علت وجود دیواره و شرط عدم لغزش انتظار می‌رود که سرعت کم باشد به تدریج با دور شدن از مرز دیواره، سرعت سیال رو به افزایش خواهد گذاشت و این روند افزایشی تا سطح آب ادامه خواهد داشت البته در سطح آب به علت وجود اصطکاک جریان با هوا اندکی از سرعت جریان کاسته خواهد شد بنابراین می‌توان انتظار داشت که در مسیرهای مستقیم پروفیل سرعت به شکل لگاریتمی باشد. در مسیرهای قوسی شکل به علت خاصیت سه بعدی الگوی جریان و وجود جریان‌های عرضی و رشد جریان ثانویه پروفیل‌های سرعت دچار تغییراتی خواهند شد. با پیشروی در قوس حداکثر سرعت به سمت لایه های پایین‌تر حرکت خواهد کرد حرکت حداکثر سرعت به سمت لایه های پایین‌تر در اثر ایجاد جریان حلزونی شکل و تاثیر آن بر روی جریان اصلی خواهد بود. برای U/U_cهای مختلف، همان‌طور که از قسمت‌هایی از شکل (۶) که مربوط به مقاطع نزدیک قوس

خارجی می‌باشد، مشاهده می گردد خطوط جریان عمدتاً جهت رو به پایین دارد و در مقاطع نزدیک قوس داخلی خطوط جریان رو به بالا می‌باشد که این پدیده بواسطه تشکیل جریان حلزونی گفته شده می‌باشد. همچنین همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب خطوط جریان در حد فاصل بین ۴۰ تا ۸۰ درجه از مقدار بیشتری برخوردار بوده که با محدوده جریان ثانویه قوی شکل گرفته در قوس هم‌خوانی دارد.



شکل ۷- نمونه ای از الگوی جریان در پلان برای U/U_c=۰/۹۸ در پلان(الف) نزدیک بستر و (ب) نزدیک سطح آب، U/U_c=۰/۹ در پلان (پ) نزدیک بستر و (ت) نزدیک سطح آب، U/U_c=۰/۸ در پلان (ث) نزدیک بستر و (چ) نزدیک سطح آب و U/U_c=۰/۷ در پلان (ج) نزدیک بستر و (ح) نزدیک سطح آب



شکل ۸- نمونه ای از سرعت های جریان بر حسب متر بر ثانیه برای U/U_c=۰/۹۸ در پلان (الف) نزدیک بستر و (ب) نزدیک سطح آب، U/U_c=۰/۹ در پلان (پ) نزدیک بستر و (ت) نزدیک سطح آب، U/U_c=۰/۸ در پلان (ث) نزدیک بستر و (چ) نزدیک سطح آب و U/U_c=۰/۷ در صفحه (ج) نزدیک بستر و (ح) نزدیک سطح آب

شکل (۷) نمونه ای از الگوی جریان در پلان برای U/U_cهای مختلف در پلان‌های نزدیک بستر و نزدیک سطح آب را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می شود در نزدیکی بستر خطوط جریان در قوس به سمت جداره داخلی کانال منحرف گردیده و خطوط جریانی که از ساحل داخلی تا وسط کانال وارد قوس می‌شوند در حدود زاویه ۳۰ درجه به دیواره داخلی برخورد می نمایند. در پلان‌های نزدیک بستر، خطوط جریان از انحنای قوس پیروی ننموده و خطوط جریان حالت مورب دارند و همچنین مسیر حرکت ذرات نزدیک بستر در امتداد شعاع قوس نمی‌باشد همچنین در قسمت‌های انتهایی قوس خطوط جریان تحت تاثیر مسیر مستقیم پایین دست قرار می‌گیرد. در پلان‌های نزدیک سطح آب همانگونه که دیده می‌شود خطوط جریان به سمت دیواره بیرونی کانال منحرف می‌شود به شکلی که خطوط جریانی که از بالا دست و از کناره دیواره داخلی شروع به حرکت کرده‌اند، در پایین‌دست به جداره خارجی برخورد می‌کنند که با مفهوم جریان حلزونی همخوانی دارند. نکته قابل توجه در خطوط جریان در پلان‌های نزدیک سطح آب، در مقایسه با پلان‌های نزدیک بستر این هست که میزان انحراف خطوط جریان در مقطع ورودی قوس در صفحه نزدیک بستر بیشتر از ترازهای بالایی می‌باشد. علت این امر وجود جریان یک‌طرفه به سمت دیواره داخلی و کامل نشدن جریان ثانویه می‌باشد. همچنین با کاهش پارامتر U/U_c میزان انحراف خطوط جریان نسبت به افق کمتر می‌گردد (به‌عنوان نمونه مقایسه شکل (۷-الف) با شکل (۷-ج) و یا مقایسه شکل (۷-ب) با شکل (۷-ح)) که علت آن این است که با کاهش سرعت جریان، خطوط جریان کمتر تحت تاثیر قوس قرار می‌گیرند و جریان ثانویه و در نتیجه جریان حلزونی از قدرت کمتری برخوردار خواهد بود.

در شکل (۸) نمونه‌ای از سرعت های جریان بر حسب متر بر ثانیه در U/U_cهای مختلف و در پلان‌های نزدیک بستر و نزدیک سطح آب با دبی ثابت ۲۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. بررسی تغییرات سرعت در طول کانال در شکل (۸) بیانگر این است که در مقاطع ورودی، حداکثر سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود. با قدرت یافتن جریان ثانویه و شکل‌گیری جریان حلزونی در مقطع بعد از ۱۰ درجه، حداکثر سرعت از جداره داخلی فاصله گرفته و به سمت میانه کانال منحرف می‌گردد. این روند تا جایی ادامه می یابد که جریان ثانویه بر گرادیان طولی فشار غلبه نماید. در شکل (۸) این پدیده در مقطع بین ۳۰ تا ۴۰ درجه رخ می‌دهد. در این مقطع جریان ثانویه با غلبه بر گرادیان طولی فشار، حداکثر سرعت در مقاطع را به سمت جداره خارجی کانال منتقل می‌کند. در شکل (۸) به خوبی قابل مشاهده است که در مقطع حدود ۵۰ تا ۹۰ درجه خط حداکثر سرعت در جدار خارجی کانال قرار گرفته و تا انتهای کانال تقریبا روند ثابتی را طی می کند و علت این امر این است که پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی واقع در نیمه دوم قوس توسعه یافته و سرعت‌های بین دو مقطع تغییر چندانی ندارد. در هنگام خروج از قوس، تغییرات گرادیان طولی فشار برعکس ورودی آن هست. در جداره خارجی، گرادیان طولی منفی بوده لذا سرعت سیال افزایش یافته و در جداره داخلی گرادیان طولی مثبت و لذا سرعت سیال کاهش می‌یابد. در اینجا بر خلاف قوس، تأثیر ناشی از گرادیان طولی فشار با تأثیر ناشی از جریان ثانویه که همچنان حداکثر سرعت را در سطح آب به سمت جداره خارجی کانال منتقل می‌کند، در یک سو قرار گرفته و مسیر حداکثر سرعت در جداره خارجی کانال باقی می‌ماند. البته افزایش میزان سرعت با حفظ روند ذکر شده از کف به سطح آب مشهود می‌باشد. همچنین تطابق مناسب بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی در U/U_c معادل ۰/۹۸ خصوصا در ترازهای بالا و نزدیک سطح آب مشهود است در تراز نزدیک بستر (شکل (۸-الف)) نیز به‌دلیل دقت کمتر در برداشت داده‌ها در آزمایشگاه و ناشی از ثابت نبودن تراز ۵ میلیمتر از کف بستر، اختلافی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی خصوصا در نیمه دوم قوس مشاهده می‌گردد.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر پارامتر U/U_c بر الگوی جریان پرداخته شده که اهم نتایج به شرح زیر است:

- با بررسی سرعت عرضی جریان در مقاطع نزدیک به میانه قوس (مقاطع عرضی ۴۰ و ۵۰ درجه)، مشاهده می شود که با کاهش مقدار U/Uc سرعت عرضی جریان افزایش می‌یابد که این روند از مقطع عرضی ۴۰ درجه به ۵۰ درجه دارای روندی افزایشی می باشد.
- برای تمامی نسبت های U/Uc مورد مطالعه، افزایش سرعت مماسی در لایه های نزدیک بستر با حرکت از قوس داخلی به سمت قوس خارجی می باشد که این موضوع بیانگر افزایش تنش برشی بستر در نزدیکی قوس خارجی و همچنین آبشستگی بیشتر در صورت متحرک بودن بستر می باشد.
- در میانه عمق جریان برای تمامی نسبت های U/Uc، وجود هسته مرکزی گردابه شکل گرفته در نزدیکی ساحل خارجی (یک سوم خارجی عرض مقطع) مشهود بوده که بیانگر تاثیر قوس بر جریان است.
- در مقطع عرضی ۴۰ درجه در نزدیکی دیواره خارجی در سطح آب، گردابه پادساعتگرد کوچکی برای حالت U/Uc معادل با ۰/۹۸ بوجود آمده است. در حالی که برای بقیه نسبت های همچین گردابه ای تشکیل نشده است.
- بررسی تغییرات سرعت در پلان های مختلف برای حالات متفاوت U/Uc نشان داد که محل وقوع حداکثر سرعت در ۳۰ درجه اول، در نیمه داخلی مقطع اتفاق می‌افتد و پس از حدود زاویه ۴۰ درجه به تدریج به سمت جداره خارجی کانال جابجا شده و تا پایان تقریباً در همین محل باقی می‌ماند.

- بررسی خطوط جریان در ترازهای مختلف عمقی در حالت‌های مختلف U/Uc در کانال نشان داد که در تراز نزدیک بستر خطوط جریان به سمت جداره داخلی متمایل شده و در تراز نزدیک سطح آب خطوط جریان به سمت جداره خارجی متمایل می شوند که مفهوم جریان ثانویه در قوس را بیان می کند.
- تفاوت خطوط جریان در پلان های نزدیک سطح آب، در مقایسه با پلان‌های نزدیک بستر این است که میزان انحراف خطوط جریان در مقطع ورودی قوس در صفحه نزدیک بستر بیشتر از ترازهای بالایی می باشد. همچنین با کاهش پارامتر U/Uc میزان انحراف خطوط جریان نسبت به افق کمتر می گردد.
- برای تمامی U/Uc نسبت های در مقطع حدود ۵۰ تا ۹۰ درجه خط حداکثر سرعت در جدار خارجی کانال قرار گرفته و تا انتهای کانال تقریباً روند ثابتی را طی می کند.
- مدل آزمایشگاهی و مدل عددی از نظر کمی و کیفی تشابه نسبتاً خوبی دارند یعنی هم از نظر موقعیت و هم از نظر مقدار سرعت در جهات مختلف روند مشابهی را دنبال می‌کنند.

منابع

۱- پیرستانی، م. ر. ۱۳۸۲. مطالعه الگوی جریان و آبشستگی در آبگیرجانبی ورودی قوس. رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی.

۲- دهقانی، ا.، قدسیان، م.، صالحی نیشابوری، ع.ا. و م. شفیعی فر. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات بستر کانال های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه. نشریه هیدرولیک ایران، ۱: ۱۶-۱.

۳- فضلی، م.، قدسیان، م. و ع. ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۸. تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه در شرایط مختلف جریان. فصلنامه فنی و مهندسی مدرس، ۳۵: ۱۴۲-۱۲۳.

۴- واقفی، م.، قدسیان، و ع. ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۷. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آبشستگی درقوس ۹۰ درجه. مجله علمی و پژوهشی هیدرولیک ایران، ۳(۳): ۵۷-۴۱.

5- Bergs, M.A. 1990. Flow processes in a curved alluvial channel. Ph.D. Thesis, Iowa University, USA, pp. 124-130.

6- Blanckaert, K. 2002. Modeling of secondary flow structure in river bends. River Flow 2002, Bousmar and Zech (eds.), pp. 127-133.

7- Blanckaert, K. and W. H. Graf. 2004. Momentum transport in sharp open-channel bends. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 130(3): 186-198.

8- Damaskinidou-Georgiadou, A. and K. V. Smith. 1986. Flow in curved converging channel. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 112(6): 476-495.

9- De Vriend, H. J. and H. J. Geldof. 1983. Main flow velocity in short river bends. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 109(7): 991-1011.

10- Ghodsian, M. and S. K. Mousavi. 2006. Experimental study on bed scour in a 90° channel bend. International Journal of Sediment Research, 21(4): 321-328.

11- Ippen, A. T. and P. A. Drinker. 1962. Boundary shear stress in curved trapezoidal channels. Journal of Hydraulic Division, 88(5): 143-180.

12- Jung, J. W. and S. E. Yoon. 2000. Flow and bed topography in a 180-degree curved channel. 4th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Korea Water Resources Association, pp. 12-19.

13- Leschziner, M.A. and W. Rodi. 1979. Calculation of strongly curved open channel flow. Journal of the Hydraulics Division (ASCE), 105(10): 1297-1314.

14- Liaghat, A. Mohammadi, K. and M. Rahmanshahi. 2014. 3D Investigation of flow hydraulic in U shape meander bends with constant, decreasing and increasing width. Journal of River Engineering, 2(3): 12-23.

15- Lien, H. C., Hsieh, T. Y., Yang, J. C. and K. C. Yeh. 1999. Bend-flow simulation using 2D depth-averaged model. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 125(10): 1097-1108.

16- Mockmore, C.A. 1943. Flow around bends in stable channels. Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), 109: 593-628.

17- Naji Abhari, M. Ghodsian, M., Vaghefi, M., and Panahpur, N. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90o bend. Flow Measurement and Instrumentation, 21(3): 292-298.

18- Rozovskii, I. L. 1957. Flow of water in bends of open channels. Published by the academy of Sci. Ukrainian SSR, Kiev.

19- Ruther, N. and N. Olsen. 2005. Three dimensional modeling of sediment transport in a narrow 90 channel bend. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 131(10): 917–920.

20- Shams, M., Ahmadi, G. and Smith, D. H. 2002. Computational modeling of flow and sediment transport and deposition in meandering rivers. Advanced in Water Resources, 25(6): 689-699.

21- Shukry, A. 1950. Flow around bends in stable channels. Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), 115(1): 751-779.

22- Sui, J., Fang, D. and B. W. Karney. 2006. An experimental study into local scour in a channel caused by a 90 bend. Canadian Journal of Civil Engineering, 33(7): 902-911.

23- Wu, W., Rodi, W. and T. Wenka. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 126(1): 4-15.

24- Yang, S. Q. 2005. Interactions of boundary shear stress, secondary currents and velocity. Fluid Dynamics Research, 36: 121-136.

25- Zeng, J., Constantinescu, G., Blanckeart, K. and L. Weber. 2008. Flow and bathymetry in sharp open-channel bends: Experiments and predictions. Water Resources Research, 44(9): 9401-9422.