



## شبیه سازی عددی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم افزار SSIIM

### ماندانا ناجی ابهری<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲</sup>

۲۰ دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی مهندسی - گروه عمران  
Mandana\_naji2002@yahoo.com

#### خلاصه

در طبیعت به ندرت بتوان رودخانه با مسیر کاملاً مستقیم یافت، اکثر رودخانه ها دارای مسیر های قوسی می باشند. قوس رودخانه جزو بازه هائی از یک رودخانه می باشد که الگوی جریان کاملاً پیچیده ای بر آن حاکم می باشد. جهت مطالعه رفتار یک رودخانه لازم است تا الگوی جریان حاکم بر قوسهای آن کاملاً شناخته شود. با ورود جریان به قوس رودخانه، در اثر اعمال نیروی جانب مرکز و اندرکنش آن با سایر نیروهای حاکم بر میدان، جریان ثانویه ایجاد شده و باعث باز توزیع مومنتم طولی جریان در جهت عرضی مقطع میشود. مدل های عددی به عنوان یک ابزار مناسب و توانمند علاوه بر پیش بینی چنین میدانهای می توانند درک مطلوبی از آن ارائه کنند. در مطالعه حاضر با استفاده از مدل عددی سه بعدی SSIIM الگوی جریان آشفته در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب مورد بررسی قرار می گیرد. خصوصیات جریان از جمله: نحوه اثر جریان ثانویه بر باز توزیع سرعت، مسیر حداکثر سرعت و توزیع تنش برشی جداره ها مورد مطالعه قرار گرفته و بر این اساس محل های محتمل برای فرسایش و رسوب گذاری در کانال پیش بینی قرار می شود. نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه نتایج حاصله نشان از دقت خوب مدل عددی در پیش بینی پروفیل های طولی سرعت و الگوی جریان ثانویه دارد.

کلمات کلیدی: الگوی جریان، شبیه سازی عددی، قوس ۹۰ درجه، SSIIM

#### مقدمه

امروزه رودخانه ها به عنوان یکی از اصلی ترین منابع فراهم کننده آب و انرژی برای انسان، به منزله شاهراگ جوامع بشری قلمداد می شوند و علیرغم خسارات بیشماری که از دیر باز به انسان ها وارد نموده اند، به دلیل تاثیر ویژه ای که در زندگی بشر و شکل گیری تمدن های مختلف داشته اند، همواره مورد توجه بوده اند و بررسی رفتار آنها از جایگاه ویژه ای برخوردار است. الگوی جریان در رودخانه های طبیعی و خصوصاً رودخانه های مئاندری، به عنوان یکی از رایج ترین انواع رودخانه ها در طبیعت، بسیار پیچیده می باشد. این پیچیدگی نه تنها به خاطر آشفتگی و طبیعت سه بعدی جریان بلکه به خاطر توپوگرافی و تغییرات عمق نیز می باشد. با توجه به اهمیت بررسی الگوی جریان در قوس، در گذشته مطالعات عددی و آزمایشگاهی در این زمینه انجام شده است. از میان مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته می توان به کار شگری در سال ۱۹۵۰ اشاره نمود ۱. شگری با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی الگوی جریان در قوس پرداخت. او مشاهده نمود که برای یک قوس با انحنای ملایم محل وقوع حداکثر سرعت در نیمه اول قوس به سمت جداره داخلی و با حرکت به سمت خروجی قوس به طرف جداره خار جی متمایل می شود. ایبن در سال ۱۹۶۲ وین در سال ۱۹۶۵ به بررسی توزیع سرعت در یک قوس با مقطع دوزنقه ای پرداختند ۲. رودی در سال ۱۹۷۸ با بررسی قوس تند مشاهده نمود که محل وقوع حداکثر سرعت با نزدیک شدن به خروجی قوس به سمت جداره خارجی متمایل می شود. وی اشاره نمود که عامل اصلی انتقال حداکثر سرعت به سمت جداره خارجی در انتهای قوس، گرادیان طولی فشار می باشد در صورتی که در قوس های ملایم عامل اصلی جابجایی حداکثر سرعت جریان ثانویه است ۳. بلانکارت و گراف در سال ۲۰۰۱ به بررسی الگوی جریان در یک قوس ملایم با زاویه ۱۲۰ درجه پرداختند ۲. علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی مطالعات عددی نیز توسط سایر محققین در زمینه بررسی الگوی جریان در قوس نیز انجام شده است. در سال ۱۹۹۹ لین و همکارانش با استفاده از مدل دو بعدی متوسط گیری شده در عمق الگوی جریان در دو قوس ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه را بررسی نمودند ۴. در سال ۲۰۰۳ بوئیچ با استفاده از روش گردابه های بزرگ، الگوی جریان در یک خم ۱۸۰ درجه ملایم را مدلسازی نمود ۵. در سال ۲۰۰۵ اولسن و همکارانش جریان ثانویه و انتقال رسوب را در یک کانال ۹۰ درجه باریک مدلسازی نمودند ۶. لازم به ذکر است از آنجایی که شبیه سازی سه بعدی الگوی جریان کاری زمانبر و پرهزینه می باشد استفاده از مدل های سه بعدی توسط سایر محققین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا با توجه به اهمیت بررسی الگوی سه بعدی جریان در رودخانه های مئاندری در این مقاله با استفاده از مدل عددی سه بعدی SSIIM به مطالعه الگوی جریان در یک کانال خمیده با زاویه مرکزی ۹۰ درجه پرداخته می شود.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> استاد هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس



### بررسی الگوی جریان ونحوه شکل گیری جریان ثانویه

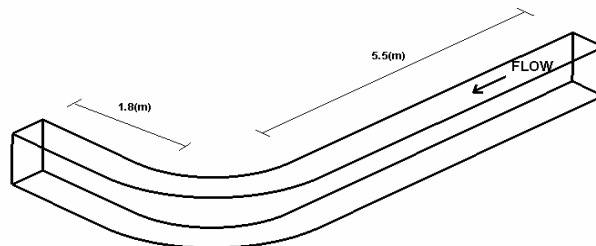
جریان در یک مسیر خمیده سه بعدی بوده و علاوه بر جهت اصلی در جهات دیگر نیز وجود دارد. این جریان‌ها که در داخل مقاطع عرضی رخ می‌دهند جریان‌های ثانویه نامیده می‌شوند. Ciray در سال ۱۹۶۷ عامل تشکیل دهنده جریان ثانویه در قوس را نیروی گریز از مرکز معرفی می‌کند. با ورود جریان به قوس نیروی گریز از مرکز بر آن اثر نموده و باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌گردد که در نتیجه شیب عرضی سطح آب در قوس خارجی بالا رفته و در قوس داخلی کاهش می‌یابد. این پدیده باعث ایجاد گرادیان فشار جانبی در داخل مقطع خواهد شد. در نتیجه در اثر عدم تعادل موضعی بین نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار جانبی جریان ثانویه در داخل مقطع عرضی شکل می‌گیرد. در نتیجه در نزدیکی بستر گرادیان فشار جانبی بر نیروی گریز از مرکز غلبه نموده و باعث می‌شود جریان به سمت قوس داخلی و در نزدیکی سطح آب به علت غلبه نیروی گریز از مرکز بر گرادیان فشار به سمت قوس خارجی متمایل شود. لازم به ذکر است که قدرت این نوع جریان ثانویه در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد قدرت جریان طولی می‌باشد. در 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 الگوی جریان در مسیر مستقیم می‌شود.

### معرفی مدل عددی SSIIM

SSIIM مخفف عبارت **Sediment Simulation In Intakes with Multiblock option** می‌باشد. نسخه مقدماتی این مدل در سال ۱۹۹۱-۱۹۹۰ در انستیتو تکنولوژی نروژ توسط Olsen تهیه شده و در سال ۲۰۰۲ توسعه یافت. مدل SSIIM معادلات ناویر-استوکس و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد را با استفاده از یک شبکه سه بعدی غیر متعامد جایجا نشده حل می‌کند. برای منفصل سازی نیز از روش حجم کنترل استفاده می‌شود. روش SIMPLE برای ارتباط ترم فشار و سرعت بکار برده شده است. با استفاده از روش حل ضمنی میدان سرعت محاسبه شده و مولفه‌های سرعت در حل معادلات انتقال و پخش برای اندازه‌های مختلف رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرند. ۸.

### معرفی کانال مورد مطالعه

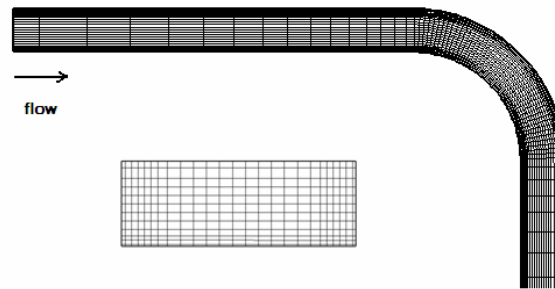
میدان مورد نظر یک کانال خمیده با زاویه ۹۰ درجه می‌باشد که دارای دو کانال مستقیم با طول های ۵/۵ متر در بالادست و ۱/۸ متر در پایین دست می‌باشد. شعاع مرکزی قوس (R) ۱/۸ متر، ارتفاع ۰/۷ متر و عرض کانال ۰/۶ متر می‌باشد. مقطع کانال مستطیلی بوده و دارای شیب طولی ۰/۰۱ می‌باشد. دیوارها و بستر کانال صلب بوده و از شیشه ساخته شده‌اند. با توجه به نسبت (R/B=3) قوس شبیه سازی شده جزء قوس‌های تقریباً تند به حساب می‌آید. مشخصات هندسی کانال در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱ - مشخصات هندسی کانال ۹۰ درجه

### تولید و تنظیم شبکه بندی میدان حل

از آنجایی که یکی از ضعف‌های مدل عددی SSIIM عدم توانایی تولید هندسه لازم جهت شبیه سازیهای پیچیده می‌باشد به همین منظور از برنامه FORTRAN جهت ساخت هندسه مورد نظر برای مدل عددی مذکور استفاده می‌گردد. هندسه میدان به گونه‌ای تعریف شده است که در نواحی نزدیک به دیواره به جهت داشتن گرادیان‌های شدیدتر از شبکه ریزتری استفاده شده است. همچنین با هدف کم کردن زمان محاسبات، شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در جهت جریان و با نزدیک شدن به قوس شبکه ریز و با خروج از قوس شبکه درشت‌تر خواهد شد. استفاده از یک شبکه بندی بهینه در جهت قائم بر صفحه کانال نیز مورد توجه قرار گرفته است. زمان اجرای محاسبات و میزان مطابقت نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، دو فاکتور مهم در انتخاب شبکه بندی بهینه خواهد بود. با در نظر گرفتن دو فاکتور فوق ابعاد شبکه بهینه در این تحقیق  $69 \times 25 \times 12$  انتخاب شده است. که به ترتیب نشان دهنده تقسیمات در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهد که ریزتر کردن شبکه باعث تغییر اساسی در دقت محاسبات نشده است بلکه موجب افزایش زمان اجرای برنامه گردیده است که این مساله از نظر اقتصادی توجیه مناسبی نخواهد داشت. شکل ۲ شمایی از شبکه بندی تولید شده را نشان می‌دهد.



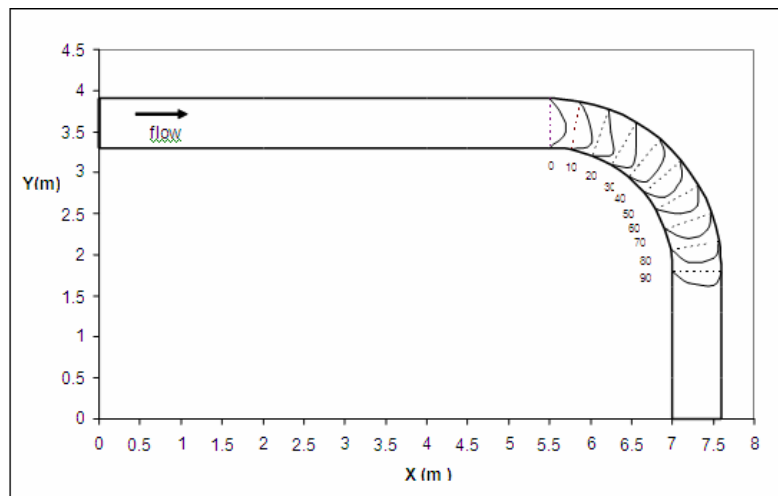
شکل ۲- شمایی از شبکه بندی تولید شده

### کالیبراسیون مدل عددی

در این مقاله جهت بررسی صحت و سقم نتایج حاصل از مدل سازی عددی از نتایج آزمایشگاهی برداشت شده توسط پناه پور استفاده شده است و هنگامی که از صحت نتایج حاصل از مدل سازی عددی اطمینان حاصل شد به بررسی پدیده های حاکم بر الگوی جریان در قوس پرداخته می شود. پناه پور در سال ۲۰۰۴ با استفاده از دستگاه P-EMS اقدام به برداشت میدان سرعت در کانال مورد نظر نمود ۱۰.

### بررسی روند تغییرات پروفیل عرضی سرعت در طول قوس

در شکل ۳ پروفیل های عرضی سرعت محاسبه شده در طول قوس در صفحه نزدیک سطح آب برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است.



شکل ۳- پروفیل های سرعت طولی پیش بینی شده در صفحه نزدیک سطح آب

برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه

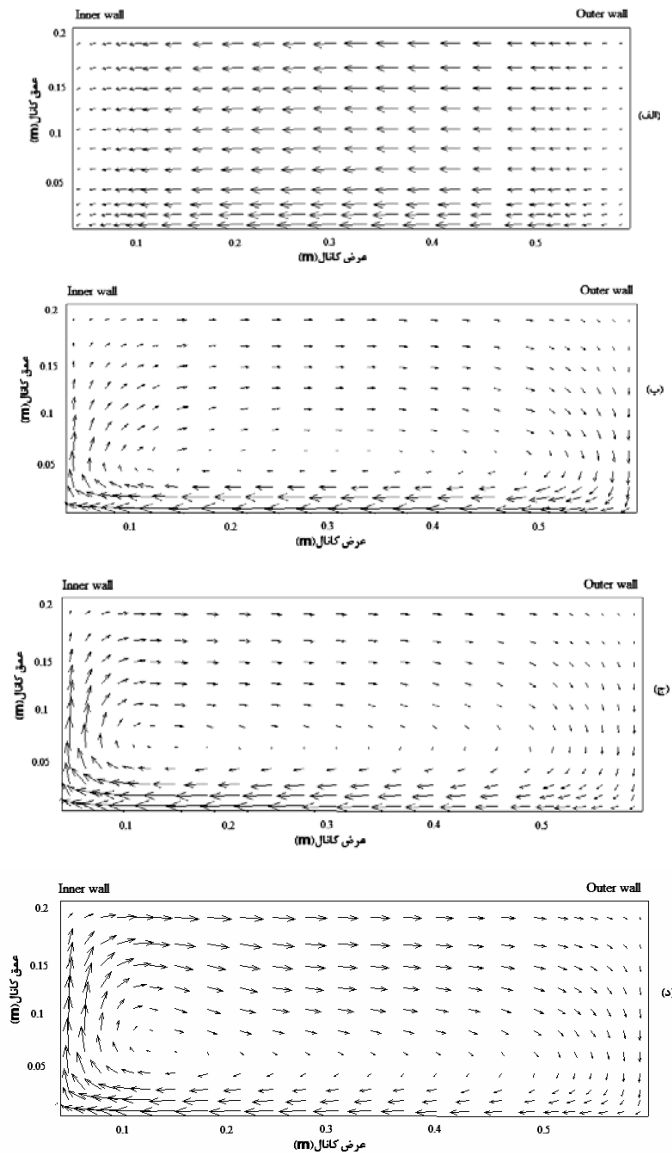
بررسی تغییرات سرعت در طول کانال در شکل ۳ نشان می دهد که با عبور جریان از ورودی قوس، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به نزدیک جداره داخلی کشیده می شود. علت این رفتار از آنجا ناشی می شود که با ورود جریان به قوس در اثر نیروی گریز از مرکز، در جداره خارجی سطح آب افزایش یافته و روند این افزایش نیز در طول کانال صعودی است. همین فرآیند به شکل معکوسی برای جداره داخلی کانال نیز رخ می دهد. لذا در نزدیکی جداره داخلی، گرادیان طولی فشار منفی بوده و باعث افزایش سرعت ذرات سیال در این ناحیه می شود. در نزدیکی جداره خارجی نیز به همین ترتیب، سرعت ذرات سیال در طول کانال کاهش می یابد. لذا در مقاطع ورودی، حداکثر سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می شود. با قدرت یافتن جریان ثانویه و شکل گیری جریان حلزونی در مقطع بعد از ۱۰ درجه، حداکثر سرعت از جداره داخلی فاصله گرفته و به سمت میانه کانال متمایل می شود. با پیشروی جریان در کانال، این روند ادامه داشته، تا جایی که جریان ثانویه بتواند بر گرادیان طولی فشار غلبه کند. در شکل ۳ دیده می شود که این پدیده در مقطع حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه رخ می دهد. در این مقطع جریان ثانویه با غلبه بر گرادیان طولی فشار، حداکثر سرعت در مقاطع را به سمت جداره خارجی کانال



منتقل می‌کند. همچنین با دقت در شکل ۳ به خوبی دیده می‌شود که در مقطع حدود ۵۰ تا ۹۰ درجه خط حداکثر سرعت در جداره خارجی کانال قرار گرفته و تا انتهای کانال تقریباً بدون تغییر می‌ماند. علت این امر آن است که پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی واقع در نیمه دوم قوس به حالت توسعه یافته رسیده و مقادیر سرعت بین دو مقطع تغییر چندانی ندارد. در هنگام خروج از قوس، تغییرات گرادیان طولی فشار برعکس آن چیزی است که در ورودی رخ می‌دهد در جداره خارجی، گرادیان طولی منفی است لذا سرعت سیال افزایش و در جداره داخلی گرادیان طولی مثبت و لذا سرعت سیال کاهش می‌یابد. لذا در این جا برخلاف پدیده حاکم ورودی قوس، تاثیر ناشی از گرادیان طولی فشار با تاثیر ناشی از جریان ثانویه که همچنان حداکثر سرعت را در سطح آب به سمت جداره خارجی کانال منتقل می‌کند، همسو شده و مسیر حداکثر سرعت در جداره خارجی کانال باقی می‌ماند.

#### بررسی توزیع بردارهای سرعت عرضی در مقاطع مختلف در طول کانال

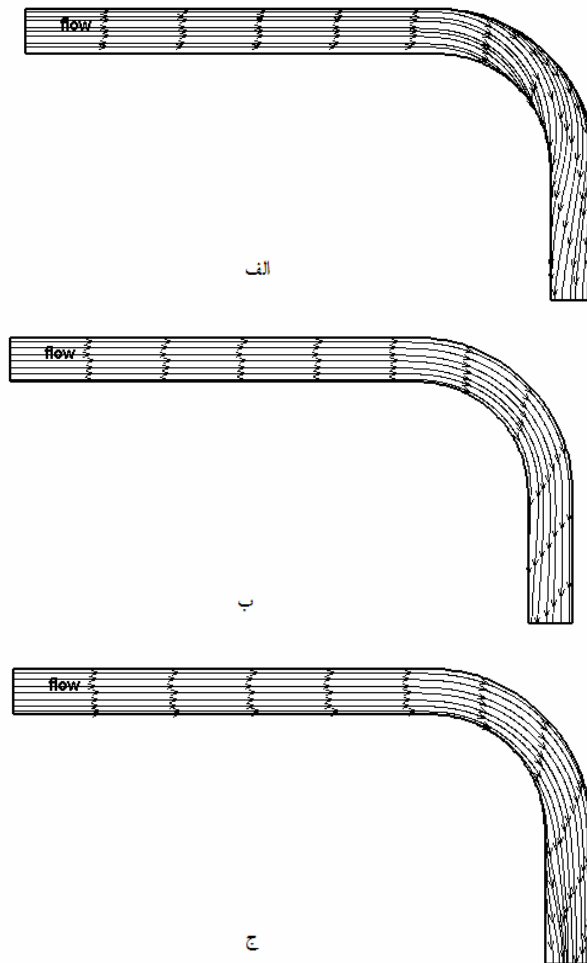
با ورود سیال به داخل قوس، ذرات سیال یک مسیر منحنی‌الشکل را طی می‌کنند. وجود مسیر منحنی‌الخط باعث شکل‌گیری نیروی گریز از مرکز خواهد شد. بر اثر اختلاف بین شدت این نیرو در جداره داخلی و خارجی قوس، جریان ثانویه شکل خواهد گرفت. شکل ۴ بردارهای جریان ثانویه را به ترتیب در مقاطع ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد در هر مقطع بردارها نشان دهنده برآیند مولفه‌های  $V$  و  $W$  سرعت که به ترتیب در جهت‌های شعاعی و قائم هستند می‌باشد. شکل ۴ نشان‌دهنده پدیده رشد و استهلاک جریان‌های حلزونی در طی فرآیند عبور جریان در کانال از (۰ تا ۹۰ درجه) را نشان می‌دهد. شکل (۴-الف) بردارهای سرعت را در مقطع ورودی قوس نشان می‌دهد. در این مقطع از جریان، یک جریان شعاعی (عرضی) یکسویه به سمت جداره داخلی غالب است و اثری از جریان ثانویه در آن دیده نمی‌شود زیرا در ورودی قوس، روند افزایش گرادیان طولی فشار در جدار خارجی و کاهش گرادیان طولی فشار به اندازه‌ای بزرگ است که سبب می‌شود سرعت ذرات سیال نزدیک جداره داخلی افزایش و در جداره خارجی کاهش پیدا کند بنابراین با توجه به لزوم برقراری پیوستگی جریان در مقاطع ورودی کانال، وجود چنین جریان شعاعی یکسویه‌ای الزامی است. بررسی الگوی جریان در ادامه کانال نشان می‌دهد که تا حدود مقطع عرضی ۱۰ درجه، این جریان یکسویه وجود داشته که در واقع نشان‌دهنده غلبه گرادیان فشار بر کل جریان حاکم در این بازه از کانال می‌باشد. بردارهای سرعت در نزدیک بستر نشان دهنده اختلاف گرادیان فشار در قوس داخلی و قوس خارجی می‌باشد در حالی که بردارهای سرعت در نزدیکی سطح آب نشان‌دهنده تاثیر جریان ثانویه بر روی جریان خواهند بود. با پیشروی جریان در کانال، نیروی گریز از مرکز، متاثر از انحنای قوس کم کم قدرت گرفته و سلول چرخشی جریان ثانویه شکل می‌گیرد. به این ترتیب که بردارهای نزدیک سطح آب به سمت قوس خارجی و بردارهای نزدیک بستر به سمت قوس داخلی حرکت می‌کنند. تا اینکه از مقطع حدود ۲۰-۳۰ درجه و با غلبه نسبی بر گرادیان طولی فشار، پدیده باز توزیع سرعت و انتقال جانبی ممتوم طولی رخ می‌دهد. شکل (۴-ب) نشان دهنده جریان چرخشی شکل گرفته در مقطع ۳۰ درجه است. در این مقطع، سلول چرخشی کامل شده و به صورت یک جریان چرخشی در کل مقطع عرضی خود را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۴-الف) و شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود که از بزرگی بردارهای عرضی سرعت در نزدیکی بستر کاسته شده و در مقابل بر بزرگی بردارهای سرعت عرضی در سطح آب افزوده شده است که این حقیقت نشان دهنده رشد جریان ثانویه در کانال می‌باشد اما سلول چرخشی شکل گرفته در موقعیت ۳۰ درجه متقارن نمی‌باشد و بردارهای سرعت در نزدیک بستر بزرگتر از بردارهای شکل گرفته در نزدیک سطح آب خواهند بود. با پیشروی در کانال در مقطع ۶۰ درجه مشاهده می‌گردد که سلول چرخشی شکل گرفته تقریباً متقارن خواهد بود و بزرگی بردارهای سرعت در نزدیکی سطح آب تقریباً مشابه بزرگی بردارهای سرعت در نزدیکی بستر می‌باشد که این امر نشان‌دهنده افزایش قدرت جریان ثانویه و غلبه آن بر گرادیان فشار می‌باشد. در مقطع خروجی قوس در زاویه ۹۰ درجه با توجه به بردارهای شکل گرفته در سطح آب دیده می‌شود که جریان ثانویه همچنان وجود داشته و از بین نرفته است. و تا فاصله‌ای بعد از قوس همچنان وجود دارد. رزوفسکی در سال (۱۹۵۷) از بین رفتن جریان چرخشی را به این معنا می‌داند که قدرت جریان چرخشی به ۱۰ درصد مقدار خود در خروجی قوس برسد ۹.



شکل ۴- بردارهای جریان ثانویه در مقاطع عرضی الف) ۰ درجه ب) ۳۰ درجه ج) ۶۰ درجه د) ۹۰ درجه

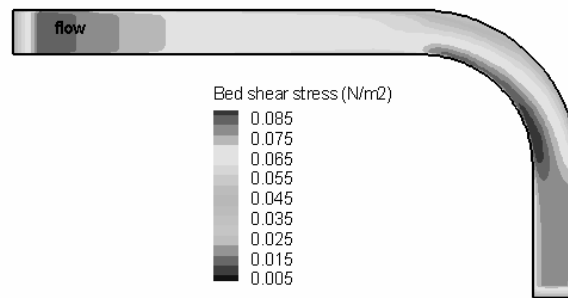
## بررسی خطوط جریان در طول کانال در ترازهای مختلف

شکل ۵ خطوط جریان در سه صفحه نزدیک بستر، عمق متوسط و صفحه نزدیک سطح آب را نشان می‌دهد. شکل (۵-الف) خطوط جریان در نزدیکی بستر را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود خطوط جریان در قوس به سمت جداره داخلی کانال منحرف می‌شود و ذراتی که وارد قوس می‌شوند در حدود زاویه ۳۰ درجه به جدار داخلی برخورد میکنند. در صفحه نزدیک بستر، ذرات جریان از انحنای قوس پیروی نمی‌کنند به بیان دیگر، خطوط جریان حالت مورب داشته و مسیر حرکت ذرات نزدیک بستر در امتداد شعاع قوس نمی‌باشد و لذا ذره برداشت شده از یک نقطه، در کنار دیوار داخلی مقاطع جلوتر به جدار کانال می‌رسند. شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که در صفحه عمق متوسط خطوط جریان تاثیر چندانی از جریان ثانویه نگرفته اند و تقریباً با تبعیت از انحنای کانال مسیر خود را طی می‌کنند. شکل (۵-ج) الگوی خطوط جریان در صفحه نزدیک سطح آب را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود خطوط جریان به سمت دیواره بیرونی کانال منحرف می‌شود به شکلی که ذراتی که از بالادست و از کنار دیواره داخلی شروع به حرکت کرده‌اند، در پایین دست به جداره بیرونی برخورد می‌کنند. نکته قابل توجه در خطوط جریان در صفحه نزدیک سطح آب، در مقایسه با صفحه نزدیک بستر این است که میزان انحراف ذرات در مقطع ورودی قوس در صفحه نزدیک بستر بسیار شدیدتر از ترازهای بالایی است. علت این پدیده وجود جریان یکسویه به طرف دیوار داخلی است که پیشتر در مورد آن به تفصیل بحث شد.



شکل ۵- نمایش خطوط جریان در الف) نزدیک بستر ب) عمق متوسط ج) نزدیک سطح آب

بررسی توزیع تنش برشی بستر در کف کانال  
بررسی توزیع تنش برشی در حالت بستر صلب می‌تواند تا حد زیادی به درک کیفی از الگوی فرسایش و رسوبگذاری در حالت بستر متحرک منجر شود. هرچند بررسی دقیق تغییرات تراز بستر نیاز به مدلسازی در حالت بستر متحرک دارد تا اندرکنش فاز رسوب و سیال همزمان مدلسازی شود. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌گردد که در بالا دست قوس تنش برشی ماکزیمم در میانه کانال قرار دارد ولی با ورود جریان به قوس ماکزیمم تنش برشی به سمت دیواره داخلی متمایل می‌گردد و با پیش روی در قوس به سمت میانه کانال و در در انتهای قوس به سمت دیواره خارجی متمایل می‌گردد. نحوه انتقال تنش برشی ماکزیمم به سمت جداره خارجی با الگوی شکل گیری و توسعه جریان ثانویه کاملاً سازگار می‌باشد.



شکل ۶- توزیع تنش برشی پیش‌بینی شده در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه

### نتیجه‌گیری

- ۱- بررسی تغییرات سرعت طولی 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.
- ۲- بررسی توزیع بردارهای سرعت عرضی در مقاطع عرضی در طول کانال نشان داد که در مقطع ورودی کانال یک جریان شعاعی یکسویه به سمت جدار داخلی غالب است. با پیشروی در کانال، از مقطع ۳۰ درجه سلول چرخشی کامل شده و به صورت یک جریان چرخشی در کل مقطع عرضی خود را نشان می‌دهد.
- ۳- بررسی خطوط جریان در ترازهای مختلف 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 می‌شوند.
- ۴- توزیع تنش برشی بستر در کف کانال وجود یک ناحیه پر تنش در نزدیکی جداره داخلی را نشان می‌دهد که در انتهای قوس به سمت قوس خارجی کشیده می‌شود.

### مراجع

1. Shukry, A. (1950)., Flow around bends in an open flume . Transactions, ASCE. 115
2. Blanckaert, K. and Walter H .Graf .,(2001) Mean flow and turbulence in open channel bend. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE, 127(10)
3. Rodi, W. and Leschziner A. (1978). Calculation of strongly curved open channel flow. Journal of the Hydraulic Division, 105(HY10).
4. Lien, H.C. et al.(1999). Bend flow simulation using 2D depth averaged model . Journal of Hydraulic Engineering , ASCE, 125:1097-1108
5. Booij, R. (2003). Measurements and large eddy simulation of some curved flumes. Journal of turbulence., 4(8)
6. Nils Ruther and B Olsen. (2005). Three dimensional modeling of sediment transport in a narrow 90 channel bend. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE, 131(10):917-920
7. Ciary ,C. (1976). On secondary currents 12<sup>th</sup> IAHR Congress, Fort Collins
8. Olsen, N. R. B.(2006). A three dimensional numerical model for simulation movement in water intakes with multiblock option. Department of hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of science and Technology
9. Rozovskii, I.L. 1957. Flow of water in bend of open channel. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering.
۱۰. پناه‌پور نیما، (۱۳۸۴) بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان اطراف آبشکن منفرد در خم ۹۰ درجه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس