

بیه‌سازی و مقایسه خصوصیات جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت و همگرا با استفاده از نرم‌افزار عددی سه‌بعدی SSIIM

یوسف حسن‌زاده*^۱، رسول قبادیان^۲ و کامران محمدی^۳
^۱استاد گروه مهندسی آب، دانشکده فنی - مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
^۲استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه
^۳دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

چکیده

در طبیعت، کمتر رودخانه‌ای به صورت مستقیم دیده می‌شود و بیشتر آنها پیچانوردی هستند. الگوی جریان در رودخانه‌های دارای پیچ و خم، بسیار پیچیده است و مکانیک جریان در قوس خصوصیات مشخصی دارد که در مسیرهای مستقیم دیده نمی‌شود. بنابراین استفاده از مدل‌های عددی بعنوان ابزاری کارآمد در پیش‌بینی چنین میدان‌های جریانی می‌تواند بسیار مفید باشد. از آنجا که تمام قوس‌های رودخانه‌های یکنواخت نیستند و ممکن است به صورت واگرا یا همگرا باشند، لذا در این تحقیق پس از کالیبره نمودن مدل ریاضی با استفاده از نتایج اندازه‌گیری روی یک قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت با پهنای ۰/۶ متر، یک قوس ۱۸۰ درجه مشابه ولی همگرا با عرض متغیر ۰/۶m به ۰/۴۵m توسط مدل عددی سه‌بعدی SSIIM شبیه‌سازی شد. خصوصیات جریان از جمله پروفیل‌های طولی و قائم سرعت، جریان‌های اصلی و ثانویه، شیب‌های طولی و عرضی سطح آب و همچنین قدرت جریان حلزونی در آن با قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌نماید. علاوه بر این در تحقیق حاضر مشخص شد که در کانال همگرا، مسیر سرعت حداکثر در صفحه نزدیک سطح آب، خط مرکزی کانال را با زاویه تقریبی ۳۰ تا ۴۰ درجه قطع می‌کند، در حالی که این مورد در قوس یکنواخت با زاویه حدود ۵۰ درجه رخ می‌دهد. محدوده تغییرات ارتفاع سطح آب در کانال همگرا بسیار بیشتر از کانال یکنواخت است و بطور کلی قدرت جریان حلزونی در کانال یکنواخت بیشتر از کانال همگرا می‌باشد. همچنین برخلاف قوس یکنواخت، در مقطع ۱۳۵ درجه قوس همگرا، سلول چرخشی خلاف جهت چرخش جریان ثانویه اصلی مشاهده نشد. **واژگان کلیدی:** شبیه‌سازی جریان، قوس ۱۸۰ درجه همگرا، مدل عددی سه‌بعدی.

۱- مقدمه

پروفیل قائم سرعت و ترکیب آن با انحنای جریان، تنش‌های برشی و گرادیان شعاعی فشار ایجاد شده بوسیله شیب جانبی سطح آب می‌باشند [۲]. تاثیر همزمان این نیروها جریانی را به نام جریان حلزونی (Helical Flow) بوجود می‌آورد. تاکنون مطالعات فراوانی به منظور مشخص نمودن خصوصیات و الگوی جریان در قوس‌های ۱۸۰ درجه با بستر صلب انجام شده است که شاید به عنوان ابتدایی‌ترین آنها بتوان به مطالعات مک مور در سال ۱۹۴۳ اشاره کرد که بدلیل صفر در نظر گرفتن مولفه شعاعی سرعت، اشکالاتی اساسی به تحقیقاتش وارد بود [۳]. Rozovski جزو اولین پژوهشگرانی بود که مطالعات جامعی را در این زمینه انجام داد. مهمترین نتیجه‌ای که وی بدست آورد این بود که نحوه توزیع سرعت متعلق به یک جریان سه‌بعدی بوده و یک مولفه سرعت نیز در جهت شعاعی موجود می‌باشد. Mosonyi و Gotz [۵] اولین کسانی بودند که در سال ۱۹۷۳ به چگونگی توزیع قدرت جریان حلزونی و تغییرات آن در طول کانال توجه کردند.

در طی قرن‌ها، رابطه جدایی ناپذیر بشر و رودخانه‌ها، انسان را ناگزیر به شناخت هرچه بهتر این عارضه طبیعی نموده است، که حاصل آن بوجود آمدن علوم بسیار گسترده و از آن جمله مهندسی رودخانه می‌باشد. از این جهت که رودخانه‌ها همواره به عنوان منبع آب، غذا، انرژی و همچنین به منظور حمل و نقل در خدمت جوامع بشری بوده‌اند، بررسی رفتار آنها بسیار مورد توجه بوده است. شبیه‌سازی الگوی جریان یکی از موضوعات بسیار مورد توجه در مهندسی رودخانه و مطالعات رسوبگذاری می‌باشد [۱]. از آنجا که در طبیعت کمتر رودخانه‌ای به صورت مستقیم دیده می‌شود و بیشتر آنها دارای پیچ و خم می‌باشند، پیش‌بینی رفتار رودخانه در قوس‌ها بیشتر اهمیت می‌یابد. الگوی جریان در رودخانه‌های Meander بسیار پیچیده است، به گونه‌ای که مکانیک جریان در قوس خصوصیات مشخصی دارد که در کانال‌های مستقیم دیده نمی‌شود. به طور کلی نیروهای موثر بر جریان در یک قوس، نیروی گریز از مرکز ناشی از عدم یکنواختی

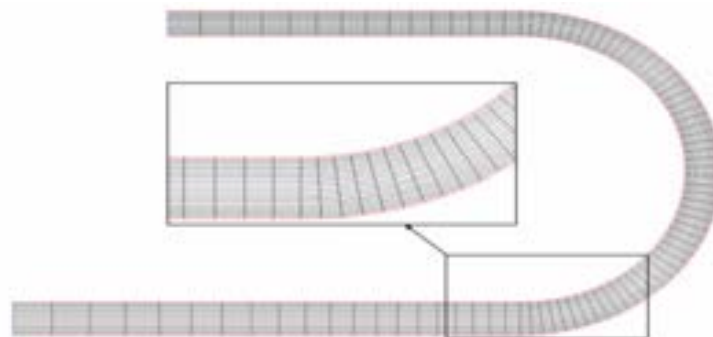
توان محاسباتی بسیار افزایش یافته و مدل‌های محاسباتی دینامیک سیالات نیز پیشرفت فراوانی نموده‌اند، به گونه‌ای که امروزه رقیب مناسبی برای مشاهدات آزمایشگاهی به حساب می‌آیند [۱۰]. منصوری [۳] به بررسی تکامل بستر در طی زمان در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه‌ای با مدل سه‌بعدی SSIIM پرداخت. بررسی تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که تا کنون تحقیقات صرفاً بر روی قوس ۱۸۰ درجه با پهنای یکنواخت انجام گرفته است، بنابراین در این تحقیق به منظور دسترسی به درک بهتر خصوصیات و الگوی جریان در قوس رودخانه‌ای ۱۸۰ درجه همگرا، میدان جریان بوسیله مدل عددی سه‌بعدی SSIIM شبیه‌سازی و با نتایج حاصل از قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت مورد مقایسه قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل عددی سه‌بعدی SSIIM

از مدل SSIIM برای انجام امور مهندسی رودخانه، محیط زیست، هیدرولیک، و رسوب استفاده می‌شود. این مدل، معادلات رینولدز و مدل آشفتگی $k - \epsilon$ را با استفاده از یک شبکه سه‌بعدی غیر متعامد جابجا نشده حل می‌کند. در این مدل برای منفصل‌سازی، روش حجم کنترل با استفاده از طرح قاعده توانی (Power Law) یا طرح جهتمند مرتبه دوم (Second Order Upwind) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. داده‌های ورودی و خروجی مدل توسط فایل‌های مشخصی به نرم‌افزار داده می‌شود که اصلی‌ترین آنها دو فایل Control و Koordina می‌باشد. در فایل Koordina مختصات هندسه شبکه بستر مورد مطالعه مشخص می‌شود. شکل (۱) قوس ۱۸۰ درجه همگرای مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد که دارای شبکه‌بندی $91 \times 19 \times 7$ به ترتیب در جهات طولی، عرضی و ارتفاعی می‌باشد.

این تحقیق نشان داد که جریان ثانویه را می‌توان به خوبی با تغییرات قدرت آن توصیف نمود. این محققین همچنین برای اولین بار از وجود چرخه دوم جریان ثانویه در نزدیکی قوس داخلی خبر دادند که فقط در نسبت‌های $(B/h < 1.0)$ رخ می‌دهد. در سال ۱۹۷۹ Rodi و Leschziner [۶] مدل عددی سه‌بعدی خود را با استفاده از روش تفاضلات محدود (Finite Differences) ارائه دادند. مهمترین نتیجه‌ای که این محققان گزارش نمودند تأثیر گرادیان طولی فشار بر الگوی جریان در قوس تند می‌باشد. Lien و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از ماتریس انتشار تنش، اثر جریان ثانویه را در معادلات متوسط‌گیری شده در عمق اعمال کردند و با مدل عددی دوبعدی خود به بررسی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه با بستر صلب پرداختند. در تحقیق آنها نحوه تأثیر جریان ثانویه بر محل پیدایش سرعت حداکثر در امتداد کانال مشخص شد. در سال ۲۰۰۳ Booij [۸] ساختار جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه را با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ مدل‌سازی کرد. مهمترین نکته تحقیق وی این بود که نشان داد مدل آشفتگی $k - \epsilon$ در مدل‌سازی چرخه خلاف جهت جریان ثانویه در نزدیک جداره بیرونی ناتوان می‌باشد. به هر حال نشان داده شده است که مدل استاندارد $k - \epsilon$ برای جریان‌های با کرنش متوسط قابل ملاحظه مانند نواحی چرخشی (مثلاً گوشه پائین اتصال دو کانال روباز- منظور چرخشی در پلان است) ضعیف عمل می‌کند. Yakhot و Smith [۹] نشان دادند که توسعه مدل $k - \epsilon$ استاندارد به وسیله تئوری RNG باعث اتلاف اغتشاش بیشتری در نواحی با کرنش بالا می‌شود به گونه‌ای که باعث کاهش لزجت گردابی و بهبود پیش‌بینی مدل در محل‌هایی که نواحی جداشدگی جریان ممکن است تشکیل شود می‌گردد. اولسن و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵ تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام داده‌اند. در حدود دو دهه اخیر



شکل ۱- نمونه شبکه بکار رفته در مطالعات

$$v_i = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

تعیین می‌کند که ε میزان استهلاک انرژی جنبشی خواهد بود [۱۱]. مقادیر k و ε به ترتیب توسط معادلات زیر بیان می‌گردند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{m u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

$$P_k = v_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

از قانون دیوار (Wall Law) برای مرزهای زبر به عنوان شرط مرزی در بستر و دیوارها استفاده می‌شود:

$$\frac{U}{U^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right) \quad (8)$$

که U سرعت جریان، U^* سرعت برشی، κ ثابت ون کارمن، y فاصله جدار تا مرکز سلول و k_s ارتفاع زبری جداره می‌باشد. به منظور محاسبه مقادیر فشار، معادله اندازه حرکت و فشار با استفاده از روش SIMPLE به همدیگر جفت شده‌اند. در این تحقیق به منظور محاسبه پروفیل سطح آب با مدل SSIIM شرط گرادین صفر برای ε ، انرژی جنبشی اغتشاش صفر و شرط تقارن برای سرعت جریان در سطح آب در نظر گرفته شده است. موقعیت سطح آب و جایجائی آن به عنوان تابعی از زمان و میدان جریان بوسیله فشار و الگوریتم برنولی محاسبه می‌شود:

$$\Delta h_{i,j} = \frac{1}{\rho g} (p_{i,j} - p_{ref}) \quad (9)$$

که در آن $\Delta h_{i,j}$ تغییرات عمودی سطح آب، $p_{i,j}$ فشار در هر سلول نزدیک سطح آب است که از مقادیر فشار سلول‌های زیرین برون‌یابی شده است و p_{ref} فشار مرجع می‌باشد که برای سلول ثابت در انتهای بازه در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است که شبکه مذکور در منبع [۳] به عنوان شبکه بهینه برای قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت (کانال دانشگاه تربیت مدرس) که نتایج اندازه‌گیری آن در این تحقیق برای صحت‌سنجی استفاده شد، معرفی شده است. هندسه میدان مورد مطالعه به گونه‌ای تعریف شده است که در نواحی نزدیک به دیواره به دلیل داشتن گرادین‌های شدیدتر، شبکه‌بندی ریزتری مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که خود نرم‌افزار SSIIM قادر به تولید فایل Koordina نیست و این فایل توسط برنامه‌ای به زبان VB نوشته شده است. در فایل Control نیز پارامترهای مورد نیاز مدل ارائه می‌گردد که با توجه به خواسته‌های کاربر قابل ویرایش است [۱۱].

۲-۲- مبانی ریاضی

معادلات ناویر- استوکس متوسط‌گیری شده در زمان (رینولدز) برای جریان‌های سیال غیرقابل تراکم لزج و آشفته شامل معادله پیوستگی (۱) و بقای مومنوم (۲) است که بصورت زیر نوشته می‌شوند [۱]:

$$\frac{dU_i}{dx_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{\partial x_i} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + \frac{f_i}{\rho} \quad (2)$$

که در آن U سرعت متوسط در طول بازه زمانی t x مقیاس هندسی مکانی، ρ چگالی آب، P فشار، δ_{ij} دلتای Kronecker و u' نوسانات سرعت در گام زمانی Δt می‌باشد. آخرین جمله داخل پرانتز در معادله (۲) شامل تنش‌های اغتشاشی می‌باشد که توسط تقریب بوسینسک مدل می‌شود:

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

که در آن k انرژی جنبشی اغتشاشی می‌باشد و توسط معادله (۴) محاسبه می‌گردد:

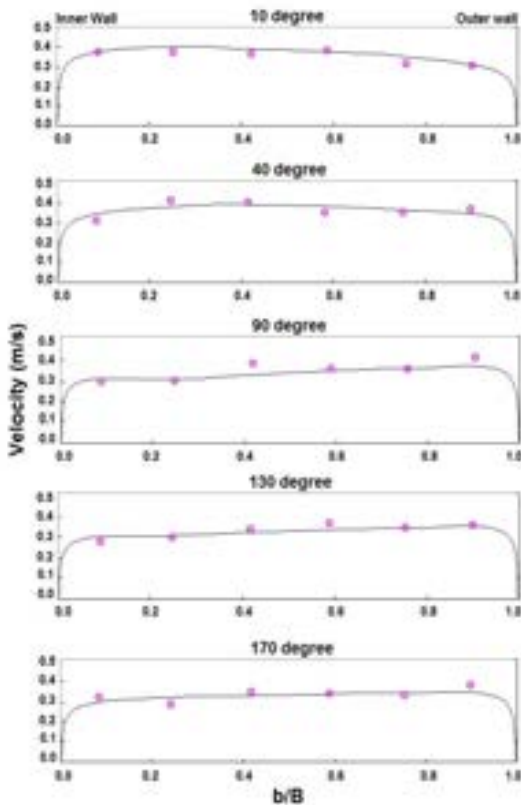
$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j} \quad (4)$$

در معادله (۳)، v_i لزجت گردابی اغتشاشی است که بوسیله مدل اغتشاشی تعیین می‌گردد. مدل $k - \varepsilon$ ، مدل اغتشاشی پیش‌فرض نرم‌افزار SSIIM است و مقدار v_i را بصورت:

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت سنجی مدل شبیه ساز سه بعدی

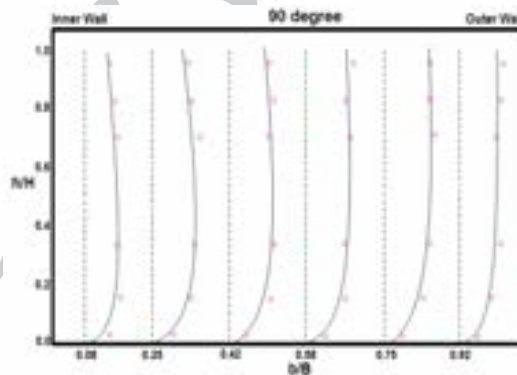
میدان مورد مطالعه، کانالی با قوس ۱۸۰ درجه است که در مطالعات آزمایشگاهی پیرستانی [۱۲] مورد استفاده قرار گرفته است. قوس مذکور دارای دو مسیر مستقیم به ترتیب با طول‌های ۷/۲ و ۵/۲ متر در بالادست و پایین دست خود می‌باشد. دیواره و بستر آن از جنس پلکسی گلاس با $k_s = 0.0001 \text{ m}$ است. بررسی الگوی جریان تحت دبی ۳۰ لیتر در ثانیه انجام شد و محدوده تغییرات عدد فرود در کانال یکنواخت $Fr=0.32$ تا $Fr=0.52$ می‌باشد. جهت صحت‌سنجی مدل سازی عددی، نتایج حاصل از مدل‌سازی در قوس با عرض یکنواخت 0.6 m با نتایج آزمایشگاهی پیرستانی [۱۲] مقایسه شده است که نتایج این صحت‌سنجی در شکل‌های (۲) تا (۴) ارائه شده‌اند.



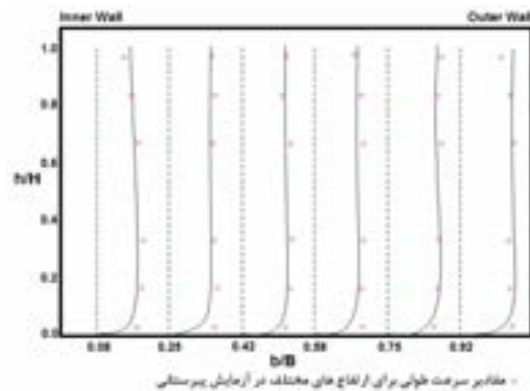
شکل ۴- مقایسه پروفیل‌های سرعت در صفحه نزدیک سطح آب ($h=0.145 \text{ m}$) در مقاطع عرضی مختلف با داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی [۱۲]

لازم به ذکر است که در مطالعات پیرستانی سرعت‌های جریان در ۹۱ مقطع و در عمق‌های مختلف با یک شبکه‌بندی (6×6) برای هر مقطع توسط یک دستگاه سرعت‌سنج دوبعدی دیجیتالی پیشرفته به نام PEMS متصل به کامپیوتر اندازه‌گیری شده است.

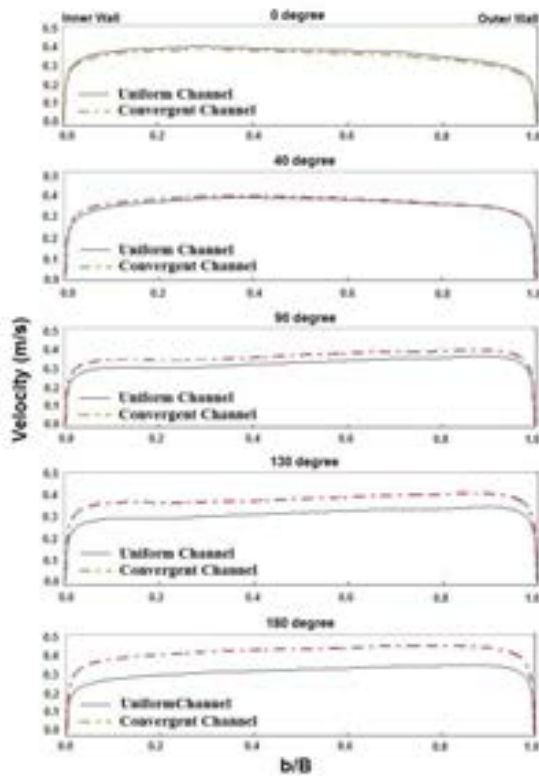
در مرحله صحت‌سنجی مدل آزمون عدم وابستگی به اندازه شبکه، انجام گردید. بدین صورت که اندازه شبکه از شبکه ریز $(351 \times 31 \times 15)$ تا شبکه درشت $(71 \times 12 \times 7)$ تغییر داده شد و مقادیر حداکثر و حداقل سرعت، فشار و انرژی جنبشی اختلاط مقایسه شد. درشت‌ترین شبکه‌ای که برای آن همه پارامترهای ذکر شده در محدوده ۱۰ درصد پارامترهای بدست آمده از حل شبکه ریز قرار داشته باشند، انتخاب شد. نهایتاً اندازه شبکه بهینه $91 \times 19 \times 7$ انتخاب شد. لازم به ذکر است که شبکه مذکور نیز در منبع [۳] به عنوان شبکه بهینه برای قوس یکنواخت مورد مطالعه معرفی شده است. علاوه بر این، ارتفاع سلول‌ها در جهت قائم متغیر در نظر گرفته شد. سلول‌های با



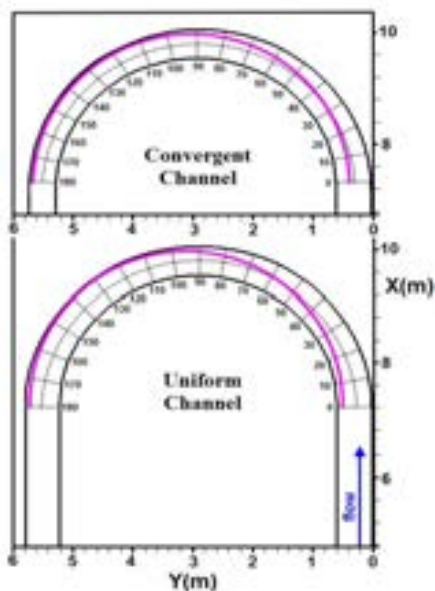
شکل ۲- مقایسه پروفیل قائم سرعت طولی با داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی [۱۲] در مقطع ۹۰ درجه، واقع در میانه قوس



شکل ۳- مقایسه پروفیل قائم سرعت طولی با داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی [۱۲] در مقطع ۱۸۰ درجه، واقع در انتهای قوس



شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های سرعت در صفحه نزدیک سطح آب ($h=0/145m$) در مقاطع عرضی مختلف بین کانال‌های یکنواخت و همگرا



شکل ۶- مقایسه خط مسیر وقوع سرعت حداکثر در صفحه نزدیک سطح آب ($h=0/145m$) بین کانال‌های یکنواخت و همگرا

ارتفاع کوچکتر نزدیک بستر انتخاب شدند. گام زمانی ۵ ثانیه نهایتاً برای محاسبات انتخاب گردید. از روش توانی (Power law) در منصل سازی جملات انتقالی استفاده شد. هر چند که روش upwind مرتبه ۲ نیز مورد آزمایش قرار گرفت ولی با وجود کاهش گام زمانی، ضرائب تخفیف، اصلاح بلوک و تغییر ارتفاع سلول‌های نزدیک بستر، با این روش منصل‌سازی میدان حل، همگرا نشد. محاسبات تا کاهش باقیمانده‌ها تا اندازه کافی ادامه داشت.

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب پروفیل قائم سرعت طولی اندازه‌گیری شده در منبع [۱۲] و محاسبه شده توسط مدل عددی در مقاطع ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه از شروع قوس را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۴) نیمرخ عرضی سرعت طولی در نزدیکی سطح آب در مقاطع مختلف در طول قوس ارائه شده است. پروفیل‌های سرعت محاسبه شده توسط مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی کاملاً همخوانی دارند، به عبارتی مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبه‌سازی می‌نماید.

۳-۲- مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت در قوس همگرا و یکنواخت

در این تحقیق، بمنظور مقایسه خصوصیات جریان در کانال‌های یکنواخت (Uniform Channel) و همگرا (Convergent Channel)، نتایج حاصل از کانالی همگرا با عرض متغیر $0/6m$ به $0/45m$ (تغییرات عرض بین ابتدا و انتهای قوس اعمال شده است) با کانالی با عرض یکنواخت $0/6m$ مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۵) می‌توان روند تغییرات پروفیل طولی سرعت در نزدیکی سطح آب را برای دو کانال یکنواخت و همگرا مشاهده کرد. در مقطع صفر درجه، پروفیل سرعت کانال همگرا سرعت‌های کمتری را نشان می‌دهد که بدلیل بالاتر بودن سطح آب در ابتدای قوس این کانال می‌باشد. در ادامه به بررسی این موضوع می‌پردازیم.

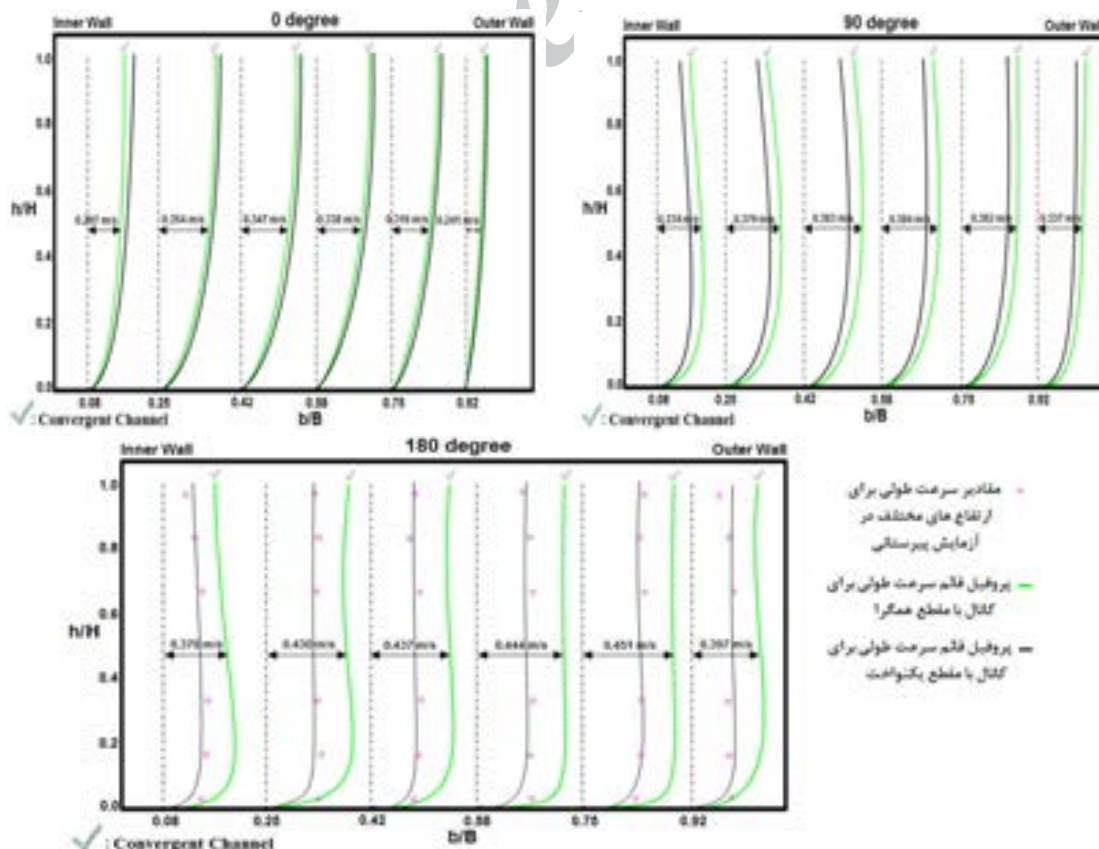
در بقیه مقاطع بواسطه تنگ شدگی، افزایش دبی در واحد عرض و زیر بحرانی بودن جریان، سرعت در کانال همگرا بیشتر از کانال یکنواخت است. همچنین پروفیل‌های طولی سرعت در هر دو کانال کاملاً هم‌شکل بوده و فرم ظاهری آنها یکسان است، به گونه‌ای که در ابتدای قوس، حداکثر سرعت طولی در کناره داخلی قوس رخ می‌دهد و با ورود به قوس، کم کم به سمت جدار خارجی متمایل می‌گردد. شکل (۶) مسیر وقوع حداکثر سرعت افقی در صفحه نزدیک سطح آب را نشان می‌دهد.

آب در ابتدای قوس ذکر کرد. همچنین حداکثر پروفیل قائم سرعت در فاصله ۰/۲۵ عرض از جدار داخلی کانال اتفاق می‌افتد و در فواصل بسیار نزدیک به جدارها سرعت‌ها کمترین مقادیر را به خود می‌گیرند. از طرفی بر خلاف مقطع صفر درجه، پروفیل‌های قائم سرعت در مقاطع ۹۰ و ۱۸۰ درجه کانال همگرا سرعت‌های بیشتری از کانال یکنواخت نشان می‌دهند که دلیل آن ناشی از کاهش پهنای مقطع و کاهش شدیدتر سطح آب می‌باشد (شکل ۹). از سوی دیگر با دقت در پروفیل‌های قائم سرعت می‌توان دریافت که در مقاطع ابتدایی قوس هسته پرسرعت جریان در نزدیکی سطح آب و جدار داخلی قوس قرار دارد، اما با ورود بیشتر به داخل قوس این هسته از حدود زاویه ۹۰ درجه به بعد به نزدیکی جدار خارجی و بستر جریان متمایل می‌گردد. همچنین مقادیر سرعت نزدیک به سطح آب در پروفیل‌های قائم نشان داده شده در این سه شکل به روشنی چگونگی رفتار پروفیل‌های سرعت در صفحه نزدیک سطح آب در شکل (۶) را آشکار می‌سازند.

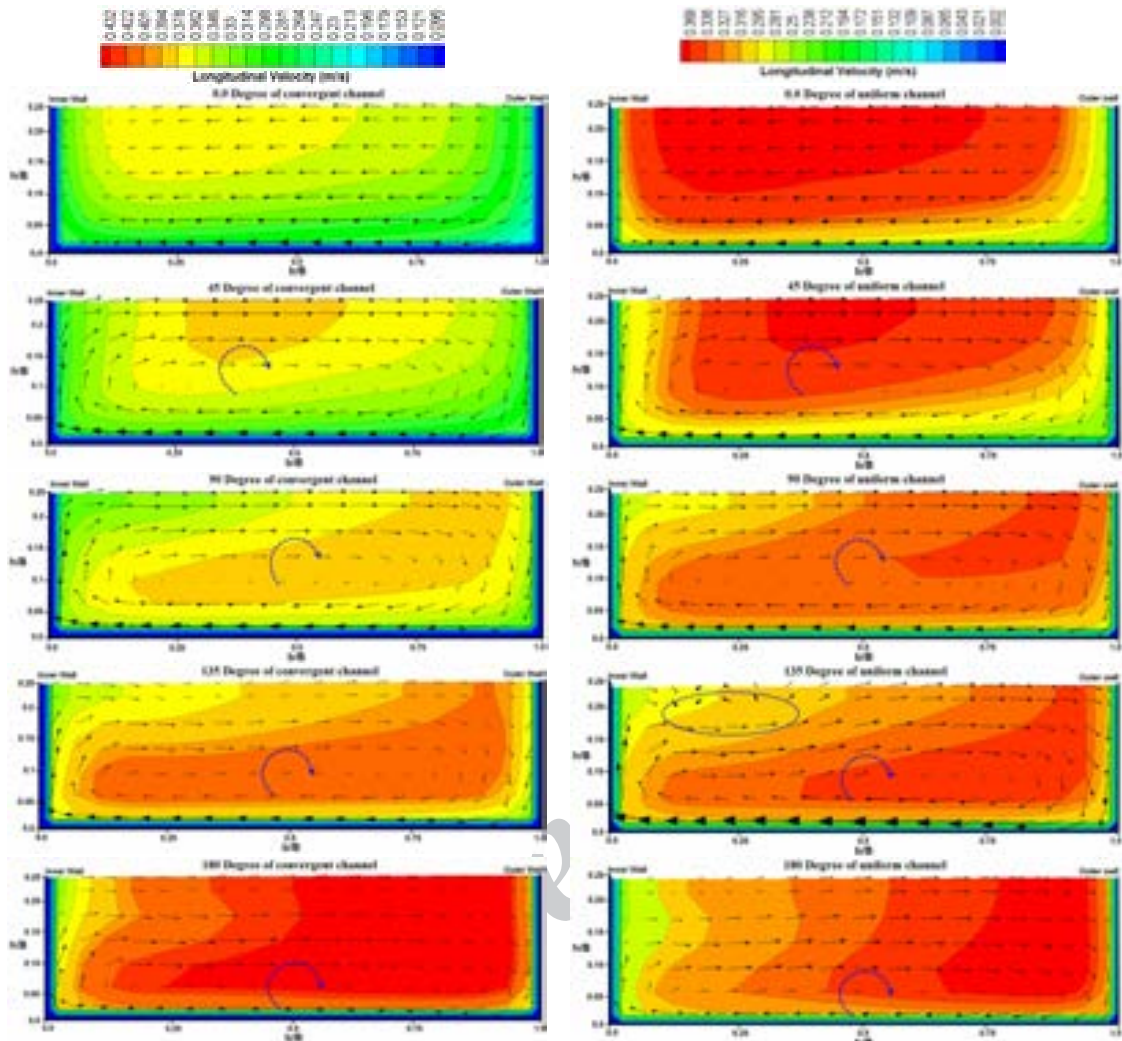
همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در کانال یکنواخت، سرعت حداکثر در حدود زاویه ۵۰ درجه، خط مرکزی کانال را قطع می‌نماید، در حالی که در کانال همگرا این مورد در حدود زاویه ۳۰ تا ۴۰ درجه رخ می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که در قوس همگرا، در فاصله کمتری از ابتدای قوس، غلبه نیروی گریز از مرکز بر میدان جریان افزایش می‌یابد و به عبارتی مانع از اثرگذاری گرادین طولی فشار گشته و سرعت حداکثر در فاصله نزدیکتری از شروع قوس به سمت جدار خارجی متمایل می‌شود. از طرفی در هر دو مورد، خط سرعت حداکثر در حدود زاویه ۱۰۰ درجه با جدار خارجی قوس مماس می‌شود و تا پایان قوس همین وضعیت باقی می‌ماند.

۳-۳- مقایسه پروفیل‌های قائم سرعت

بررسی پروفیل‌های قائم سرعت در سه مقطع ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه از ابتدای قوس در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد، در مقطع صفر درجه، پروفیل‌های قائم سرعت در کانال یکنواخت مقادیر بیشتری را نسبت به کانال همگرا نشان می‌دهند که دلیل آن را می‌توان بالاتر بودن سطح



شکل ۷- مقایسه پروفیل‌های قائم سرعت در مقاطع عرضی مختلف در قوس یکنواخت و همگرا



(ب) کانال با قوس همگرا

(الف) کانال با قوس یکنواخت

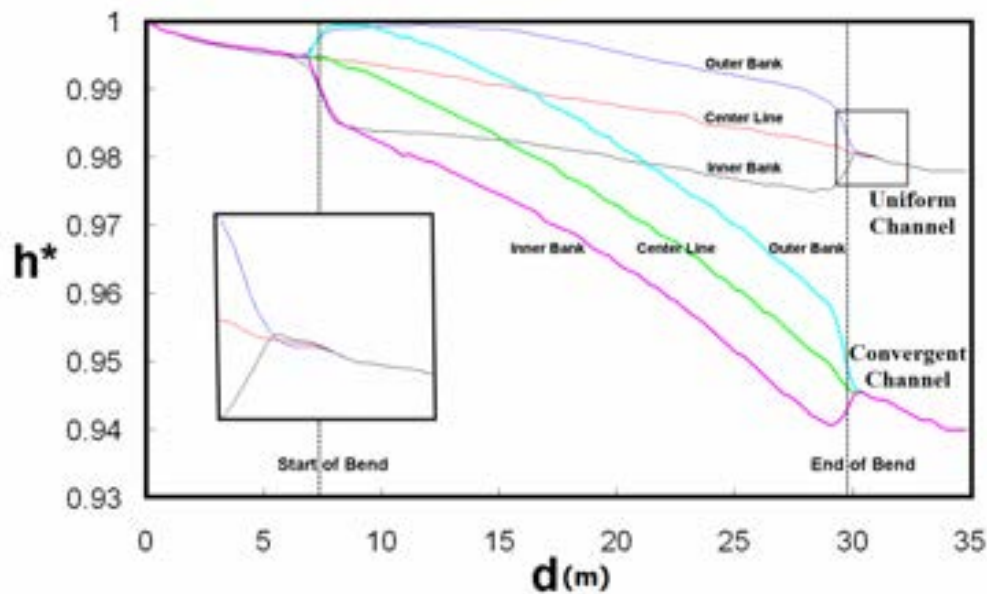
شکل ۸- مقایسه منحنی‌های هم سرعت و جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی مختلف در کانال‌های با قوس یکنواخت و همگرا

یکنواخت است. همچنین با نگاه دقیق‌تر به خطوط هم‌سرعت می‌توان به سادگی شکل و نحوه رفتار پروفیل‌های قائم سرعت در مقاطع عرضی مختلف موجود در شکل (۷) را توجیه نمود. به عنوان مثال در قسمت نزدیک جدار داخلی قوس ۹۰ درجه، هرچه به سطح آب نزدیک می‌شویم خطوط هم سرعت مقایر کمتری را نشان می‌دهند که نمایانگر کاهش سرعت طولی با افزایش فاصله از بستر کانال می‌باشد که این موضوع در شکل (۷) به خوبی مشاهده می‌گردد.

در قسمت جدار داخلی و نزدیک سطح آب مقطع ۱۳۵ درجه کانال با قوس یکنواخت، یک سلول چرخشی در خلاف جهت گردش جریان ثانویه مشاهده می‌گردد (قسمتی که در شکل با یک بیضی نشان داده شده است).

۳-۴- مقایسه جریان‌های ثانویه و خطوط هم‌سرعت در مقاطع عرضی مختلف

روند تغییرات جریان‌های ثانویه و خطوط هم‌سرعت برای مقاطع عرضی ۰، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه در قوس یکنواخت و همگرا در شکل (۸) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، شکل خطوط هم‌سرعت برای هر دو کانال تقریباً یکسان می‌باشد، به نحوی که هسته سرعت بیشینه بعد از ۹۰ درجه کاملاً به سمت جدار خارجی متمایل شده و تا پایان قوس در آن محل باقی می‌ماند، که این امر کاملاً مؤید داده‌های ارائه شده در شکل (۷) است. اما همانطور که انتظار می‌رفت، تغییرات و اندازه سرعت در کانال همگرا به علت تأثیرپذیری از تنگ‌شدگی، شدیدتر از تغییرات و اندازه سرعت در کانال



شکل ۹- روند تغییرات طولی سطح آب در جداره‌های داخلی و خارجی کانال‌های یکنواخت و همگرا
 d : فاصله از ابتدای کانال (برحسب m) و h^* : نسبت بی بعد ارتفاع آب (ارتفاع سطح آب به عمق آب در بالادست کانال)

یکنواخت تا حدود زاویه ۳۰ درجه، روند افزایش سطح آب در جدار خارجی مثبت می‌باشد و پس از آن شروع به کاهش می‌نماید و افزایش سطح آب در هر دو مورد بعد از آنجا به حدود صفر می‌رسد. اما چگونگی این روند تغییرات، به وضوح برای دو کانال متفاوت است بگونه‌ای که محدوده تغییرات ارتفاع سطح آب در کانال همگرا بسیار بیشتر از کانال یکنواخت است.

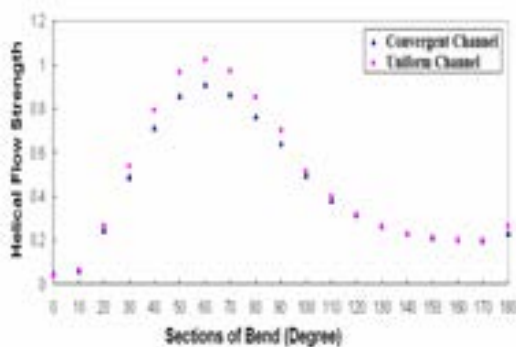
علت کاهش بیشتر ارتفاع سطح آب در کانال همگرا نسبت به کانال با قوس یکنواخت، تأثیرپذیری جریان از تنگ شدگی است. بدین صورت که با اعمال تنگ‌شدگی، دبی در واحد عرض افزایش یافته و با در نظر گرفتن نمودار انرژی مخصوص، عمق آب کاهش می‌یابد. با دقت در جریان پس از خروج از قوس در کانال یکنواخت، می‌توان تغییراتی نوسانی شکل را در سطح آب مشاهده کرد که دلیل آن اثر تبدیل شدن مسیر قوسی شکل به حالت مستقیم است (قسمتی که در شکل (۹) بزرگ شده است). این پدیده در قسمت خروجی قوس کانال همگرا مشاهده نشد. در شکل (۱۰) دیده می‌شود که اختلاف ارتفاع عرضی سطح آب، کمی قبل از شروع قوس تشکیل می‌شود. این اختلاف ارتفاع با ورود و خروج از قوس برای هر دو کانال به صورت جهشی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و کمی بعد از خروج از قوس نیز مجدداً به صفر می‌رسد. بطور کلی به دلیل نیروی گریز از مرکز بیشتر، اختلاف ارتفاع عرضی سطح آب در کانال همگرا بیشتر از کانال یکنواخت است.

در این ناحیه در یک سلول کوچک، بردارهای عرضی سرعت در خلاف جهت بردارهای سرعت سطح آب بین جدار خارجی و خط مرکزی کانال می‌باشد و بنابر جهت قراردادی مثبت خواهند بود. اما در مقطع ۱۳۵ درجه کانال همگرا، چنین سلول چرخشی که برخلاف جهت چرخش جریان ثانویه اصلی باشد مشاهده نمی‌گردد. بقیه خصوصیات جریان‌های ثانویه در مقاطع مختلف دو کانال تقریباً یکسان هستند، به شکلی که مرکز جریان ثانویه در مقطع ۴۵ درجه در ناحیه‌ای بین مرکز و جدار داخلی کانال قرار دارد و از حدود زاویه ۹۰ درجه به مرکز و کمی به سمت جدار خارجی متمایل می‌گردد و تا پایان قوس تقریباً در این محل باقی می‌ماند، با این تفاوت که با نزدیک شدن به نواحی خارجی قوس کم کم به سمت کف کانال نقل مکان می‌نماید.

۳-۵- مقایسه شیب‌های طولی و عرضی سطح آب و قدرت جریان حلزونی

شیب جانبی سطح آب در هر دو کانال (شکل (۹)) قبل از رسیدن به قوس شکل می‌گیرد. این پدیده به دلیل تغییر در جهت حرکت مومنوم طولی به واسطه ورود جریان به داخل قوس می‌باشد که موجب خواهد شد تا بازه کوتاهی قبل از ورودی قوس نیز تحت تأثیر قرار گیرد. سپس با رسیدن به قوس بدلیل اثر نیروی گریز از مرکز، سطح آب در جدار خارجی با تغییرات نسبی مثبت و در جدار داخلی با تغییرات نسبی منفی روبرو می‌شود. در کانال

در معادله (۹) برای کانال با قوس همگرا بیشتر بوده و در نتیجه ماکزیمم قدرت جریان حلزونی در کانال همگرا کمتر از یکنواخت می‌باشد.

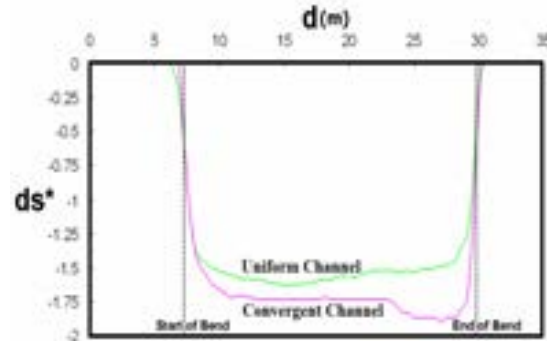


شکل ۱۱- تغییرات قدرت جریان حلزونی در طول قوس (دبی ۳۰ lit/s)

۳-۶- مقایسه چگونگی توزیع تنش برشی بستر

اگرچه بررسی تغییرات بستر نیاز به مطالعه توأم جریان سیال و رسوبات بستر و همچنین اندرکنش آنها دارد اما با در نظر گرفتن چگونگی توزیع تنش برشی کف، تا اندازه‌ای می‌توان الگوی فرسایش و رسوبگذاری را برای بسترهای متحرک پیش‌بینی کرد. با توجه به شکل (۱۲)، در هر دو کانال، یک ناحیه با تنش برشی بیشینه در قسمت خروجی قوس دیده می‌شود که در اندک زمانی پس از شروع آزمایش، شروع حرکت ذرات متحرک بستر از این نقطه خواهد بود [۳]. همچنین دهقانی و همکارانش نیز این موضوع را گزارش نموده‌اند [۱۳]. دلیل پیدایش چنین ناحیه با تنش بالا، گرادیان سرعت زیاد در این قسمت از کانال است که ناشی از جابجایی هسته پسرعت به طرف دیواره خارجی کانال و گسترش آن در صفحه نزدیک به بستر می‌باشد. این موضوع با نحوه تغییرات هسته پسرعت در مقطع ۱۸۰ درجه شکل (۸) به خوبی قابل تفسیر است.

همانطور که در شکل (۱۲) مشخص است در قسمت انتهایی قوس کانال همگرا و کانال مستقیم بعد از آن، تنش برشی مقادیر بیشتری را نسبت به همین ناحیه در کانال با قوس یکنواخت نشان می‌دهد و مقدار تنش برشی ماکزیمم در ناحیه پرتنش فوق‌الذکر در قوس همگرا بیشتر از قوس یکنواخت می‌باشد. علت این امر چیزی جز تأثیر گرفتن جریان از تنگ شدگی تدریجی کانال نیست، بدین صورت که به دلیل تنگ شدگی در این مقطع سرعت طولی جریان و به تبعیت از آن تنش برشی بستر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- تغییرات طولی اختلاف ارتفاع عرضی سطح آب (ds* بر حسب cm)

دلیل دیگر می‌تواند این باشد که جهت سرعت‌های ثانویه در نزدیک دیوار خارجی قوس از سطح آب به طرف کف بستر می‌باشد. این امر باعث پائین افتادگی سطح آب می‌شود، به عبارتی عملکرد آن در خلاف عملکرد نیروی گریز از مرکز است که باعث بالادگی سطح آب در دیوار خارجی خواهد شد. همانگونه که در ادامه گفته می‌شود جریان‌های ثانویه در قوس یکنواخت از قدرت بیشتری برخوردار هستند. بنابراین اختلاف ارتفاع عرضی سطح آب در قوس یکنواخت کمتر از قوس همگرا می‌باشد. از قدرت جریان حلزونی برای بررسی روند استهلاک جریان ثانویه در طول کانال استفاده می‌شود که Mosonyi و Gotz [۵] در سال ۱۹۷۳ این مفهوم را به صورت رابطه زیر تعریف کردند:

$$i_{sp} = \frac{\int v^2 dA}{\int u^2 dA} \quad (10)$$

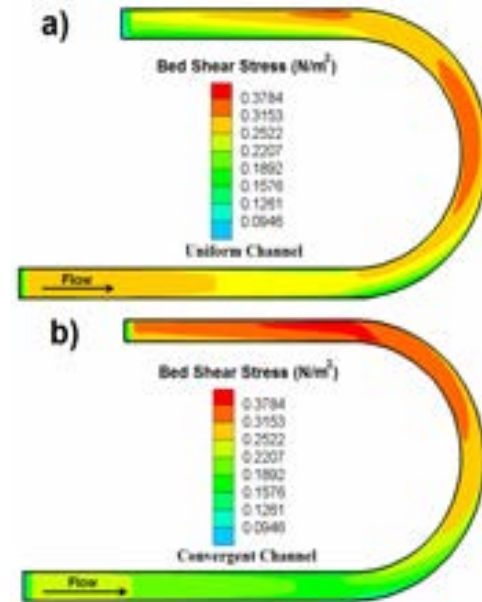
که در آن u و v مولفه‌های طولی و عرضی سرعت در سلول‌های مقطع مورد نظر و dA سطح مقطع هر یک از سلول‌های آن مقطع خواهد بود. برای انجام محاسبات قدرت جریان حلزونی، برنامه‌ای با زبان برنامه نویسی VB نوشته شد که نتایج خروجی این برنامه در شکل (۱۱) ارائه گردیده است.

با توجه به این شکل، قدرت جریان حلزونی در هر دو کانال در حدود زوایه ۶۰ درجه به حداکثر مقدار خود می‌رسد که این مقطع همان محدوده ایست که جریان ثانویه بر گرادیان طولی فشار غالب می‌شود و موجب انتقال عرضی مومنتوم طولی می‌گردد. پس از رشد جریان ثانویه و کامل شدن رشد آن در زاویه ۶۰ درجه، قدرت جریان حلزونی، روندی کاهشی به خود می‌گیرد. همچنین به دلیل بزرگتر بودن سرعت طولی کانال همگرا در طول قوس، مخرج کسر

است. بطور کلی به دلیل نیروی گریز از مرکز بیشتر در قوس همگرا و قدرت جریان ثانویه بیشتر در قوس یکنواخت، که عملکرد آنها در خلاف همدیگر است، اختلاف ارتفاع عرضی سطح آب در کانال همگرا بیشتر از کانال یکنواخت است. همچنین تغییرات و اندازه سرعت در کانال همگرا شدیدتر از تغییرات و اندازه سرعت در کانال یکنواخت است و در مقطع ۱۳۵ درجه کانال همگرا نیز سلول چرخشی خلاف جهت چرخش جریان ثانویه اصلی مشاهده نشد. در هر دو کانال یک ناحیه با تنش برشی بیشینه در قسمت خروجی قوس دیده می‌شود اما در قسمت انتهایی قوس کانال همگرا، تنش برشی مقادیر بیشتری را نسبت به همین ناحیه در کانال با قوس یکنواخت نشان می‌دهد و مقادیر تنش در هسته پر تنش این ناحیه از قوس، در کانال با قوس همگرا بیشتر از کانال با قوس یکنواخت است.

۵- مراجع

- [1] Ruther, N. "Computational fluid dynamics in fluvial sedimentation engineering", Norwegian University of Science and Technology, 2006.
- [2] Chow, V. T. "Open channel hydraulics." McGraw-Hill City 1959, Co., pp. 439-486.
- [3] منصوری، ا.ر.، "شبه‌سازی عددی سه‌بعدی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۳۸۵.
- [4] Rozovski, I. L. "Flow of water in bend of open channel", Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Hydrology and Hydraulic Engineering. 1957.
- [5] Mosonyi, E., and Gotz, W. "Secondary currents in subsequent model bends." International Symposium on River Mechanics, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1973, pp 191-201.
- [6] Leschziner, M. A., and Rodi, W. "Calculation of strongly curved open channel flow." Journal of Hydraulic Division, 1979, 105(10), 1297-1313.
- [7] Lien, H. C., Hsieh, T. Y., and J. C. Yang. "Bend-flow simulation using 2D depth averaged model." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(10), 1097-1108.
- [8] Booij, R. "Measurements and large eddy simulations of some curved flumes." Journal of Turbulence, 2003, 4(1), 8-16.



شکل ۱۲- مقایسه تنش‌های برشی کف برای دبی 30 lit/s در قوس‌های a- یکنواخت و b- همگرا

همچنین همانطور که قبلاً ذکر شد، محدوده تغییرات عدد فرود در طول کانال یکنواخت $Fr=0/32$ تا $Fr=0/52$ می‌باشد و در کانال همگرا این پارامتر از $Fr=0/3$ تا $Fr=0/59$ تغییر می‌کند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که پهنا و طول ناحیه با تنش برشی بالا در انتهایی قوس همگرا به شکل واضحی از پهنا و طول این ناحیه در کانال با قوس یکنواخت بیشتر است. دقت در چگونگی توزیع هسته پرسیعت در کف کانال و مقادیر سرعت در مقاطع مختلف این ناحیه در شکل (۸) نیز نشان می‌دهد که تغییرات مذکور در تنش برشی بستر برای کانال همگرا دور از ذهن نبوده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خصوصیات و الگوی جریان در دو قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت و همگرا با هم مقایسه شد. پروفیل‌های طولی سرعت در صفحه نزدیک سطح آب از زاویه ۳۰ درجه به بعد کانال همگرا مقادیر بیشتری را نسبت به کانال یکنواخت نشان می‌دهند و در کانال همگرا سرعت حداکثر، در صفحه نزدیک سطح آب $(h=0/145 \text{ m})$ معادل عمق بی بعد $(0/96)$ در حدود زاویه ۳۰ تا ۴۰ درجه خط مرکزی کانال را قطع می‌نماید. محدوده تغییرات طولی ارتفاع سطح آب در کانال همگرا بسیار بیشتر از کانال یکنواخت

- [۱۲] پیرستانی، م.ر. "بررسی الگوی جریان و آبستگي در دهانه ورودی آبگیر کانال‌های دارای انحنا"، رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تحقیقات و فن‌آوری، تهران. ۱۳۸۳.
- [۱۳] دهقانی، ا.ا. قدسیان، م. صالحی نیشابوری، س.ع.ا.، شفيعی‌فر، م. "بررسی شرایط جریان بر تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه"، مجله هیدرولیک. ۱۳۸۵.
- [9] Yakhot, v. and Smith, L. M. "The renormalization group, the \mathcal{E} - expansion and derivation of the turbulence models", Journal of scientific computing, 1992, 1, 1-51.
- [10] Lu, W. Z., Zhang, W. S., Cui, C. Z., and Leung, A. Y. T. "A numerical analysis of free surface flow in curved open channel with velocity-pressure-free-surface correction." Computational Mechanics 2004, 33, 215-224.
- [11] Olsen, N.R.B. "A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option." Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology; 2006.

Archive of SID