

# مطالعه ساختار جریان آشفته و بررسی کیفی مکانیسم ورود رسوب به آبگیر جانبی واقع در قوس رودخانه با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی

اکبر صفرزاده گندشمین

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

Safar zad@modares.ac.ir

**چکیده-** در این مقاله، الگوی جریان سه بعدی در حالت آشفته برای آبگیری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه با استفاده از مدل آشفتگی RSM در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی شده و روش VOF برای شبیه سازی روند تغییرات سطح آب در محل تقاطع و داخل آبگیر به کار رفته است. مدل آشفتگی و روش مزبور ضمن پیش بینی مناسب توزیع سرعت در داخل میدان، تغییرات ایجاد شده در سطح آب را نیز به خوبی پیش بینی می کند. نتایج نشان داد که در آبگیری از قوس رودخانه علاوه بر ناحیه چرخشی داخل آبگیر (مشابه آبگیری از مسیر مستقیم)، یک ناحیه سکون در داخل کانال اصلی و در نزدیکی جدار داخلی قوس، در فاصله کوتاهی پس از دهانه ورودی آبگیر، به دلیل جریان شدید عرضی تشکیل می شود. الگوی جریان داخل آبگیر به صورتی است که ناحیه چرخشی و جریان های مورب نزدیک بستر، باعث ایجاد ناحیه ای گوه شکل در دهانه آبگیر می شوند. مقایسه این پدیده با نتایج آزمایشگاهی محققین قبلی نشان داد که ناحیه مزبور به طور مشخص توسط ذرات رسوب بستر (در مدل آزمایشگاهی) تشکیل گوه ای مثلثی شکل داده و باعث تجمع رسوبها در دهانه آبگیر می شوند. موقعیت نسبی خطوط تقسیم جریان های سطحی و تحتانی در آبگیری از قوس کاملاً با حالت آبگیری از مسیر مستقیم متفاوت بوده و تفاوت مزبور، نقش جریان ثانویه ناشی از قوس را در کنترل رسوب ورودی از طریق جریان های تحتانی به داخل آبگیر به خوبی نشان می دهد.

**کلیدواژگان:** آبگیر جانبی، قوس رودخانه، جریان آشفته، جریان ثانویه، شبیه سازی عددی، نرم افزار فلوئنت.

## ۱- مقدمه

رودخانه است. انحراف آب از مسیر اصلی برای مقاصد مختلفی مانند کشاورزی، آبرسانی شهری، تولید برق و غیره به کمک آبگیرها صورت می گیرد. آبگیری از

رودخانه فراهم کننده آب و انرژی برای طبیعت و انسان است و می توان گفت تأمین آب مهمترین نقش اقتصادی

رودخانه با استفاده از نیروی ثقل که در گذشته به شکل شاخه نهر صورت می‌گرفته، اکنون به سازه هیدرولیکی تکامل یافته‌ای با معیارهای طراحی ویژه آن تبدیل شده است. با توجه به اینکه جریان رودخانه شامل رسوبهای ریز و درشت بوده و در مواقع سیلابی، رژیم رودخانه دستخوش تغییرات ناشی از جابه‌جایی رسوب خواهد شد، لذا در این آبگیرها، دهانه ورودی باید دو وظیفه مهم زیر را انجام دهد:

- جذب و کنترل جریان منحرف شده از رودخانه و هدایت آن به داخل کانال آبگیری (تأمین دبی جریان مورد نیاز).

- جلوگیری از ورود رسوبها و اجسام شناور به داخل آبگیر (کاهش میزان رسوب ورودی).

لذا از نکات مهم در طراحی آبگیر واقع در رودخانه‌ها آن است که شرایطی انتخاب شود که آب منحرف شده توسط آبگیر، دارای حداکثر دبی جریان و حداقل دبی رسوب باشد، زیرا ورود رسوب به آبگیرها و در نتیجه شبکه‌های انتقال باعث می‌شود که رسوبهای منتقل شده به دلیل سرعت کمتر جریان در محدوده این سازه‌ها در مقایسه با رودخانه، همچنین جریان‌های گردابه‌ای حاصل از انحراف جریان به داخل آبگیر، خصوصاً در شبکه‌های آبیاری و پشت تأسیسات کنترل و تنظیم سطح آب، منجر به رسوبگذاری در محدوده آنها شود. ساده‌ترین راه انحراف جریان از رودخانه، ایجاد انشعاب ۹۰ درجه از بازه مستقیم آن است. چنین سیستمی با وجود سادگی در نحوه انحراف جریان رودخانه، باعث شکل‌گیری الگوهای جریان پیچیده‌ای می‌شود، به طوری که بر اثر تشکیل جریان‌های ثانویه و نواحی چرخشی و جدائی جریان، علاوه بر کاهش ظرفیت آبگذری سیستم آبگیر، به دلیل جاروی رسوبهای دهانه توسط جریان‌های ثانویه و برگشتی، مصالح ورودی به داخل آبگیر، باعث وارد شدن

خسارت و صدمه به تأسیسات پائین‌دست کانال انحرافی (نظیر توربین نیروگاه) می‌شود. از این رو بشر از زمانهای قدیم و همزمان با استفاده از آب رودخانه، به دنبال راههای تقلیل ورود رسوبها به سیستم و نیز افزایش کارایی آبگیری بوده و با انجام اقدامات سازه‌ای و نیز با استفاده از شرایط طبیعی جریان در رودخانه‌ها در صدد بهبود آن بوده است. استفاده از سازه‌های انحراف و دفع رسوب، طراحی مناسب شکل آبگیر و جانمایی آن در قوس خارجی پیچ رودخانه، نمونه‌هایی از این اقدامات است. قوس رودخانه به دلیل داشتن الگوی جریان ویژه‌ای به نام جریان حلزونی، همواره مورد توجه مهندسان هیدرولیک بوده است. نیروی گریز از مرکز موجود در خم باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود که ارتفاع آب را در قوس بیرونی افزایش و در قوس داخلی کاهش می‌دهد. بر اثر این پدیده، جریانی در جهت عرضی داخل مقطع شکل می‌گیرد که به جریان ثانویه موسوم است. بر اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیر یکنواخت سرعت طولی، الگوی جریان خاصی به نام جریان حلزونی تشکیل می‌شود که باعث تغییرات زیادی در الگوی جریان قوس نسبت به جریان در کانال مستقیم می‌شود. جریان ثانویه با انتقال جانبی مومتم طولی باعث می‌شود که محل وقوع حداکثر سرعت به طرف دیوار بیرونی منتقل شود. الگوی جریان حاصل در قوس طوری است که ذرات در سطح آب (جریان فاقد رسوب) به طرف دیوار بیرونی منتقل شده و رسوبهای بستر به طرف دیوار داخلی جابه‌جا می‌شوند. این پدیده باعث ایجاد محل مناسبی برای احداث آبگیر در قوس بیرونی می‌شود، به طوری که به علت جریان حلزونی، تغذیه آبگیر از سطوح فوقانی آب که حداقل رسوب را دارد انجام شده و رسوبهای موجود در بستر به طرف دیوار داخلی جابه‌جا می‌شوند. نکته مهم

فرود در کانال اصلی و آبگیر و نسبت دبی کانال انشعاب به دبی در کانال اصلی به عنوان پارامترهای هیدرولیکی اشاره کرد. جدول ۱ پیشینه تحقیقات در این زمینه را نشان می‌دهد. با توجه به پیشینه موجود، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه شبیه‌سازی عددی الگوی سه‌بعدی جریان در آبگیری جانبی از قوس رودخانه و بررسی دقیق هیدرودینامیک حاکم بر این پدیده و همچنین تحلیل ارتباط ساختار جریان با سازوکار کیفی ورود بار رسوبی بستر به آبگیر و نقش قوس در کنترل آن در داخل و خارج از کشور انجام نشده است. لذا در این تحقیق اهداف ذیل مد نظر بوده و بدین منظور شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آشفته در آبگیری جانبی از قوس رودخانه انجام شده است:

۱- شبیه‌سازی هیدرودینامیکی الگوی جریان در آبگیری جانبی از قوس رودخانه

۲- مطالعه دقیق ساختار جریان در لایه‌های نزدیک به بستر در محل سر دهانه آبگیر و تحلیل کیفی سازوکار انتقال ذرات رسوبی به داخل آبگیر بر اساس تحلیل هیدرودینامیک نزدیک بستر

۳- تحلیل تفاوت عملکرد آبگیر در قوس نسبت به آبگیری از مسیر مستقیم

۴- بررسی نواحی محتمل آبستگي و رسوبگذاری بر اثر احداث سیستم آبگیر جانبی در بازه قوسی رودخانه بر اساس مطالعه الگوی توزیع تنش برشی بستر در ادامه ضمن بیان مبانی نظری شبیه‌سازی عددی، به بحث و بررسی نتایج حاصل پرداخته شده است.

### ۳- مبانی نظری

معادلات مورد استفاده عبارتند از معادلات پیوستگی (بقای جرم) و ناویر استوکس (بقای مومنتم) که به صورت معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز در حالت آشفته بیان می‌شوند.

آن است که کدام قسمت از قوس، محل مناسبتری برای آبگیری است و آبگیری تحت چه زاویه‌ای مناسب‌ترین حالت را از دیدگاه تأمین حداکثر دبی جریان و بهترین کنترل رسوب ورودی به وجود می‌آورد؟ روشن است که جواب دادن به این سؤال ساده نبوده و شرایط و پارامترهای متعددی در تعیین محل و زاویه مناسب آبگیری در قوس رودخانه مؤثر است. پیش از آنکه مسأله انتقال رسوب در چنین میدان پیچیده‌ای مطرح شود، لازم است هیدرودینامیک آن به‌طور کامل شناخته شود. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار تحلیل جریان FLUENT، برای رسیدن به درک روشنی از فیزیک حاکم بر میدان جریان ناشی از ایجاد انشعاب در قوس، ابتدا با مرور کلی ساختار جریان در انشعاب ایجاد شده در مسیر مستقیم و قوس بدون آبگیر (بر مبنای شبیه‌سازی‌های قبلی نگارندگان این مقاله)، الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه همراه با آبگیر جانبی شبیه‌سازی شده است. در ادامه، ضمن مرور پیشینه تحقیقات در این زمینه، مباحث نظری مدل‌سازی هیدرودینامیکی بیان شده و در نهایت روند شبیه‌سازی تشریح و نتایج حاصل از این تحقیق ارائه خواهد شد.

### ۲- پیشینه مطالعات

بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در بیشتر آنها، هدف اصلی کنترل رسوب ورودی به آبگیر بوده است. بیشتر این تحقیقات در زمینه آبگیری از مسیر مستقیم صورت گرفته و مطالعات زیادی در زمینه عوامل اثرگذار بر جریان ورودی به آبگیر انجام شده که از آن میان می‌توان به مطالعه زاویه آبگیری، عرض نسبی بستر، شکل و شیب طولی کانال‌های اصلی و انشعابی و نیز شکل دهانه ورودی آبگیر به عنوان پارامترهای هندسی و اعداد

جدول ۱ پیشینه مطالعات مربوط به آبنگیزی جانبی از رودخانه

محقق (یا محققین)	سال	روش تحقیق	مشخصات مدل	نتیجه اصلی حاصل از تحقیق
Taylor	1944	آزمایشگاهی، مسیر مستقیم	بستر صلب	برای نسبت دبی بین ۰ تا ۰/۴۵ و عدد فرود کانال اصلی بین ۰ تا ۰/۴ تغییرات تراز آب در مجاورت آبنگیر معادل حداکثر ۲٪ عمق پیشینه جریان در کانال است.
Karino et al.	1972	آزمایشگاهی، مسیر مستقیم	بررسی پدیده تصلب شرائین در انشعاب رگها	شباهت رفتار ذرات رسوب در کانالها و ذرات رسوب در رگها بر اثر پدیده گرفتگی رگ
Shettar & Murthy	1992	عددی، مسیر مستقیم	دوبعدی، متوسط عمقی، آشفته	اشاره به نحوه تغییرات سرعت در طول کانال و تعیین ابعاد نواحی چرخشی به ازای پارامترهای مختلف میدان
Issa & Oliveira	1994	عددی، مسیر مستقیم	سه بعدی، آشفته مدل k-ε	بهبود نتایج حاصل از مدل سه بعدی نسبت به مدل دو بعدی
Neary & Sotiropoulos	1996	عددی، مسیر مستقیم	سه بعدی، لایه ای	قابلیت مدل سه بعدی در پیش بینی دقیق ابعاد ناحیه چرخشی به دلیل پیش بینی بهتر گرادیان معکوس فشار
Barkdoll	1998	آزمایشگاهی، مسیر مستقیم	بستر صلب و بستر متحرک	اشاره به نقش اساسی جریان ثانویه در شکل گیری میدان و وقوع پدیده پایین افتادگی حداکثر سرعت در پروفیل های قائم
Neary et al.	1999	عددی، مسیر مستقیم	سه بعدی، آشفته، مدل k-ω	اشاره به قابلیت مدل آشفتهگی مورد استفاده در مدل سازی زبری بستر، وجود نقاط تکین در خطوط جریان نزدیک دیوارها
Ruether	2005	عددی، مسیر قوسی	سه بعدی، آشفته مدل k-ε	بررسی میزان تأثیر زبری بستر بر الگوی جریان و مقایسه نتایج مدل عددی SSIIM با مدل PHOENICS
خانجانی و همکاران	۱۳۷۸	آزمایشگاهی، مسیر مستقیم	بستر متحرک، دو حالت با و بدون پره مستغرق	بررسی هیدرودینامیک جریان و نیز اثر پره مستغرق در میزان کنترل رسوب. بررسی تأثیر آرایش های مختلف بر میزان کنترل رسوب. کاهش ۷۵ درصدی رسوبها در حالت آرایش متناوب پره ها
شفاعی بجمستان و نظری	۱۳۷۸	آزمایشگاهی، مسیر قوسی ۹۰ درجه	بستر متحرک	تأثیر زاویه انحراف بر میزان رسوب ورودی به آبنگیر قائم در قوس ۹۰ درجه
عباسی	۱۳۸۲	آزمایشگاهی، مسیر مستقیم	بستر متحرک	با کاهش زاویه آبنگیزی نسبت به جهت جریان، عرض محدوده گردابی کاهش می یابد، به طوری که کمترین عرض در زاویه ۴۵ درجه و بیشترین عرض در زاویه ۹۰ درجه مشاهده می شود.
پیرستانی	۱۳۸۴	آزمایشگاهی، قوس ۱۸۰°	بستر ثابت	موقعیت ۱۱۵ درجه تحت زاویه ۶۰ درجه، بهترین محل آبنگیزی
ساجدی و حبیبی	۱۳۸۴	آزمایشگاهی، مسیر مستقیم	بستر متحرک	تأثیر آرایش های مختلف صفحات مستغرق بر کنترل رسوب
ابوالقاسمی	۱۳۸۵	آزمایشگاهی، متاندر	بستر متحرک	بررسی تأثیر موقعیت مکانی آبنگیر بر میزان کنترل رسوب
دهقانی	۱۳۸۵	آزمایشگاهی، قوس ۱۸۰°	بستر متحرک	بررسی تأثیر مکانی، زاویه انحراف، عدد فرود بالادست، تأثیر آستانه و پره مستغرق بر کنترل رسوب
شفاعی بجمستان و همکاران	۱۳۸۷	عددی، مسیر مستقیم	بستر صلب، سه بعدی، مدل k-ε	استفاده از مدل عددی SSIIM2 برای شبیه سازی اثر گردشگری ورودی آبنگیر بر میزان کاهش ابعاد ناحیه جداشدگی در دو حالت آبنگیزی تحت زوایای ۵۵ و ۹۰ درجه

### ۳-۱-۱- مدل سازی آشفتگی

برای مدل سازی تنش های رینولدز و یا به بیان بهتر، بستن سیستم معادلات حاکم بر میدان، از مدل های آشفتگی استفاده می شود. در این تحقیق از دو مدل آشفتگی دو معادله ای  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  و مدل هفت معادله ای RSM بدین منظور استفاده شده و مدل مناسب برای ادامه تحقیق و به منظور مطالعه پارامتری میدان انتخاب شده است. جزئیات مدل های دو معادله ای در مراجع (Celik, 1999) و (Fluent, 1993) ارائه شده است. لذا در این مقاله فقط به تشریح مدل هفت معادله ای تنش های رینولدز پرداخته خواهد شد.

### ۳-۱-۳- مدل RSM (مدل تنش های رینولدز)

در جریان کاملاً غیر همگن و غیر ایزوتروپ (نظیر جریان سه بعدی داخل آبگیر با چرخش های افقی و داخل مقطع) برای شبیه سازی آشفتگی، به محاسبه تمامی مؤلفه های تنش رینولدز نیاز است. در این مورد چنانچه معادله انتقالی برای عبارت های نوسانی حل شود، تنش های رینولدز به طور مستقیم بدست می آیند (Celik, 1999). شکل تانسوری این معادله انتقال به صورت زیر است:

$$U_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (6)$$

در این معادله  $P_{ij}$  تانسور تولید،  $\Phi_{ij}$  تانسور فشار-کرنش،  $D_{ij}$  تانسور پخش شدگی و  $\epsilon_{ij}$  تانسور اتلاف است. این مدل به دلیل پیچیدگی معادلات ریاضی بسیار پرهزینه است، اما دقت بسیار بالایی را در حل مسائل پیچیده هیدرودینامیکی به ویژه در میدان های جریان با آشفتگی غیر همگن و غیر ایزوتروپ نشان می دهد.

### ۳-۲- حل عددی معادلات

به منظور حل میدان جریان و انجام مطالعات پارامتری بر روی مدل، از نرم افزار تحلیل جریان فلونت استفاده شده

برای سیال تراکم ناپذیر و جریان دائم در سیستم مختصات سه بعدی دکارتی، معادلات مذکور به صورت معادلات (۱) و (۲) قابل بیان است (Celik, 1999).  
بقای جرم (معادله پیوستگی):

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

بقای مومنتم:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_{x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در این معادلات  $U_i (i=1,2,3)$  مؤلفه های متوسط زمانی سرعت در سه جهت متناظر،  $P = p/\rho + 2k/3$  که در آن  $p$  فشار پیزومتریک و  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی است.  $g_{x_i}$  مؤلفه ثقل در جهت  $x_i$ ،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال و  $R_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$  تنش رینولدز است که نحوه محاسبه آن در ادامه توضیح داده خواهد شد. یکی از روش های تعیین سطح آزاد سیالات استفاده از روش جزء حجم یا VOF و حل میدان به صورت دوفازی (آب و هوا) است. در جریان های دوفازی، برای هر فاز یک معادله پیوستگی حل شده و معادله مومنتم برای دو فاز مشترک است. معادله پیوستگی در روش VOF به شکل معادله (۳) بوده و در معادله حرکت (رابطه ۲)، چگالی محلی متوسط در حجم کنترل محاسباتی بوده که توسط رابطه (۴) محاسبه می شود (Fluent Inc., 1993):

$$\frac{\partial F_n}{\partial t} + u_i \frac{\partial F_n}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\rho = \sum F_n \rho_n \quad (4)$$

در این روابط،  $F_n$  و  $\rho_n$  به ترتیب چگالی و جزء حجم سیال  $n$  ام در داخل حجم کنترل مورد نظر است. در هر سلول محاسباتی، جزء حجم تمام فازها باید شرط ارائه شده در رابطه (۵) را تأمین کنند:

$$\sum_{n=1}^m F_n = 1 \quad (5)$$

جریان‌های ثانویه در چنین میدان‌هایی و همچنین برای مقایسه با نتایج حاصل از تحقیق اخیر، فقط به قسمتی از نتایج مربوط به آگیری از مسیر مستقیم و قوس ۱۸۰ درجه بدون آگیری (نتایج حاصل از دو مرجع فوق) اشاره شده و در ادامه برای اولین بار نتایج حاصل از شبیه‌سازی سه‌بعدی سیستم همزمان کانال قوسی و سیستم آگیری ارائه می‌شود.

مطالعه موردی اول عبارت است از تقاطع T شکلی که از اتصال قائم دو کانال مستقیم با مقطع مستطیلی با نسبت عمق به عرض تقریبی ۲ تشکیل شده است. این مورد برگرفته از کار آزمایشگاهی Barkdoll در دانشگاه Iowa (حالت نسبت دبی  $Q_1/Q_2=0.31$ ) است (Barkdoll, 1997). کمیت‌های مزبور بعداً معرفی خواهند شد. فلوم مزبور دارای مقطع مستطیلی با عرض (B) ۱۵ سانتی‌متر و عمق جریان (h) ۳۱ سانتی‌متر است.

در گام بعدی، فلوم قوسی با زاویه مرکزی ( $\theta$ ) برابر ۱۸۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس - که نسبت شعاع انحنا ( $R_c$ ) به عرض (B) آن برابر ۴/۳ بود - مدل‌سازی عددی شد. مقطع عرضی این کانال، مربعی با ضلع ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد.

مدل اصلی مورد نظر در این تحقیق، سیستم همزمان قوس ۱۸۰ درجه مدل دوم همراه با کانال آگیری جانبی است که مطالعات آزمایشگاهی آن توسط پیرستانی (۱۳۸۳) انجام شده است. مشخصات این کانال در شکل ۱ نشان داده شده است.

عرض کانال آگیری برابر ۲۵ سانتی‌متر و مشخصات هیدرولیکی آن مطابق جدول ۲ است. مؤلفه‌های سرعت در مقاطع عرضی و اعماق مختلف در طول میدان با استفاده از سرعت‌سنج مغناطیسی P-ems (دو بعدی با دقت  $\pm 0.1\%$  متر بر ثانیه) و در کنار آن تغییرات عمق

است. در این بخش به معرفی این نرم‌افزار و نرم‌افزار پیش پردازنده گمبیت که برای تهیه هندسه و شبکه‌بندی میدان حل استفاده شده، پرداخته شده و روش حل معادلات تشریح خواهد شد. نرم‌افزار گمبیت برای تهیه شبکه و ساخت هندسه مسأله به کار می‌رود. در این نرم‌افزار محدوده میدان جریان تعیین شده و نحوه شبکه‌بندی میدان محاسباتی و نوع مرزهای حاکم بر میدان جریان مشخص می‌شود. نرم‌افزار استفاده شده در این تحقیق نسخه ۲/۰ بوده است. فلوننت نرم‌افزار تحلیل سه‌بعدی جریان است که از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس در تحلیل جریان استفاده می‌کند. در صورتی که جریان آشفته باشد، معادلات حاکم به معادلات رینولدز تغییر شکل یافته و از مدل‌های مختلفی برای تعیین تنش‌های رینولدز استفاده می‌شود. حل میدان جریان بر اساس انفصال معادلات به روش حجم محدود بوده و روشهای مختلف انفصال عبارت‌های انتقال معادلات توسط کاربر قابل انتخاب است. به‌منظور تزویج میدان سرعت و میدان فشار روشهای سیمپل و سیمپل سی و پیزو در برنامه موجود است. در این تحقیق از نسخه ۶/۳/۲۶ این نرم‌افزار استفاده شده است.

#### ۴- معرفی مشخصات هندسی میدانهای مورد نظر

صفرزاده و صالحی نیشابوری برای بررسی هیدرودینامیک آگیری از بازه مستقیم رودخانه، سازوکار جریان در قوس رودخانه و تأثیر ایجاد سیستم انحراف در بازه‌های مستقیم، مطالعات جامعی را به صورت شبیه‌سازی عددی پدیده‌های مزبور انجام داده‌اند (صفرزاده و صالحی نیشابوری، ۱۳۸۵ و Safarzadeh et al., 2004). در این مقاله به منظور درک کامل و سلسله‌وار پدیده‌های هیدرودینامیکی حاصل از

نیشابوری، ۱۳۸۵ و Safarzadeh et. al, 2004) ارائه شده است.

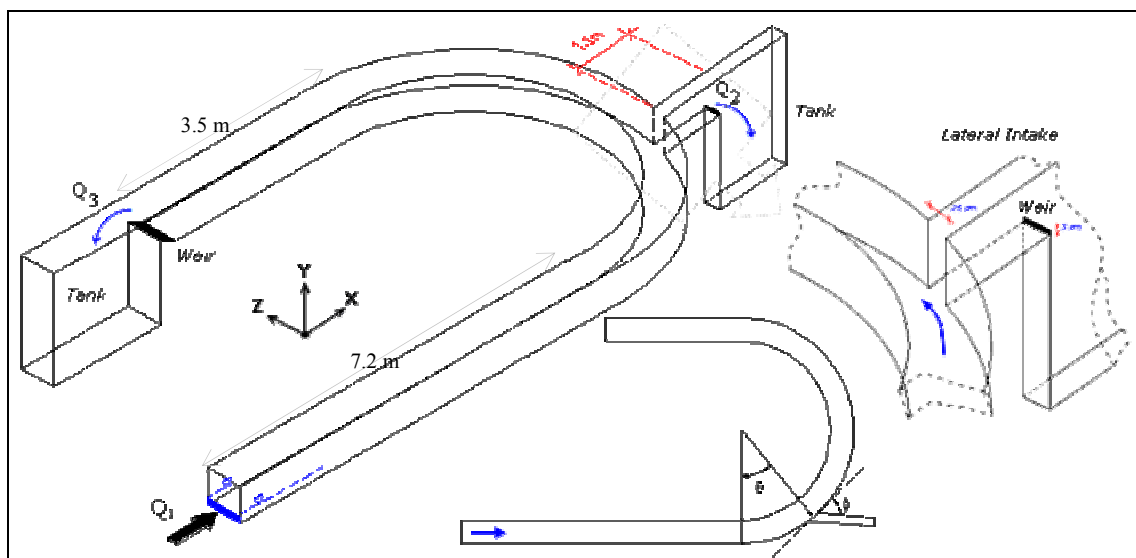
نتایج مدل‌سازی‌ها در تحقیقات مزبور نشان داده که مدل آشفتگی RSM به علت فرض نکردن لزجت گردابه‌ای هموژن و نیز شبیه‌سازی کامل تنش‌های رینولدز، میدان جریان را در حالت آبرگیری از مسیر مستقیم، بهتر از دو مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  شبیه‌سازی کرده و به خوبی نواحی چرخشی داخل میدان را پیش‌بینی می‌کند.

در شکل ۲ خطوط جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی سه بعدی با استفاده از مدل آشفتگی RSM برای نسبت دبی ۰/۳۳ ارائه شده است. نکته مهم در این شکل، وجود ناحیه چرخشی داخل آبرگیر و روند تغییرات ابعاد آن در عمق است، به طوری که ابعاد آن به سمت کف کانال کاهش می‌یابد.

جریان با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر برداشت شده است. در این تحقیق برای صحت‌سنجی هیدرودینامیکی میدان، روند تغییرات سرعت و نیز تغییرات عمق حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مزبور مقایسه شده است.

### ۵- مطالعات مقدماتی آبرگیری از مسیر مستقیم و جریان در قوس ۱۸۰ درجه

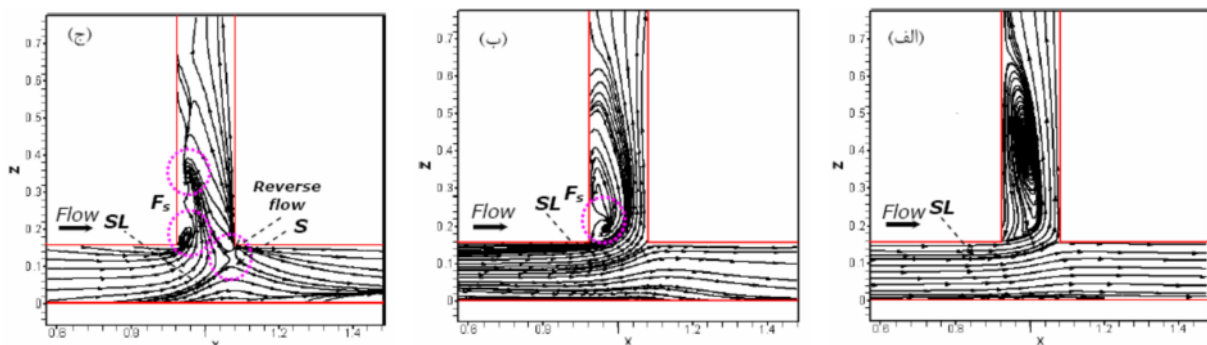
به منظور صحت‌سنجی دقیق نرم‌افزار و نیز شناخت سازوکار جریان‌های ثانویه و چرخشی ایجاد شده در میدانهای آبرگیری از مسیر مستقیم و نیز قوس ۱۸۰ درجه بدون آبرگیر، شبیه‌سازی عددی دو مورد اول بند ۴ با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی انجام و نتایج حاصل به طور دقیق تحلیل و تفسیر شده است. نتایج مبسوط و جزئیات شبیه‌سازی‌های مزبور در (صفرزاده و صالحی



شکل ۱ مشخصات مدل هیدرولیکی قوس ۱۸۰ درجه و سیستم آبرگیری فلوام آزمایشگاهی دانشگاه تربیت مدرس.

جدول ۲ دبی خروجی از کانالهای اصلی و انشعاب و عمق آب در انتهای کانال اصلی (پیرستانی، ۱۳۸۳).

عمق آب در انتهای کانال اصلی ( $H_3$ ) (m)	دبی خروجی از کانال جانبی ( $Q_3$ ) (Lit/s)	دبی خروجی از کانال اصلی ( $Q_2$ ) (Lit/s)	دبی کل ( $Q_1$ ) (Lit/s)	زاویه آبگیری $\phi$ (درجه)	زاویه استقرار $\theta$ (درجه)
۰/۱۵	۱۲/۴۶	۳۲/۵۴	۴۵	۴۵	۴۰
۰/۱۵	۱۲/۲۵	۳۲/۷۵	۴۵	۴۵	۱۱۵



شکل ۲ خطوط جریان در آبگیری از مسیر مستقیم برای نسبت دبی (الف - ۰/۳۱) نزدیک سطح آب؛ (ب) عمق میانی کانال و (ج)

نزدیک بستر کانال با استفاده از مدل آشفتگی RSM

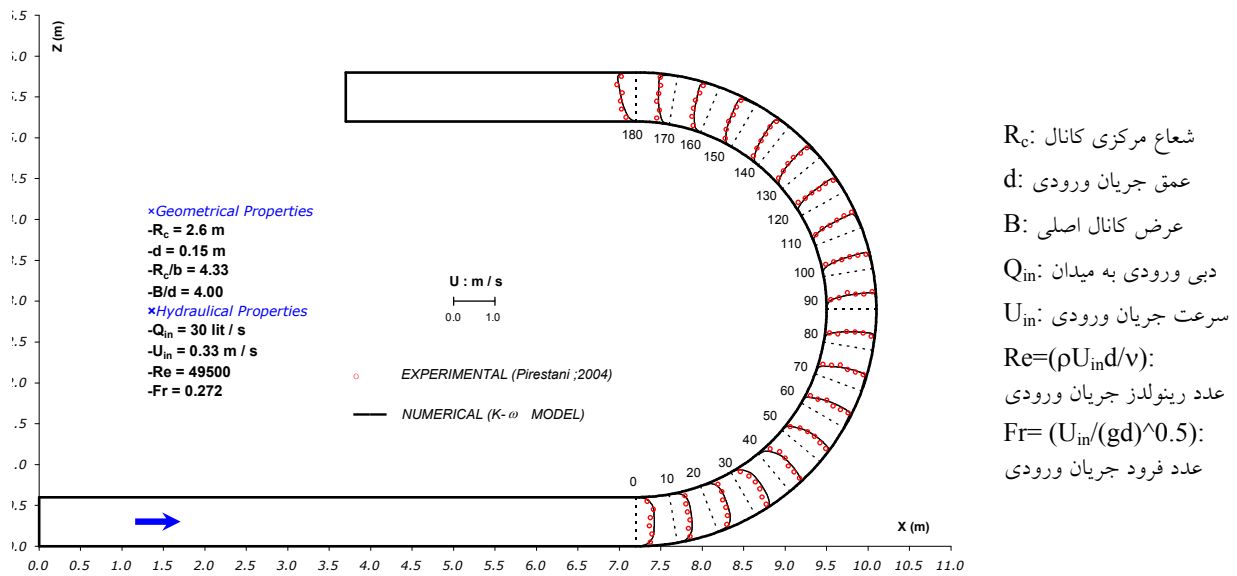
مطالعات مقدماتی نشان داد که مدل  $k-\omega$  بهتر از مدل  $k-\epsilon$  عمل کرده و مدل آشفتگی مورد استفاده در این شکل،  $k-\omega$  است. نکته مهم در این شکل، روند تمایل حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به سمت دیوارهای داخلی و خارجی است؛ به طوری که در ابتدای قوس به دلیل گرادیان طولی فشار، حداکثر سرعت به سمت جدار داخلی منتقل شده و در ادامه به دلیل تشکیل جریانهای ثانویه و غلبه آن بر گرادیان طولی فشار، جریان با مومتم بالا به سمت جدار خارجی منتقل شده و جریان پر سرعت بر جدار بیرونی مماس می شود. هدف اصلی از ارائه این مورد، بیان نقش جریان ثانویه در روند تغییرات جریان داخل قوس است. بررسیها نشان داد که کارایی مدل آشفتگی  $k-\omega$  در شبیه سازی جریانهای ثانویه (به ویژه جریان ثانویه دوم در انتهای نیمه دوم) و آثار ناشی از این جریان، نظیر تنش برشی جدارها و بستر، بسیار بیشتر از مدل  $k-\epsilon$  است، به نحوی که مدل اخیر قادر به پیش بینی جریان ثانویه دوم و نیز ناحیه پر تنش در بستر نیمه اول نیست.

نقطه  $F_s$  در شکل ۲، نقطه تکین<sup>۱</sup> بوده و محل تله اندازی رسوبها به علت صفر بودن تنش برشی است. نکته دیگر این است که فاصله خط تقسیم جریان (SL) از دیوار چپ کانال اصلی، به طرف عمق افزایش یافته و آبگیر، جریانهای تحتانی را بیشتر به سمت کانال انشعاب منحرف می کند. وجود ناحیه برگشت جریان در پایین دست دهانه به دلیل تشکیل ناحیه ایستابی و نیز تشکیل ناحیه زینی<sup>۲</sup> - که با S در مقابل دهانه نشان داده شده - از نکات مهم در الگوی جریان نزدیک بستر است. ناحیه S منجر به رسوبگذاری و تشکیل پشته رسوبی در این ناحیه می شود.

مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی روند تغییرات پروفیل های عرضی سرعت در قوس ۱۸۰ درجه آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس، به ازای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۱۵ سانتی متر در شکل ۳ نشان داده شده است.

1. Singular point
2. Saddle point





شکل ۳ مقایسه روند تغییرات پروفیل عرضی سرعت در تراز سطح آب با استفاده از مدل آشفتگی k- $\omega$

سرعت و سطح آب با داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی (۱۳۸۳) مقایسه شده است. در ادامه ابتدا به جزئیات شبیه‌سازی و تنظیمات مدل اشاره شده و در نهایت نتایج مدل‌سازی ارائه خواهد شد.

### ۶-۱- جزئیات شبیه‌سازی و تنظیمات مدل

با استفاده از نکات هیدرودینامیکی در مورد تنظیم شبکه‌بندی در اطراف دیوار (فاصله اولین گره از دیوار ناشی از استفاده از تابع دیوار برای برقراری ارتباط بین نواحی متأثر از آشفتگی و ناحیه متأثر از لزجت ملکولی) و سایر نواحی میدان، میدان حل شبکه بندی شده و با توجه به سرعت بسیار پایین همگرایی و زمانبر بودن محاسبات در حالت استفاده از مدل VOF برای میدان سه‌بعدی، سعی شد تعداد گره‌های محاسباتی تا حد امکان کم باشد. برای کانال اصلی از شبکه‌بندی غیریکنواخت (۲۰×۳۰×۱۰) در جهت طول، عمق و عرض استفاده شده و برای کانال انشعاب، شبکه‌بندی (۱۵×۳۰×۳۰) در جهت طول، عمق و عرض به کار رفت.

جزئیات بیشتر در این زمینه در (Safarzadeh and Neyshabouri, 2005) ارائه شده است.

با توجه به شناخت کلی که در مورد ساختار و الگوی جریان‌های چرخشی و ثانویه در میدانهای ناشی از انشعاب و وجود بازه قوسی شکل ایجاد شد، مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز به‌عنوان مدل مناسب انتخاب شده و در ادامه، ضمن ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در آبنگیزی جانبی از قوس ۱۸۰ درجه، تفاوت‌های اصلی الگوی جریان و سازوکار ورود رسوبها به داخل کانال انحرافی در آبنگیزی از قوس با حالت آبنگیزی از مسیر مستقیم - که نتیجه اصلی این تحقیق است - ارائه خواهد شد.

### ۶-۲ مدل‌سازی الگوی جریان در آبنگیزی از قوس ۱۸۰ درجه

به‌منظور صحت‌سنجی مدل عددی برای حالت آبنگیزی از قوس ۱۸۰ درجه، بر طبق جدول ۲ حالت آبنگیزی از زاویه ۴۰ درجه شبیه‌سازی عددی شده و پروفیل‌های

شرط مرزی دیوار اعمال شده است. با توجه به غیر دائم بودن جریان، از گام زمانی  $\Delta t=0.001\text{sec}$  برای حل میدان استفاده شده و معیار همگرایی برای مقادیر باقیمانده بی بعد معادلات پیوستگی، مومنتم، تنشهای رینولدز و انرژی جنبشی آشفتهگی برابر  $10^{-5}$  در نظر گرفته شده است.

با توجه به وجود نواحی چرخشی در داخل میدان، عبارت‌های جابه‌جایی معادلات حاکم با استفاده از الگوی آپویند مرتبه دوم منفصل شده است (Fluent Inc., 1993). به‌منظور حل میدان جریان از شبکه جابه‌جا شده استفاده شده و الگوریتم سیمپل برای ترویج عبارت‌های سرعت و فشار استفاده شده است (Fluent Inc., 1993). لازم است ذکر شود که علاوه بر بررسی معیار همگرایی مذکور، حل میدان جریان تا حدی ادامه داده شده که تغییرات سطح آب به حالت موجود در شرایط آزمایشگاهی نزدیکتر شود.

#### ۶-۲- صحت سنجی و ارائه نتایج

همان طوری که گفته شد، برای صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی پیرستانی در موقعیت ۴۰ درجه و زاویه آبیگری ۴۵ درجه استفاده شده است. در شکل ۵، مقایسه پروفیل‌های پیش‌بینی شده برآیند سرعت در سطح آب با مقادیر آزمایشگاهی، مقایسه خطوط هم سرعت در سطح آب با نحوه حرکت ذرات سطح آب در آزمایشگاه بر اساس تزریق ماده رنگی و نیز مقایسه پروفیل طولی سطح آب با مقادیر آزمایشگاهی در امتداد سردهنه آبیگری واقع در جدار بیرونی قوس مورد مطالعه، نشان داده شده است.

بر اساس سه معیار (مقایسه مقادیر سرعت، روند توزیع سرعت و حرکت ذرات در سطح آب و تغییرات تراز سطح آب) توانمندی مدل آشفتهگی و مدل دوفازی مورد

در مجموع، ۷۵۵۰۰ گره محاسباتی در میدان حل وجود دارد. در نواحی نزدیک دیوار و دهانه آبیگری با توجه به گرادیان بالای متغیرهای جریان، از شبکه ریزتر استفاده شده است. با توجه به شکل ۴، از دو مخزن در انتهای کانال‌های اصلی و آبیگری استفاده شده تا جریان عبوری از روی موانع موجود در انتهای کانال‌ها، به‌صورت ریزشی (کاملاً مشابه حالت آزمایشگاهی) به داخل مخازن ریخته شود. با توجه به اینکه از روش VOF برای شبیه‌سازی جریان دوفازی استفاده شده، ارتفاع کانال برابر ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و با توجه به اینکه در کار آزمایشگاهی، عمق ۱۵ سانتی‌متر در کانال ورودی تثبیت شده، بدین منظور عمق مزبور در کف کانال اصلی و انشعاب به‌عنوان شرط اولیه به‌صورت جزء حجم برابر ۱ (VOF=1) به‌صورت ستون آب ساکن با عمق ثابت به مدل اعمال شده است. بقیه حجم داخلی میدان (۴۵ سانتی‌متر بالای تراز اولیه سطح آب و داخل مخازن انتهایی) از هوا با VOF=0 در نظر گرفته شده است. در ورودی میدان، عمق ۱۵ سانتی‌متری برای فاز آب از فاز هوا جدا شده و شرط مرزی سرعت ورودی<sup>۱</sup> به آن اعمال شده است. علاوه بر آن، مقدار جزء حجم در این قسمت از ورودی، برابر مقدار ثابت ۱ در نظر گرفته شده تا عمق ۱۵ سانتی‌متری در مرز بالادست به میدان اعمال شود. از تراز ۱۵ تا ۶۰ سانتی‌متری، هوا با جزء حجم برابر صفر به میدان اعمال شده است. از شرط مرزی دیوار برای جداره‌های جانبی و بستر کانال‌های اصلی و جانبی استفاده شده است. شرط مرزی فشار صفر برای مرز بالای میدان اعمال شده است. برای جداره‌های جانبی و خروجی مخازن انتهایی کانال‌ها از شرط مرزی فشار صفر استفاده و برای کف مخزن و صفحه قائم زیرین سرریزهای انتهایی،

1. Velocity Inlet

داده شده در شکل ۵-ب است. با توجه به شکل ۵-د، سطح آب در فاصله‌ای از بالادست دهانه به صورت جزئی بالاافتادگی داشته و با ورود به داخل دهانه، دارای پایین‌افتادگی شدید است. کاهش تراز سطح آب در امتداد دهانه ادامه داشته و در فاصله‌ای حدود یک‌سوم بالادست دهانه، به حداقل رسیده و بعد از آن، دوباره تراز سطح آب افزایش می‌یابد. افزایش سطح آب در کناره پایین‌دست دهانه آبگیر به حداکثر مقدار خود رسیده و بعد از گذر از دهانه، به تدریج کاهش یافته و به مقداری ثابت میل می‌کند. وجود ناحیه عمیق در اطراف جدار پایین‌دست ورودی آبگیر، باعث کاهش موضعی سرعت در این ناحیه خواهد شد. علت تشکیل ناحیه مزبور (افزایش عمق در گوشه پایین‌دست دهانه آبگیر) با توجه به شباهت پدیده با الگوی جریان در قوس رودخانه قابل توجیه است.

## ۷- بررسی هیدرودینامیک ذرات نزدیک بستر برای تحلیل نحوه حرکت ذرات رسوب بستر و انتقال به داخل آبگیر

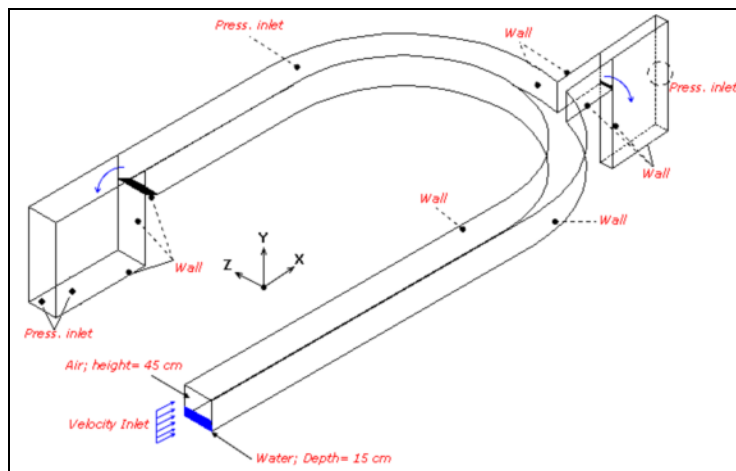
شبیه‌سازی عددی برای هر دو حالت اشاره شده در جدول ۲ صورت گرفته و با نگاهی به پدیده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط دهقانی (۱۳۸۶) در مورد نحوه انتقال رسوبها به داخل آبگیر، روند حرکت ذرات در طول قوس، سردهانه و داخل آبگیر برای تحلیل دقیق روند ورود رسوبها به داخل آبگیر به دقت تشریح شده است.

در شکل ۶ خطوط جریان، الگوی سه بعدی جریان داخل آبگیر، نتایج آزمایشگاهی روند رسوب‌گذاری و نحوه ورود رسوبات به داخل آبگیر (دهقانی، ۱۳۸۶) و طرح‌واره ارتباط بین خطوط جریان نزدیک بستر با الگوی ورود رسوبها به داخل آبگیر نشان داده شده است.

استفاده در تعیین سطح آزاد سیال به خوبی تأیید می‌شود. نگاهی به شکل ۵-الف نشان می‌دهد که انطباق پروفیل‌های پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی در داخل کانال اصلی بسیار خوب بوده و مدل عددی به خوبی توانسته است تغییرات عرضی پروفیل‌های سرعت را در مقاطع مختلف در طول کانال اصلی پیش‌بینی کند. نکته مهم در این شکل آن است که بعد از عبور از دهانه آبگیر، حداکثر سرعت جریان به تدریج به طرف دیوار بیرونی جابه‌جا می‌شود. با توجه به پروفیل‌های عرضی مقاطع  $\theta = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ ، نواحی نزدیک دیوار داخلی سرعت بسیار کمی دارند، به طوری که در مقطع  $\theta = 60^\circ$  عرض ناحیه کم‌سرعت بیشتر از سایر نواحی است. ناحیه مزبور با توجه به پایین بودن مقدار سرعت به عنوان ناحیه سکون عمل کرده، به طوری که علت انحنای شدید پروفیل‌های سرعت در ناحیه مقابل این ناحیه می‌تواند ناشی از آن باشد.

برای نواحی داخل آبگیر، بین پروفیل‌های پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی برقرار نبوده، به طوری که برای مقاطع اولیه، حداکثر سرعت پیش‌بینی شده بیشتر از مقدار آزمایشگاهی است. با نزدیک شدن به انتهای کانال آبگیر با توجه به کاهش اغتشاش جریان، انطباق بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی بهتر می‌شود.

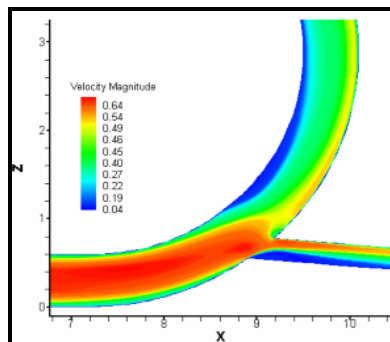
ناحیه مقابل منطقه جداشدگی جریان، از سرعت بالایی برخوردار بوده و به تدریج با حذف ناحیه جداشدگی، پروفیل سرعت حالت یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد. با توجه به شکل ۵-ب به خوبی می‌توان، نحوه تغییرات موقعیت حداکثر سرعت را مشاهده کرد. در شکل ۵-ج با استفاده از تزریق ماده رنگی، تشکیل ناحیه سکون کنار جدار داخلی بعد از انشعاب در کانال اصلی به خوبی مشهود بوده و تأییدی بر صحت نتایج مدل عددی نشان



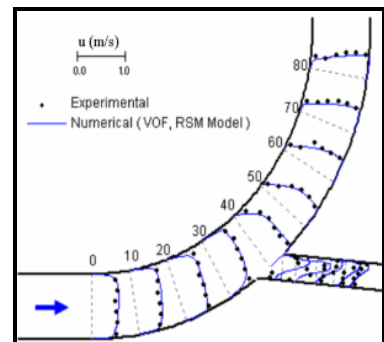
شکل ۴ شرایط مرزی و اولیه مورد استفاده برای شبیه‌سازی دوفازی جریان آشفته در آبگیری جانبی از قوس ۱۸۰ درجه



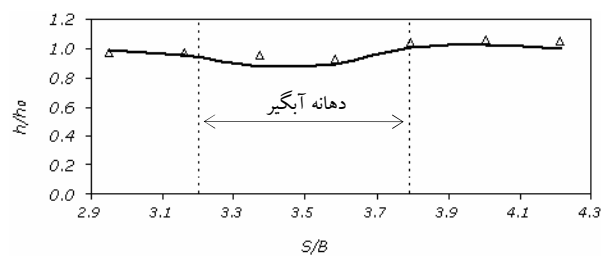
(ج)



(ب)



(الف)

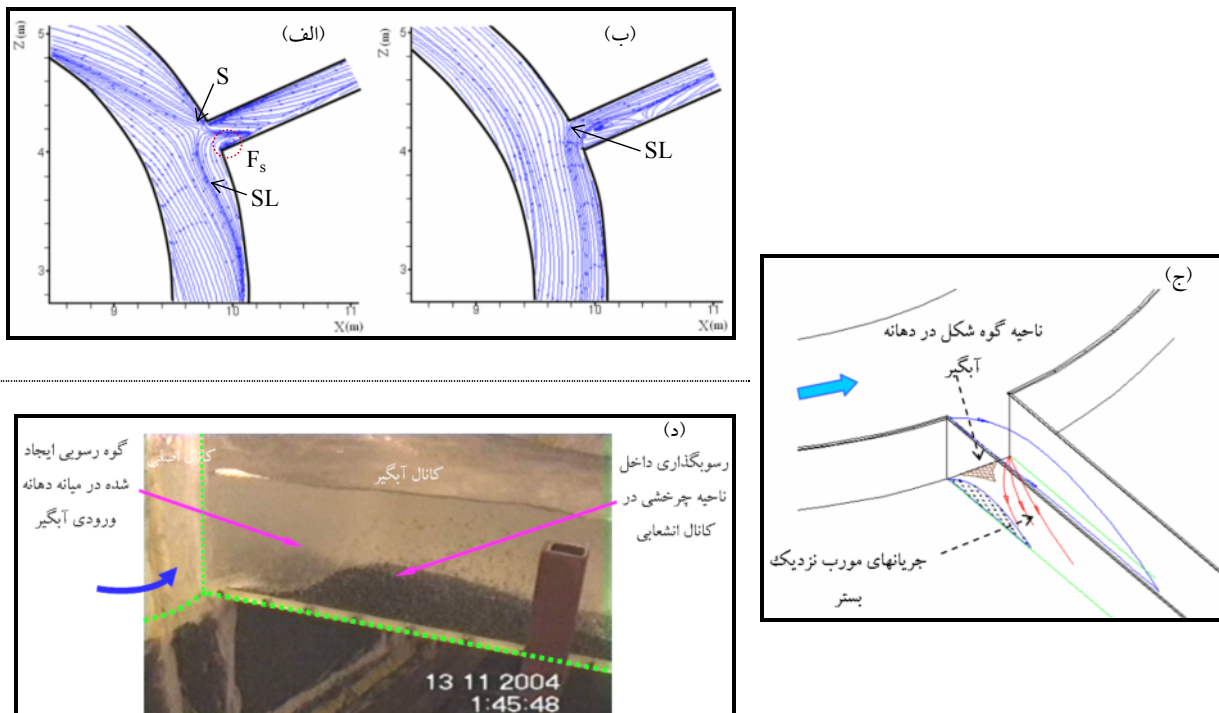


— شبیه‌سازی عددی (تحقیق حاضر)

Δ اندازه‌گیری شده (پیرستانی، ۱۳۸۳)

(د)

شکل ۵ صحت سنجی مدل عددی مورد استفاده. الف- مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت در سطح آب با نتایج آزمایشگاهی، ب- خطوط هم سرعت در سطح آب (برحسب متر بر ثانیه)، ج- تشکیل ناحیه سکون بعد از انشعاب، در امتداد جداره داخلی کانال اصلی (پیرستانی ۱۳۸۳) و د- مقایسه پروفیل طولی سطح آب در امتداد سر دهانه آبگیر واقع در جداره بیرونی قوس با مقادیر آزمایشگاهی



شکل ۶ رفتار ذرات نزدیک بستر. (الف): خطوط جریان نزدیک بستر (ب): خطوط جریان در سطح آب، (ج): الگوی سه بعدی جریان داخل آبگیر، ارتباط بین خطوط جریان نزدیک بستر و رسوبگذاری داخل آبگیر (د): روند رسوبگذاری در داخل آبگیر و تشکیل گوه رسوبی در سردهانه (دهقانی، ۱۳۸۶)

هدایت می‌شوند. عامل ایجاد جریان‌های نوع اول، اندرکنش مومتم ذرات آب در دو راستای کانال اصلی و کانال انشعاب است. جریان موربی که در بستر کانال انشعاب مشاهده می‌شود، ناشی از این پدیده است که در دهانه آبگیر، یک جریان ثانویه داخل مقطع تولید شده و باعث اعوجاج جریان‌های ورودی به آبگیر می‌شود. جریان‌هایی که از کانال اصلی به داخل کانال انشعاب کشیده می‌شوند، پس از برخورد به جدار پایین‌دست آبگیر، به سمت کف کانال هدایت شده و در اثر جریان ثانویه مزبور، به سمت ناحیه چرخشی منحرف می‌شوند.

مطالعات آزمایشگاهی دهقانی (۱۳۸۶) نشان از تشکیل گوه رسوبی در دهانه آبگیر دارد. وی در رساله دکترای خود چنین عنوان کرده است که در جلوی دهانه با تشکیل دیون ایستا، وقتی تاج دیون به تراز کف آبگیر میرسد،

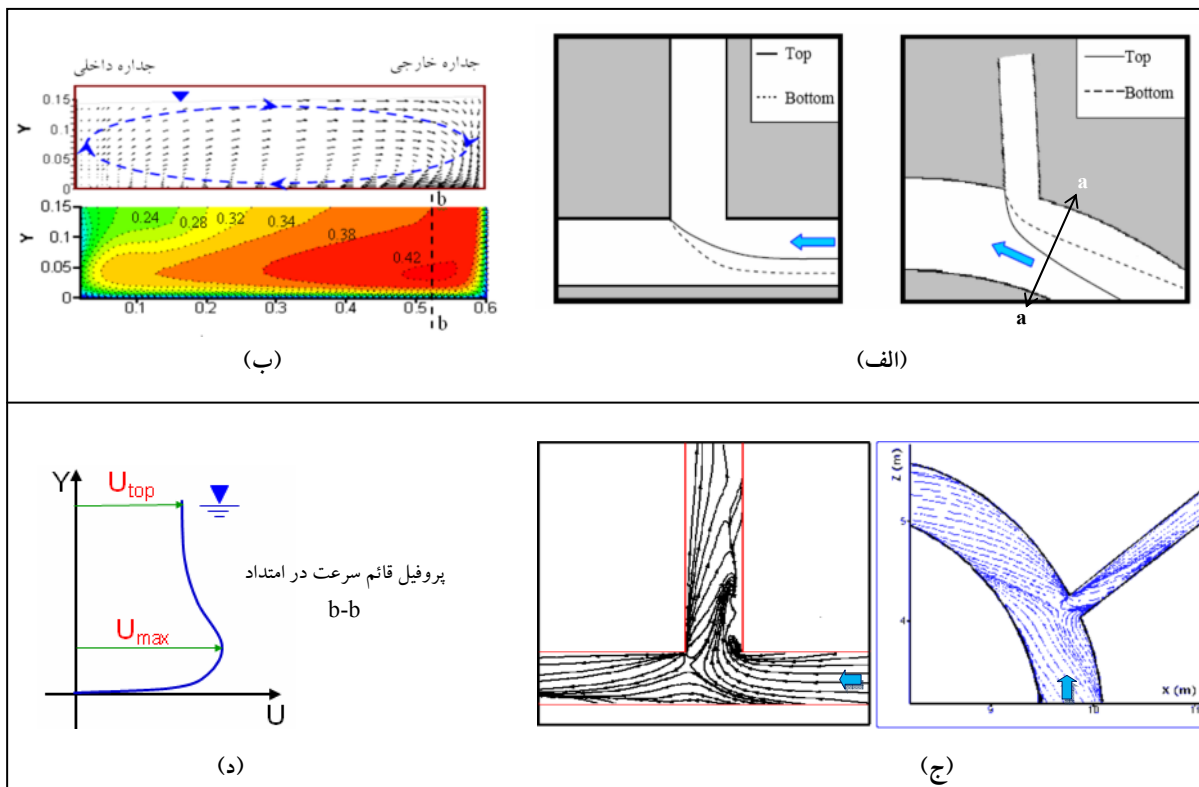
نکته مهم در دو شکل الف و ب اختلاف شدید بین الگوی حرکت ذرات نزدیک سطح آب با ذرات بستر است، به طوری که اولاً به خلاف حالت آبگیری از مسیر مستقیم (شکل ۲)، با توجه به خط تقسیم جریان، بیشتر جریان ورودی به آبگیر از سطوح فوقانی تغذیه می‌شود. نکته دیگر وجود جریان‌های برگشتی در گوشه پایین‌دست دهانه و نیز تشکیل نقطه تکین زینی در این ناحیه است، به طوری که الگوی اول باعث ورود رسوبها به داخل آبگیر شده و الگوی دوم باعث نشست مصالح در پایین‌دست دهانه می‌شود.

نگاهی به شکل ۶-ج نشان می‌دهد که داخل آبگیر، دو دسته جریان اصلی وجود دارد: ۱- جریان‌های چرخشی در کنار دیوار بالادست، ۲- خطوط جریان موربی در بستر که از دیوار پایین‌دست منشعب شده و به زیر ناحیه چرخشی

## ۸- مقایسه ساختار جریان در دو حالت آبگیری از مسیرهای مستقیم و قوسی

در شکل ۷ ساختار صفحات تقسیم جریان برای دو حالت آبگیری از مسیر مستقیم و نیمه دوم قوس ۱۸۰ درجه (مقطع ۱۱۵ درجه، تحت زاویه آبگیری ۴۵ درجه) نشان داده شده است. هدف از ارائه این شکل بررسی تشابه و تفاوت‌های ساختاری جریان آشفته در این دو حالت و کاربرد آن برای بررسی نقش بازه قوسی در کنترل رسوب ورودی به آبگیر جانبی است.

رسوبها از محل تاج دیون به سمت آبگیر کشیده شده و در ناحیه‌ای گوه شکل به تله می‌افتند. علاوه بر آن بر اثر تشکیل ناحیه چرخشی داخل آبگیر، پشته رسوبی وسیعی در محل این ناحیه شکل می‌گیرد (شکل ۶-د). علت تشکیل ناحیه گوه شکل مزبور با توجه به دو الگوی جریان (ناحیه چرخشی و جریان‌های مورب نزدیک بستر) کاملاً قابل توجیه و تشریح است. شکل ۶-ه به خوبی ارتباط بین این گوه و الگوی جریان نزدیک بستر را نشان می‌دهد.



شکل ۷ مقایسه ساختار جریان در دو حالت آبگیری از مسیر مستقیم و قوس ۱۸۰ درجه (حالت آبگیری از مقطع ۱۱۵ درجه، تحت زاویه ۴۵ درجه). الف- خطوط تقسیم جریان در لایه های تحتانی و فوقانی میدان، ب- جریانهای ثانویه و کانطور توزیع سرعت در مقطع عرضی (a-a)، ج- خطوط جریان در لایه های نزدیک بستر و د- پروفیل قائم سرعت در امتداد (b-b)

ذرات نزدیک بستر، کمتر از لایه‌های فوقانی بوده و مکش اعمالی از طرف آبگیر بر این ذرات بیشتر از ذرات نزدیک سطح آب تأثیرگذار است، لذا گسترش ناحیه تقسیم جریان در کف بیشتر از لایه‌های فوقانی است.

با توجه به مطالب فوق در مورد ساختار صفحات تقسیم جریان و نیز نقش جریان ثانویه در هدایت ذرات رسوبی نزدیک کف به سمت دیوار داخلی، برخلاف آبگیری از مسیر مستقیم، آبگیری از قوس بیشتر از لایه‌های فوقانی تغذیه شده و لذا حجم جریان پر رسوب ورودی به کانال در حالت اول بسیار کمتر از حالت دوم خواهد بود.

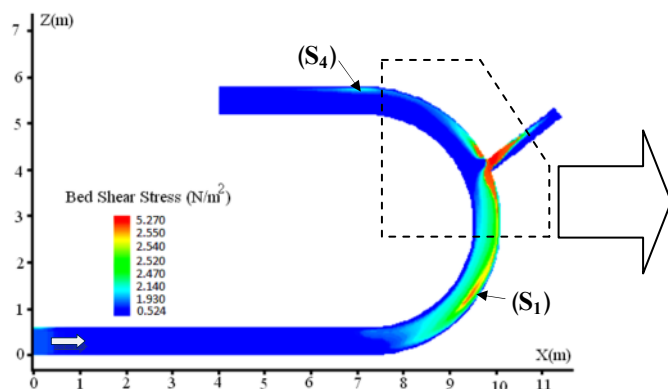
#### ۹- بررسی نواحی محتمل آبستگي موضعی و رسوبگذاری حول آبگیر جانبی در بازه قوسی رودخانه

به‌منظور بررسی تأثیر آبگیر بر فرسایش موضعی و تغییرات احتمالی ایجاد شده در بستر کانال اصلی و کانال انحرافی، توزیع تنش برشی در موقعیت ۱۱۵ درجه با زاویه آبگیری ۴۵ درجه بر روی مرزهای مذکور تعیین و در شکل ۸ نشان داده شده است. نگاهی به شکل‌های مزبور نشان می‌دهد که در نیمه اول کانال اصلی، شبیه حالت قوس بدون آبگیر، احتمال وقوع چاله فرسایشی در محدوده مقطع عرضی ۵۰ درجه (ناحیه  $S_1$  در شکل ۸-ب) وجود دارد. تفاوتی که حالت اخیر با حالت قوس تنها دارد این است که محل احتمالی چاله مزبور کمی از دیوار بیرونی دورتر شده و به مرکز کانال نزدیکتر شده است.

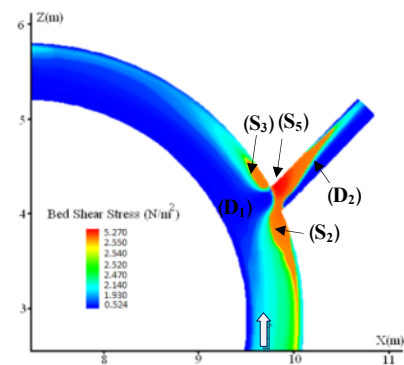
وقوع آبستگي در نیمه اول قوس ۱۸۰ درجه توسط بیشتر محققان گزارش شده است که از میان آنان می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی Odgaard and Bergs (1988) بر روی نوعی قوس ۱۸۰ درجه ملایم اشاره کرد.

مقایسه دو حالت مزبور نشان می‌دهد که موقعیت خطوط تقسیم جریان در صفحات نزدیک بستر و سطح آب برای این دو حالت، کاملاً متفاوت است، به‌طوری که در آبگیری از مسیر مستقیم، فاصله خط تقسیم جریان در نزدیکی سطح آب از دیواره سمت راست کانال اصلی، کمتر از فاصله خط تقسیم جریان نزدیک بستر نسبت به این دیوار است. در حالت آبگیری از قوس، به عکس حالت فوق، خط تقسیم جریان در نزدیکی بستر به دیوار داخلی (دیوار سمت راست) نزدیکتر است. به بیان دیگر، محدوده جاروب جریان از داخل کانال اصلی به کانال انشعابی، در حالت آبگیری از قوس در سطح آب بیشتر از تراز نزدیک کف بوده و لذا می‌توان انتظار داشت که آبگیر، بیشتر، از ترازهای فوقانی تغذیه شود. علت وقوع این پدیده را می‌توان تشکیل و توسعه جریان‌های ثانویه در طول کانال قوسی عنوان کرد، به صورتی که بر اثر جریان ثانویه و نقش آن در انتقال جانبی مومتم طولی، هسته پرسرعت جریان به سمت جدار بیرونی و تراز نزدیک بستر منتقل می‌شود. در شکل ۷ الگوی چرخشی جریان ثانویه ناشی از فشار و توزیع سرعت در مقطع قبل از آبگیر (مقطع a-a) نشان داده شده و در ادامه، پروفیل قائم سرعت در امتداد قائم (امتداد b-b) واقع در جدار بیرونی مقطع (a-a) نشان داده شده است.

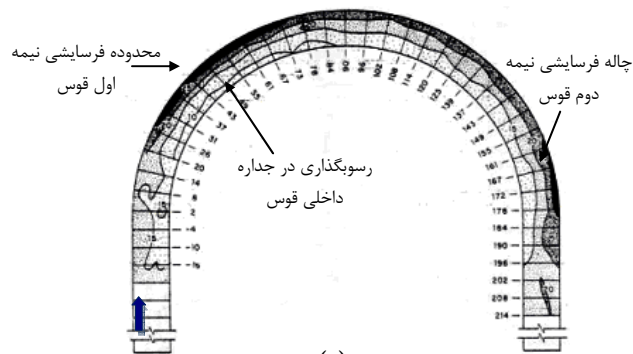
با توجه به شکل مزبور، در کانال قوسی، برآیند سرعت در راستای کانال اصلی و در نتیجه مومتم جریان در راستای مزبور، برای لایه‌های تحتانی پرسرعت، بیشتر از لایه‌های فوقانی کم‌سرعت است، لذا مکش اعمالی از طرف آبگیر، ذرات نزدیک به سطح را بیشتر از لایه‌های تحتانی به سمت آبگیر منحرف می‌کند. لذا می‌توان گفت که گسترش ناحیه تقسیم جریان در سطح بیشتر از کف کانال است. در مسیرهای مستقیم، با توجه به نبود جریان حلزونی، سرعت



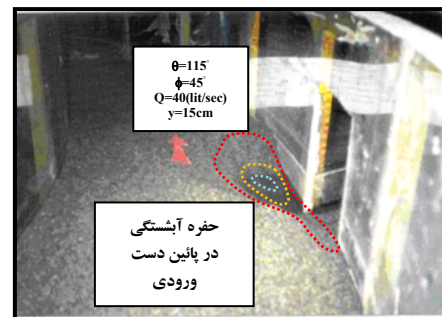
(ب)



(الف)



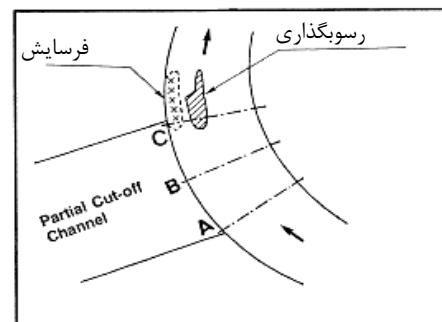
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۸ وضعیت فرسایش موضعی و نواحی محتمل رسوبگذاری حول دهانه آبگیر در قوس ۱۸۰ درجه

الف- توزیع تنش برشی بستر در حالت آبگیری ۲، ب- نمای کلی از وضعیت تنش برشی در دهانه آبگیر، ج- فرسایش موضعی پائین دست دهانه آبگیر در کار آزمایشگاهی پیرستانی (۱۳۸۳)، د- الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس ۱۸۰ درجه (Odgaard and Bergs, 1988)، ه- طرحواره‌ای از محل های فرسایش و رسوب گذاری (متناظر با ناحیه زینی) در پائین دست Cut off ایجاد شده در قوس رودخانه Allan (Fares, 2000)، و- فرسایش موضعی داخل آبگیر (ناحیه خنجر شکل) در کار آزمایشگاهی پیرستانی (۱۳۸۳)



ایجاد شده در دهانه آبگیر را در حالت آبگیری مزبور به صورت شکل ۸- ج نشان داده است.

محل محتمل رسوبگذاری در مقابل گوشه پایین دهانه ( $D_1$ )، محلی است که بر اساس الگوی خطوط جریان کف نقطه تکین تحت عنوان نقطه زینی در آن ناحیه تشکیل می شود (شکل ۶- الف، ناحیه S). بر طبق نظر Neary et. al (1999) در صورتی که مؤلفه قائم سرعت در این ناحیه کم باشد، رسوب گذاری اتفاق خواهد افتاد. Fares (2000) با انجام مطالعاتی بر روی توزیع تنش برشی بستر در Cut-off ایجاد شده در قوس رودخانه Allan، به وجود ناحیه رسوبگذاری در پایین دست دهانه و نیز ناحیه فرسایش در کناره جدار بیرونی رودخانه اشاره کرده است. وی نواحی مزبور را طبق شکل ۸- ه نشان داده است. نگاهی به خروجی قوس نشان می دهد که احتمال وقوع چاله فرسایشی در خروجی قوس ( $S_4$ )، مشابه حالت قوس بدون آبگیر، وجود دارد.

در داخل کانال آبگیر، دو ناحیه زیر مشاهده می شود:

۱- ناحیه آبستگي محتمل در کنار جدار پایین دست (ناحیه خنجر شکل) ( $S_5$ )

۲- ناحیه محتمل رسوب گذاری در امتداد جدار بالادست ( $D_2$ ) ناحیه محتمل رسوبگذاری منطبق با ناحیه چرخشی جریان (شکل ۶- الف) است که در این ناحیه به دلیل تشکیل نقطه تکین کانونی ( $F_s$ ) و کاهش شدید تنش برشی، در صورت متحرک بودن بستر، ذرات رسوبی ورودی از کانال اصلی به آبگیر، پس از تجمع در ناحیه گوه ای شکل مقابل دهانه، توسط خطوط جریان مورب نزدیک کف به سمت ناحیه چرخشی هدایت شده و در این نقطه به تله می افتند. ذرات ورودی به این ناحیه به مرور تجمع کرده و باعث انسداد قسمتی از سردهانه آبگیر خواهند شد. در شکل ۶-

در شکل ۸- د الگوی فرسایش و رسوبگذاری در یکی از آزمایشهای محققان مزبور نشان داده شده است. با توجه به این شکل وقوع فرسایش در جدار بیرونی مقطع عرضی ۵۰ درجه و در خروجی قوس (متناظر با ناحیه  $S_4$  در شکل ۸- ب) کاملاً مشهود است. با گذر از ناحیه مزبور، تنش برشی کمی کاهش یافته و دوباره در حوالی راس قوس، ناحیه دیگری با تنش برشی نسبتاً بالا تشکیل می شود که نسبت به ناحیه پرتنش قبلی، محدودتر است. تنش برشی نسبتاً قوی در یک عرض کم در امتداد جدار بیرونی تا بالادست دهانه آبگیر اتفاق می افتد (ناحیه  $S_2$  در شکل ۸- الف).

در اطراف دهانه، سه ناحیه زیر مشاهده میشود:

۱- آبستگي محتمل بالادست دهانه ( $S_2$ )  
 ۲- آبستگي محتمل گوشه پایین دست دهانه ( $S_3$ )  
 ۳- رسوب گذاری محتمل در پایین دست دهانه ( $D_1$ )  
 علت تشکیل ناحیه ( $S_2$ )، با توجه به انحنای شدید خطوط جریان نزدیک بستر (شکل ۶- الف) در بالادست دهانه آبگیر قابل توجیه است. آبستگي پایین دست دهانه آبگیر (ناحیه  $S_3$ ) ناشی از تشکیل جریان حلزونی در این منطقه است. در گوشه پایین دست دهانه آبگیر، جریان ثانویه نسبتاً قوی تشکیل می شود و همین پدیده باعث انتقال حداکثر سرعت به ترازهای پایین تر و تمرکز ذرات پر سرعت در نزدیکی بستر می شود. بر اثر این پدیده، گردایان قائم سرعت بالا رفته و در نتیجه، تنش برشی نسبتاً قوی به بستر کانال اعمال می شود. لازم است ذکر شود که تشکیل ناحیه سکون در مجاورت جدار داخل ( $S_5$ ) و فشردگی خطوط جریان در این ناحیه نیز موجب افزایش سرعت جریان و در نتیجه تشدید تنش برشی کف می شود. پیرستانی (۱۳۸۳) حفره فرسایشی

جریان‌های ثانویه ناشی از فشار را در کنترل رسوب ورودی به آبگیر به‌خوبی نشان می‌دهد. الگوی خطوط جریان در نزدیکی کف به‌خوبی مشاهدات محققان قبلی در زمینه سازوکار ورود رسوبها به داخل آبگیر و نیز نواحی محتمل فرسایش و رسوبگذاری را پیش‌بینی و تأیید می‌کند.

## ۱۲- تشکر و قدردانی

از راهنمایی‌های جناب آقای دکتر علی‌اکبر صالحی نیشابوری در انجام این تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

## ۱۱- فهرست علائم

$D_i$	ناحیه رسوبگذاری $i$ ام
$D_{ij}$	تانسور پخش شدگی
$F_n$	جزء حجم سیال $n$ ام
$F_s$	نقطه کانونی
$\mathcal{G}_{x_i}$	مولفه ثقل در جهت $x_i$
$k$	انرژی جنبشی آشفته‌گی
$P$	عبارت فشار در معادله ناویر استوکس
$P_{ij}$	تانسور تولید
$p$	فشار پیرومتریک
$R_{ij}$	تنش رینولدز
$S$	نقطه زینی
$S_i$	ناحیه آبستنگی $i$ ام
$SL$	خط تقسیم جریان
$U_i$	مؤلفه متوسط سرعت در جهت $i$
$u_i'$	مؤلفه نوسانی سرعت در جهت $i$
$x_i$	راستای $i$ ام در سیستم مختصات دکارتی ( $i=1,2,3$ )
$\varepsilon_{ij}$	تانسور اتلاف
$\Phi_{ij}$	تانسور فشار-گرانش
$\mu$	لزجت آب
$\rho$	چگالی آب
$\rho_n$	چگالی سیال $n$ ام

د این ناحیه بر اساس نتایج کار آزمایشگاهی دهقانی (۱۳۸۶) نشان داده شده است.

به‌دلیل تشکیل ناحیه چرخشی در داخل آبگیر و کاهش عرض مفید برای عبور جریان، سرعت آب در ناحیه مقابل ناحیه چرخشی افزایش می‌یابد. علاوه بر این پدیده، با توجه به تشابه الگوی جریان در ناحیه ایجاد شده توسط صفحه تقسیم جریان و لایه برشی حاصل از ناحیه چرخشی داخل آبگیر با الگوی جریان در قوس (جدار داخلی قوس فرضی را صفحه برشی ناحیه چرخشی داخل آبگیر و جدار بیرونی آن را صفحه تقسیم جریان تشکیل می‌دهند)، در این ناحیه جریان ثانویه شدیدی تشکیل شده و باعث حمله جریان پرسرعت به بستر آبگیر در امتداد دیوار پایین‌دست کانال انحرافی می‌شود. عوامل مزبور باعث وقوع آبستنگی شدیدی در ناحیه ( $S_5$ ) خواهد شد که در صورت عدم تثبیت مناسب بستر، علاوه بر آبستنگی کف همچنین می‌تواند تهدیدی برای پایداری دیوار پایین‌دست آبگیر محسوب شود. وقوع این ناحیه در کار آزمایشگاهی پیرستانی (۱۳۸۳) در شکل ۸- و گزارش شده است.

## ۱۰- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان آشفته به‌صورت دوفازی برای آبگیری از قوس ۱۸۰ درجه رودخانه انجام شد. بر اساس نتایج حاصل، مدل آشفته‌گی RSM همراه با روش VOF برای شبیه‌سازی روند تغییرات سطح آب، هیدرودینامیک حاکم بر مساله را با دقت بسیار مناسبی پیش‌بینی می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو موقعیت مختلف نشان داد که ساختار صفحه تقسیم جریان در حالت آبگیری از قوس رودخانه، کاملاً متفاوت با حالت آبگیری از مسیر مستقیم بوده و همین پدیده نقش

## ۱۲- فهرست منابع

- ابوالقاسمی، م. (۱۳۸۶). "کنترل رسوب ورودی به آبگیرهای جانبی در مئاندر رودخانه"، رساله دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.
- دهقانی ا. (۱۳۸۶). "مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب به آبگیر جانبی در قوس ۱۸۰ درجه"، رساله دکتری، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس.
- پیرستانی، م. (۱۳۸۳). "بررسی الگوی جریان و آبشستگی در دهانه ورودی آبگیر کانال‌های دارای انحناء"، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.
- خانجانی م. ج، بارانی، غ، ع، رحمانیان، م. ر. (۱۳۷۸). "بررسی آرایش مکانی صفحات مستغرق بر کاهش رسوبگذاری در دهانه آبگیر با مدل فیزیکی"، مجله استقلال، سال ۱۸، شماره ۲.
- عباسی، ع. (۱۳۸۲). "مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب در آبگیری جانبی از مسیر مستقیم"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- ساجدی، م. و حبیبی، م. (۱۳۸۴). "کاربرد صفحات مستغرق در پیشگیری از ورود رسوبات به آبگیرها"، سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.
- شفاعی بجستان، م. و نظری، س. (۱۳۷۸). "تأثیر زاویه انحراف آبگیر بر میزان رسوب ورودی به آبگیرهای جانبی در خم قائم رودخانه"، مجله علمی کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، جلد ۲۲، شماره ۱.
- شفاعی بجستان، م.، سیدیان، س. م. و کرمی مقدم، م. (۱۳۸۷). "تعیین شعاع بهینه در وردی آبگیرهای ۵۵ و ۹۰ درجه با استفاده از تغییرات سرعت جریان"، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.
- صفرزاده، ا. و صالحی نیشابوری، س.ع.ا. (۱۳۸۵). "مطالعه عددی الگوی جریان آشفته و بررسی کیفی انتقال رسوب و فرسایش در آبگیری جانبی از رودخانه"، مجله فنی مدرس، شماره ۲۵، صفحات ۱-۱۸.
- Agaccioglu, H. and Yuksel, Y. (1998). "Side-weir flow in curved channel", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(4), pp. 63-175.
- Barkdoll, B. (1997). "Sediment control at lateral diversion", PhD thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Iowa.
- Celik, I.B. (1999). "Introductory turbulence modeling", Western Virginia University.
- Fares, Y.R. (2000). "Changes of bed topography in meandering rivers at a neck cut-off intersection", *Journal of Environmental Hydrology*. 8(1), pp. 1-18.
- Fluent Inc. (1993). "FLUENT User's Guide", Fluent, New Hampshire.
- Issa, R.I and Oliveira, P.J. (1994). "Numerical prediction of phase separation in two-phase flow through T-junction", *Comp. and Fluids*, 23(2), pp. 347-356.
- Karino, T. et al. (1979). "Particle flow behavior in models of branching vessels vortices in 90° T-junctions", *Biorehology*. 231(16), pp. 343-354.
- Neary, V. et al. (1999). "Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows", *J. Hydraulic Eng.*, 125(2), pp. 126-140.
- Odgaard, J. and Bergs, A. (1988). "Flow processes in a curved alluvial channel", *Water Resources Research*. 24(1), pp. 35-46.
- Ruether, N., Singh J. M., Olsen, N. R. B. and Atkinson, E. (2005). "3D computation of sediment transport at water intakes." *Water Management* 158(WMI).
- Safarzadeh, A., Salehi Neyshabouri, S.A.A. and Barkdoll, B.D. (2004). "3D numerical investigation of turbulent flow through lateral intake in open channel", *Proc. CFD2004 Conf. Ottawa, Canada*.
- Safarzadeh, A. and Salehi Neyshabouri. (2005). "3D numerical study on the effects of secondary flow on river bend", *Proc. IAHR2005 Cong. Seoul, Korea*.
- Shetta, A. and Murthy, K. (1996). "A numerical study of division of flow in open channels", *J. Hydraulic Res.*, 34(5), pp. 651-675.
- Taylor, E. (1944). "Flow characteristics at rectangular open channel junction", *J. Hydraulic Eng.* 10(6), pp. 893-902.