شبیه‌سازی عددی و مقایسه‌ی خصوصیات جریان در قوس‌های روباز ۱۸۰ درجه ی‌ی یکنواخت و واگرا با استفاده از نتایج مدل فیزیکی

رسول قبادیان[۱*]، کامران محمدی[۲] و علی حسین زاده دلیر[۳]

[*]۱- نویسنده مسئول: استادیار گروه مهندسی آب دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه رازی کرمانشاه rsghobadian@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۱۶

چکیده

کمتر رودخان های در طبیعت یافت می‌شود که به صورت مستقیم جریان داشته باشد و اغلب به صورت مئاندری هستند. الگوی جریان در رودخانه‌های مئاندری بسیار پیچیده بوده و مکانیک جریان در قوس رودخانه خصوصیات ویژه‌ای دارد که در مسیرهای مستقیم دیده نمی‌شود. مدل‌های عددی برای پیش‌بینی میدان جریان در این قبیل موارد به عنوان یک وسیله ی مؤثر همواره مورد استفاده قرار می‌گیرند. از انجا که در طبیعت همه ی قوس‌ها به صورت یکنواخت مشاهده نمی‌شود، در این تحقیق از مدل عددی سه بعدی SSIIM برای شبیه‌سازی دو قوس ۱۸۰ درجه ی یکنواخت (پهنای ۰/۶متر) و واگرا (پهنای ۰/۶ به ۰/۷۵ متر) استفاده شد. خصوصیات جریان از جمله پروفیل‌های طولی، قائم و عرضی سرعت، خطوط جریان، جریان های اصلی و ثانویه، شیب طولی و تنش برشی بستر در دو قوس مورد مقایسه قرار گرفت. صحت‌سنجی مدل عددی با داده های اندازه‌گیری شده در قوس ۱۸۰ درجه ی یکنواخت نشان داد که مدل به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که مسیر سرعت حداکثر در صفحه ی نزدیک سطح آب در حدود زاویه ی ۵۰ درجه ی خط مرکزی کانال را در قوس واگرا قطع می‌کند؛ در حالی که این اتفاق در زاویه ی حدود ۵۵ در جه در قوس یکنواخت رخ می‌دهد. خط حداکثر سرعت در کانال واگرا در حدود زاویه ی ۸۰ تا ۸۵ درجه ی با جدار خارجی قوس مماس می‌گردد اما این امر در کانال یکنواخت در حدود زاویه ی بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه ی رخ می‌دهد. هم‌چنین تغییرات سطح آب برای کانال یکنواخت روندی کاهشی (شیب طولی منفی) و برای کانال واگرا روندی افزایشی (شیب طولی مثبت) دارد. به دلیل کوچکتر بودن مؤلفه ی سرعت طولی قوس واگرا نسبت به یکنواخت، ماکزیمم قدرت جریان حلزونی در قوس یکنواخت به میزان ۱۰/۵۵ درصد کمتر از قوس واگرا می‌باشد؛ علاوه بر این، یک سلول چرخشی در خلاف جهت گردش جریان ثانویه در مقطع ۱۳۵ درجه ی هر دو قوس مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، قوس ۱۸۰ درجه ی واگرا، مدل عددی سه بعدی SSIIM.

مقدمه

مطالعه و شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و رسوب در قوس‌ها به روش‌های مختلف از دیرباز مورد توجه مهندسان علم هیدرولیک، مهندسی رودخانه و [۲]. به عنوان مثال نیروهای مؤثر بر جریان در یک قوس، نیروی گریز از مرکز ناشی از عدم یکنواختی پروفیل قائم سرعت و ترکیب ان با انحنای جریان، تنش‌های برشی و گرادیان شعاعی فشار ایجاد شده مطالعات رسوب‌گذاری بوده است [۱]. الگوی جریان در قوس کانال‌ها بسیار پیچیده است، به گونه‌ای که مکانیک جریان در قوس خصوصیات مشخصی دارد که در کانال‌های مستقیم دیده نمی‌شود به وسیله ی شیب جانبی سطح آب می‌باشند [۳] و تأثیر هم‌زمان این نیروها جریانی را به نام جریان حلزونی (Helical Flow) به وجود می‌آورد.

با توجه به اهمیت این موضوع نزد محققان، تا کنون مطالعات تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی فراوانی در این زمینه ارائه شده است که از ان میان می‌توان به مطالعات موسونی و گوتز اشاره کرد. ان ها اولین کسانی بودند که در سال ۱۹۷۳ به چگونگی توزیع قدرت جریان حلزونی و تغییرات ان در طول کانال توجه کردند. این تحقیق نشان داد که جریان ثانویه را می‌توان به خوبی با تغییرات قدرت ان توصیف نمود. این محققان همچنین برای اولین بار از وجود چرخه دوم جریان ثانویه در نزدیکی قوس داخلی خبر دادند که فقط در نسبت‌های ($B/h <$۱۰) رخ می‌دهد [۴]. در حدود دو تا سه دهه ی اخیر 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 می‌ایند [۵]. در سال ۱۹۷۹ لشیزنر و رودی مدل عددی سه بعدی خود را با استفاده از روش تفاضلات محدود شده (Finite Differences) ارائه دادند. مهم ترین نتیجه‌ای که این محققان گزارش نموده‌اند تأثیر گرادیان طولی فشار بر الگوی جریان در قوس تند می‌باشد [۶]. لین و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از ماتریس انتشار تنش، اثر جریان ثانویه را در معادلات متوسط گیری شده در عمق اعمال کردند و با مدل عددی دو بعدی خود به بررسی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه ی با بستر صلب پرداختند [۷]. در تحقیق ان ها نحوه ی تأثیر جریان ثانویه بر محل پیدایش سرعت حداکثر در امتداد کانال مشخص شد. در سال ۲۰۰۳ بوییچ ساختار جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه ی را با استفاده از روش گردآبه-های بزرگ مدل‌سازی کرد [۸]. مهم ترین نکته ی تحقیق بوییچ این بود که مدل اشفتگی $k-\varepsilon$ در نشد [۲]. واقفی و قدسیان در سال ۱۳۸۹به بررسی آزمایشگاهی تأثیر درصد تنگ شدگی مقطع کانال به دلیل استقرار آبشکن T شکل مستقر در زاویه ی ۷۵ مدل‌سازی چرخه خلاف جهت جریان ثانویه در نزدیک جداره ی بیرونی ناتوان می‌باشد. اولسن و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۵ جریان ثانویه و انتقال رسوب را در یک کانال ۹۰ درجه ی شبیه‌سازی کردند [۹]. هوانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ الگوریتمی را به صورت دو بعدی به منظور محاسبه ترم پخشیدگی در معادله ی انتقال رسوبات معلق ارائه دادند که به شکل قابل ملاحظه‌ای توانایی‌های مدل‌ای دو بعدی را در شبیه‌سازی جریان های ثانویه در قوس‌ها افزایش می‌دهد [۱۰]. قدسیان و واقفی در سال ۲۰۰۹ به صورت آزمایشگاهی الگوی جریان و چگونگی آبشستگی اطراف آبشکن T شکل را دریک قوس ۹۰ درجه مورد بررسی قرار دادند و مشخص کردند که میزان آبشستگی در بالادست آبشکن بسیار بیشتر از پایین‌دست ان است [۱۱]. وانگ و سوی نیز در سال ۲۰۱۰ با استفاده از تئوری جریان دو فازی به شبیه‌سازی نحوه ی رفتار تکه‌های یخ در قوس کانال‌ها پرداختند [۱۲]. ناجی‌آبهری و همکاران در سال ۲۰۱۰ الگوی جریان در یک قوس ۹۰ درجه ی با عرض ثابت و بستر صلب را بررسی و خصوصیات جریان از جمله نحوه ی تأثیر جریان ثانویه بر توزیع سرعت، مسیر حداکثر سرعت و ... را مورد مطالعه قرار دادند [۱۳]. منصوری و همکاران در سال ۱۳۸۵ به بررسی تکامل بستر در طی زمان در قوس ۱۸۰ درجه ی رودخانه ای با مدل سه بعدی SSIIM پرداختند [۱۴]. قبادیان و همکاران در سال ۱۳۸۸ مشخصه-های جریان در قوس ۱۸۰ درجه ی یکنواخت و همگرا را با استفاده از مدل عددی سه بعدی مورد بررسی قرار دادند که بر خلاف قوس یکنواخت، در مقطع ۱۳۵ درجه ی قوس همگرا سلول چرخشی خلاف جهت چرخش جریان ثانویه‌ی اصلی مشاهده درجه ی قوس ۹۰ درجه ی بر آبشستگی پیرامون آبشکن و تغییرات توپوگرافی مسیر مستقیم پایین-دست پرداختند. طبق نتایج به دست آمده در این

تحقیق، با افزایش میزان تنگ‌شدگی مقطع، تغییرات توپوگرافی و آبعاد چاله آبشستگی افزایش می‌یابد [۱۵]. با در نظر گرفتن تحقیقات قبلی، مطالعه نحوه ی رفتار آب و الگوی جریان در قوس‌های با پهنای متغیر ضروری به نظر می‌رسد. لذا در تحقیق حاضر برای درک بهتر از الگوی جریان در قوس‌ها، خصوصیات و نحوه ی رفتار جریان در کانال با قوس ۱۸۰ درجه ی یکنواخت و واگرا با استفاده از مدل عددی سه بعدی SSIIM شبیه‌سازی و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

مواد و روش ها

اشنایی با مدل شبیه‌ساز سه بعدی عددی SSIIM

از این برنامه امروزه برای انجام امور مهندسی رودخانه، محیط زیست، هیدرولیک، و رسوب استفاده می‌شود. این مدل در سال ۲۰۰۲ توسط اولسن و همکارانش در انستیتو تکنولوژی نروژ کامل شد و معادلات ناویر- استوکس و مدل اشفتگی $k-\varepsilon$ را با استفاده از یک شبکه ی سه بعدی غیر متعامد جا به جا نشده حل می‌کند. در این مدل برای منفصل-سازی، روش حجم کنترل با طرح قاعده توانی (Power Low) یا طرح جهتمند مرتبه دوم (Second Order Upwind) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. پارامترهای ورودی مدل توسط فایل‌های مشخصی به نرم‌افزار داده می‌شود که اصلی‌ترین ان ها دو فایل Control و Koordina است. در فایل Control پارامترهای مورد نیاز مدل ارائه می‌گردد که با توجه به خواسته‌های کاربر قابل ویرایش است [۹]. در فایل Koordina نیز مختصات هندسه ی شبکه ی بستر مورد مطالعه مشخص می‌شود. هندسه ی میدان مورد مطالعه در این تحقیق به گونه‌ای تعریف شده که در نواحی نزدیک به دیواره، که گرادیان ها شدیدتر می‌باشد، به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر شبکه ی‌بندی ریزتری مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که خود نرم افزار SSIIM قادر به تولید فایل هندسه ی شبکه ی بستر نیست و در تحقیق حاضر فایل Koordina توسط برنامه‌ای به زبان VB برای مدل تهیه شده است.

معادلات تحلیلی حاکم بر شرایط جریان

معادلات تحلیلی حاکم بر شرایط جریان همان معادلات ناویر- استوکس برای جریان های سیال غیر قابل تراکم لزج در حالت اشفته، شامل معادله ی پیوستگی (۱) و مومنتوم (۲) است که با فرض دائمی بودن جریان $(\partial/\partial t=0)$ و صرف نظر کردن از نوسانات جرم مخصوص $(\rho'=0)$ به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j)=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)= -\frac{\partial P}{\partial x_j}\delta_{ij}+\frac{\partial}{\partial x_j}\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u}_i'\overline{u}_j') \qquad (۲)$$

$$\delta_{ij}\begin{cases}1 & i=j\\ 0 & i\neq j\end{cases}$$

که U سرعت متوسط، ρ چگالی آب، P فشار کل، δ_{ij} دلتای کرونکر و جملات $(-\rho\overline{u}_i'\overline{u}_j')$ به عنوان تنش‌های رینولدزی شناخته می‌شوند. همان-گونه که گفته شد، اخرین ترم معادله ی (۲) شامل تنش‌های اغتشاشی رینولدزی می‌باشد، که این تنش‌ها توسط تقریب بوسینسک محاسبه می‌شوند:

$$\overline{u_i'u_j'}=\upsilon_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\delta_{ij} \qquad (۳)$$

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

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i' u_j'} = \frac{1}{2}(\overline{u_1'}^2 + \overline{u_2'}^2 + \overline{u_3'}^2) \quad (۴)$$

اکنون برای حل معادله ی (۳)، مسأله ی اصلی تعیین لزجت گردآبی اغتشاشی (υ_t) است که به-وسیله ی مدل اغتشاشی تعیین می‌گردد. به عبارتی مدل‌های اغتشاشی وظیفه ی تعیین لزجت گردآبی اغتشاشی را به عهده دارند. مدل $k-\varepsilon$، مدل اغتشاشی پیش فرض نرم افزار SSIIM است و مقدار υ_t را به صورت:

$$\upsilon_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۵)$$

تعیین می کند که ε میزان استهلاک انرژی جنبشی خواهد بود [۹]. همچنین برای متغیرهای موجود در مرزهای زبر، شرایط مرزی بوسیله ی قانون جداره ی (Wall Law) معین خواهد شد که به شکل زیر نشان داده می‌شود:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln(\frac{30y}{k_s}) \quad (۶)$$

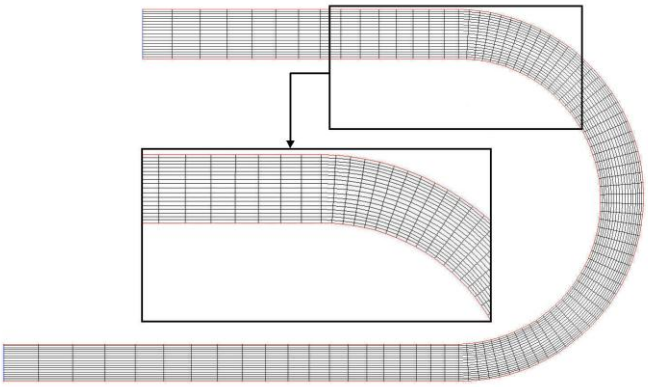
در این معادله ی U سرعت جریان، U* سرعت برشی، κ ثابت ون‌کارمن، y فاصله از جداره ی و k_s ارتفاع زبری جداره ی می‌باشد.

نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل به منظور شبیه سازی الگوی جریان

مبنای صحت‌سنجی مدل، کانالی آزمایشگاهی با قوس ۱۸۰ درجه ی است که در مطالعات آزمایشگاهی پیرستانی[۱۶] مورد استفاده قرار گرفته است. قوس مذکور دارای دو مسیر مستقیم به ترتیب با طول های ۷/۲ و ۵/۲ متر در بالادست و پایین دست خود می باشد. دیواره و بستر ان از جنس پلکسی گلاس با $k_s = ۰/۰۰۰۱\text{m}$ است. در مرحله ی صحت سنجی مدل ازمون عدم وآبستگی به اندازه شبکه ی، انجام گردید. بدین صورت که اندازه شبکه ی از شبکه ی ریز (۱۵×۳۱×۳۵۱) تا شبکه ی درشت((۷×۱۲×۷۱) تغییر داده شد و مقادیر حداکثر و حداقل سرعت ، فشار و انرژی جنبشی اختلاط مقایسه گشت. درشترین شبکه ی ای که برای ان همه ی پارامترهای ذکر شده در محدوده ی ی ۱۰ درصد پارامترهای به دست آمده از حل شبکه ی ریز قرار داشته باشند، انتخاب شد. نهایتاً اندازه شبکه ی بهینه ۷×۱۹×۹۱ انتخاب شد. لازم به ذکر است که شبکه ی مذکور نیز در منبع[۱۴] به عنوان شبکه ی بهینه برای قوس یکنواخت مورد مطالعه معرفی شده است. علاوه بر این ارتفاع سلول ها در جهت قائم متغیر در نظر گرفته شد. سلول های با ارتفاع کوچکتر نزدیک بستر انتخاب شدند. از روش توانی (Power law) در منفصل سازی جملات انتقالی استفاده شد. هر چند که روش جهتمند مرتبه‌ی ۲ (second order upwind) نیز مورد آزمایش قرار گرفت پروفیل های سرعت محاسبه شده به روش توانی و روش جهتمند مرتبه ۲ کاملاً بر هم منطبق بودند بنابراین برای ادامه کار از همان روش توانی که پیش فرض مدل می باشد استفاده گردید. محاسبات تا کاهش باقیمانده ها تا اندازه کافی ادامه داشت. گام زمانی ۲۰ ثانیه نهایتا برای محاسبات انتخاب گردید. شکل (۱) قوس۱۸۰ درجه ی مورد مطالعه در این مقاله را که دارای شبکه ی‌بندی ۷×۱۹×۹۱ به ترتیب در جهات طولی، عرضی و ارتفاعی می‌باشد نشان می‌دهد.

بررسی الگوی جریان تحت دبی ۳۰ لیتر در ثانیه انجام گرفته است و جهت صحت سنجی مدل سازی عددی، نتایج حاصل از مدل سازی در قوس



شکل (۱) نمونه شبکه ی مش به کار رفته در مطالعات (کانال واگرا)

با عرض یکنواخت ۰/۶m با نتایج آزمایشگاهی پیرستانی مقایسه شده است که نتایج این صحت سنجی در شکل های (۲) تا (۴) ارائه شده اند. این نتایج حاکی از ان است که پروفیل‌های سرعت محاسبه شده توسط مدل‌سازی عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی کاملاً هم‌خوانی دارند و مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌نماید و مدل به درستی کالیبره شده است. لازم به ذکر است که در مطالعات پیرستانی سرعت های جریان در ۹۱ مقطع و در عمق های مختلف با یک شبکه بندی (۶× ۶) برای هر مقطع توسط یک دستگاه سرعت سنج دو بعدی دیجیتالی پیشرفته به نام PEMS متصل به کامپیوتر توسط اندازه گیری شده است.

برای مقایسه آماری داده های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار SSIIM در مرحله ی صحت‌سنجی، از پارامترهای جذر میانگین مربعات خطا (Root Mean Squares of Error) و متوسط خطای مطلق (Mean Error) استفاده شده است که به ترتیب به صورت زیر تعریف می-شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}[(V_M)_i - (V_P)_i]^2} \qquad (۹)$$

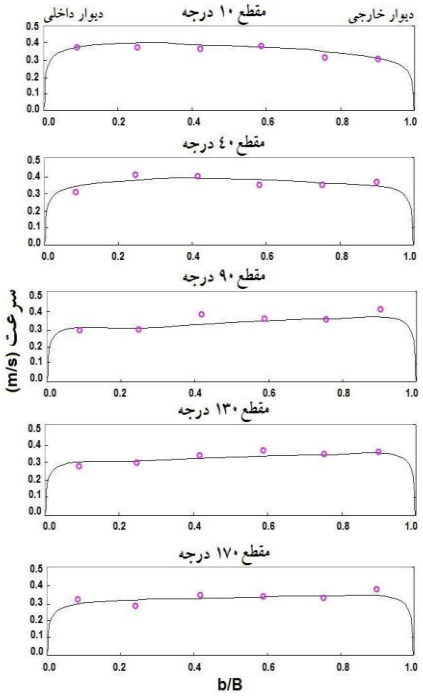
$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}[(V_M)_i - (V_P)_i] \qquad (۱۰)$$

در این فرمول‌ها N = تعداد داده‌ها یا، V_M = میزان سرعت اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و V_P = مقدار سرعت برآورد شده توسط نرم‌افزار SSIIM می‌باشند.

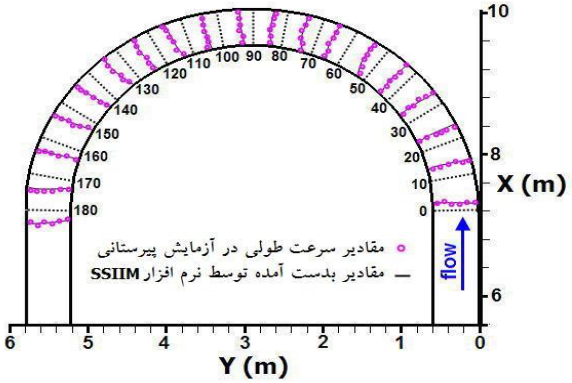
جدول (۱) نشان دهنده‌ی مقایسه آماری داده های آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار SSIIM در مرحله ی صحت‌سنجی است. اعداد به دست آمده برای RMSE و ME نیز حاکی از ان می‌باشند که مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌نماید.

جدول (۱) مقایسه ی آماری سرعت در صفحه ی نزدیک سطح آب در مقاطع عرضی مختلف قوس با مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار SSIIM

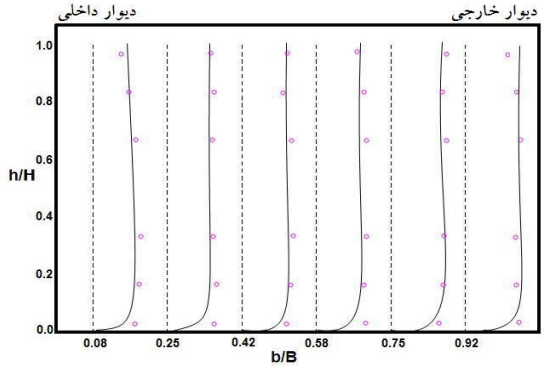
مقطع قوس	۱۰ درجه ی	۴۰ درجه ی	۹۰ درجه ی	۱۳۰ درجه ی	۱۷۰ درجه ی
RMSE	۰/۰۷۴۴۱	۰/۰۴۲۵۷	۰/۰۴۸۸۲	۰/۰۴۳۴۰	۰/۰۴۱۸۳
ME	-۰/۰۶۶۱۹	-۰/۰۰۹۵۰	۰/۰۱۸۳۳	۰/۰۱۵۰۰	۰/۰۱۱۶۷



شکل (۲) مقایسه ی پروفیل‌های سرعت در صفحه ی نزدیک سطح آب (h=۰/۱۴۵m) در مقاطع عرضی مختلف با داده های آزمایشگاهی

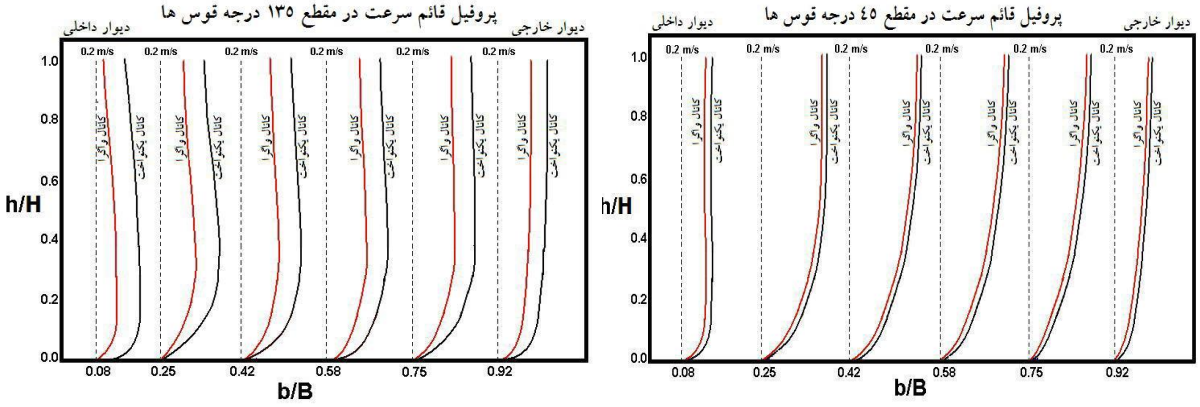


شکل (۳) مقایسه ی پروفیل‌های طولی سرعت در صفحه ی نزدیک سطح آب (h=۰/۱۴۵m) با داده های آزمایشگاهی



شکل (۴) مقایسه ی پروفیل قائم سرعت با داده های آزمایشگاهی در مقطع ۱۸۰ درجه ی

(B: عرض کانال، b: فاصله عرضی از جدار داخلی، H: عمق آب، h: ارتفاع از کف)



شکل (۵) مقایسه ی پروفیل‌های قائم سرعت در مقاطع عرضی مختلف در قوس یکنواخت و واگرا

بررسی پروفیل‌های قائم سرعت برای قوس‌های یکنواخت و واگرا

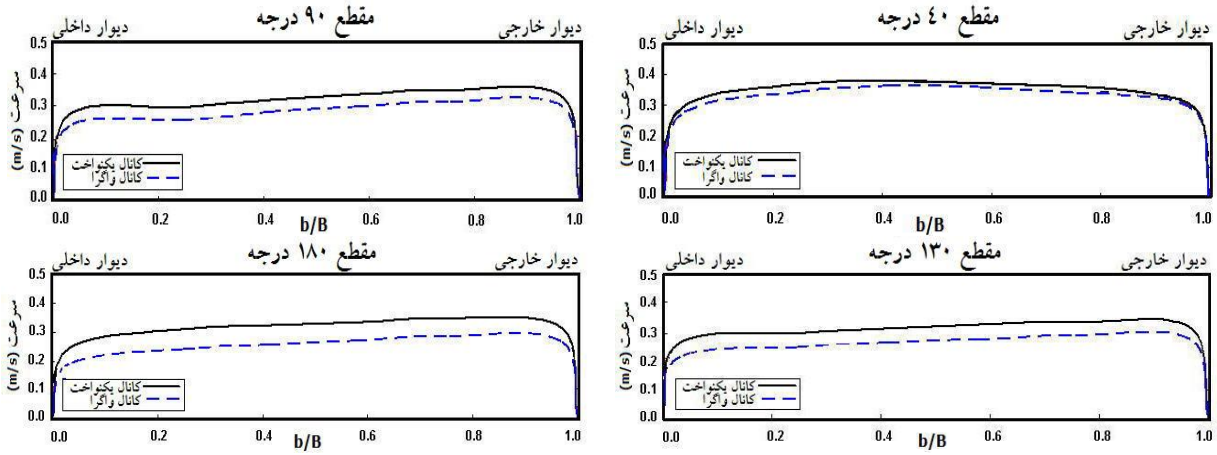
در این مقاله برای بررسی و مقایسه ی خصوصیات جریان در کانال‌های یکنواخت (Uniform Canal) و واگرا (Divergent Canal)، نتایج حاصل از کانالی واگرا با عرض متغیر ۰/۶m به ۰/۷۵m (تغییرات عرض بین آبتدا و انتهای قوس اعمال شده است)، و کانالی با عرض یکنواخت ۰/۶m مورد مقایسه ی قرار گرفته‌اند. پروفیل‌های قائم سرعت دو مقطع ۴۵ و ۱۳۵ درجه ی از ابتدای قوس مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتایج حاصل از ان در شکل (۵) قابل ملاحظه است. پروفیل‌های قائم سرعت در قوس واگرا برای مقطع ۴۵ درجه بین ۳ تا ۸ درصد و در مقطع ۱۳۵ درجه بین ۱۲ تا ۱۹ درصد مقادیر سرعت کمتری را نسبت به قوس یکنواخت نشان می‌دهند، چرا که در کانال واگرا به دلیل بازشدگی مقطع جریان سرعت کاهش می‌یابد، حال انکه تحقیقات قبلی انجام شده [۲] نشان داده که مقطع همگرا مقادیر سرعت بیشتری را نسبت به قوس یکنواخت نشان می‌دهد. علاوه بر این با فاصله گرفتن از ابتدای قوس، اختلاف پروفیل‌های قائم سرعت بیشتر می‌شود. تحقیقات قبلی انجام شده در منبع [۲] نشان داد که در مقاطع ابتدایی قوس هسته ی پر سرعت جریان در نزدیکی سطح آب قرار دارد، اما با ورود بیشتر به داخل قوس این هسته از حدود زاویه ی ۹۰ درجه ی به نزدیکی جدار خارجی و بستر جریان متمایل می‌گردد. با دقت در پروفیل‌های قائم سرعت در شکل (۵) نیز این موضوع تأیید

می‌گردد، به گونه‌ایی که حدوداً در نیمه اول قوس، مقادیر بیشینه سرعت در نزدیکی سطح آب رخ می-دهد اما در نیمه دوم قوس، بیشینه سرعت به سمت بستر کانال نقل مکان می‌نماید.

مقایسه ی پروفیل‌های طولی سرعت در صفحه ی نزدیک سطح آب، در داخل قوس

در شکل (۶) می‌توان روند تغییرات پروفیل طولی سرعت در نزدیک سطح آب را برای هر دو قوس-های مورد بررسی مشاهده کرد. در همه ی مقاطع نشان داده شده، به واسطه باز شدگی، کاهش دبی در واحد عرض و زیر بحرانی بودن جریان، سرعت در کانال واگرا کمتر از کانال یکنواخت است، به گونه‌ای که این اختلاف با افزایش درجه ی قوس افزایش می‌یابد. هم‌چنین پروفیل‌های طولی سرعت در هر دو کانال کاملاً هم‌شکل بوده و فرم ظاهری آن ها یکسان است، به گونه ای که در ابتدای قوس حداکثر سرعت طولی در کناره ی داخلی قوس رخ می‌دهد و با ورود به قوس به تدریج به سمت جدار خارجی متمایل می‌گردد و نهایتاً به طور کامل به جدار خارجی قوس مماس می گردد.

هم‌چنین جدول (۲) به مقایسه ی کمی تفاوت بین سرعت‌ها در قوس‌های یکنواخت و واگرا می‌پردازد. مشاهده می‌شود که در تمامی مقاطع مورد بررسی، در مجاورت قوس داخلی کاهش سرعت طولی بیشتری نسبت به قوس‌خارجی مشاهده می شود. این کاهش بیشتر سرعت در قوس داخلی نسبت به قوس خارجی تقریباً ثابت و در محدوده ی ۵ تا ۷ درصد می‌باشد و با عبور از ابتدای قوس تا انتهای ان تغییر محسوسی در ان رخ نمی‌دهد.



شکل (۶) مقایسه ی پروفیل‌های طولی سرعت در صفحه ی نزدیک سطح آب (h=۰/۱۴۵m) در مقاطع عرضی مختلف بین کانال‌های یکنواخت و واگرا

جدول (۲) درصد کاهش سرعت طولی در صفحه ی نزدیک سطح آب برای قوس واگرا نسبت به قوس یکنواخت

مقطع قوس	۴۰ درجه ی	۹۰ درجه ی	۱۳۰ درجه ی	۱۷۰ درجه ی
قوس داخلی	٪۸	٪۱۴	٪۱۹	٪۲۱
قوس خارجی	٪۳	٪۹	٪۱۲	٪۱۵

شکل (۷) نمایان‌گر مسیر وقوع حداکثر سرعت افقی در صفحه ی نزدیک سطح آب در دو قوس می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در کانال یکنواخت سرعت حداکثر در حدود زاویه ی ۵۵ درجه ی خط مرکزی کانال را قطع می‌نماید و در قوس واگرا نیز این موضوع در زاویه ی ۵۰ درجه ی اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که خط حداکثر سرعت در قوس واگرا به حالت تقریباً مستقیم محور کانال را قطع می‌نماید و در زاویه ی حدود ۸۰ درجه ی به دیوار خارجی مماس می‌گردد و تا اخر قوس این وضعیت را حفظ می‌کند. اما در قوس یکنواخت خط سرعت حداکثر در زاویه ی بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه ی با جدار خارجی قوس مماس می‌شود. در حالت کلی می‌توان گفت که مسیر سرعت حداکثر در صفحه ی نزدیک سطح آب در قوس واگرا زودتر محور کانال را قطع کرده و خود را به دیوار خارجی قوس می‌رساند؛ به عبارتی در قوس واگرا در فاصله ی کمتری از ابتدای قوس نیروی گریز از مرکز بر گرادیان طولی فشار غلبه می نماید.

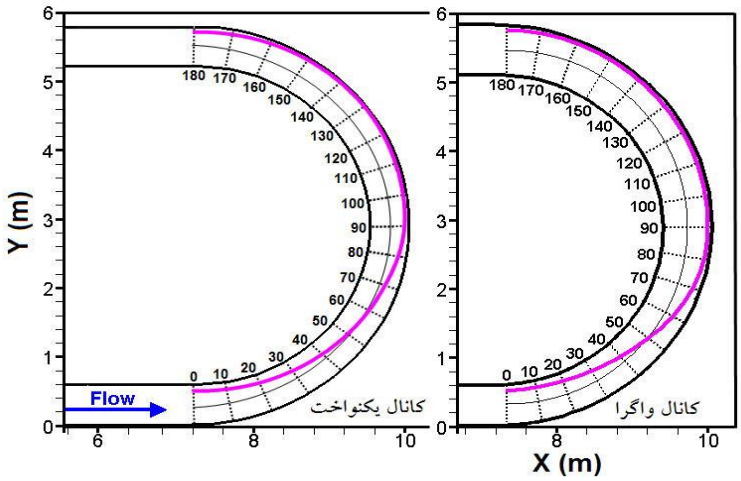
بررسی قدرت جریان حلزونی در طول قوس

مفهوم قدرت جریان حلزونی برای بررسی روند استهلاک جریان ثانویه در طول قوس کانال استفاده می‌شود که موسونی و گوتز (۱۹۷۳) ان را به صورت زیر تعریف کردند:

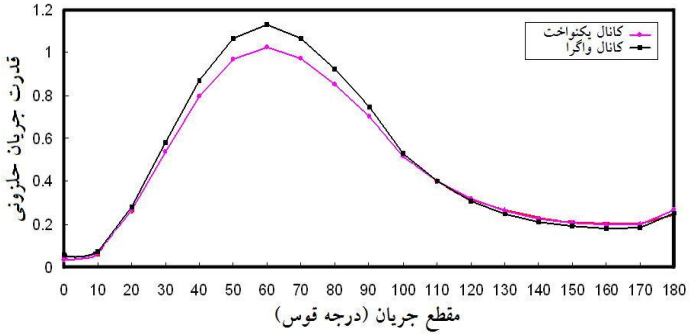
$$i_{SP} = \frac{\int v^2 dA}{\int u^2 dA} \qquad (۱۱)$$

که u و v به ترتیب مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت در سلول‌های مقطع مورد نظر و dA سطح مقطع هر یک از سلول‌های ان مقطع خواهد بود[۱۴]. برای محاسبه ی قدرت جریان حلزونی در قوس نیز برنامه‌ای با زبان VB نوشته شده است.

در شکل (۸) قدرت جریان حلزونی برای هر دو قوس نشان داده شده که در حدود زوایه ی ۶۰ درجه ی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از این رشد، قدرت جریان حلزونی حالتی نزولی به خود می‌گیرد. هم‌چنین ماکزیمم قدرت جریان حلزونی در کانال یکنواخت به میزان ۱۰/۵۵ درصد کمتر از کانال واگرا می‌باشد.



شکل (۷) مقایسه ی مسیر وقوع خط سرعت حداکثر در صفحه ی نزدیک سطح آب (h=۰/۱۴۵m) بین کانال‌های یکنواخت و واگرا



شکل (۸) تغییرات قدرت جریان حلزونی در طول قوس (دبی ۳۰lit/s)

بررسی کانتورهای سرعت و جریان های ثانویه در مقاطع عرضی داخل قوس

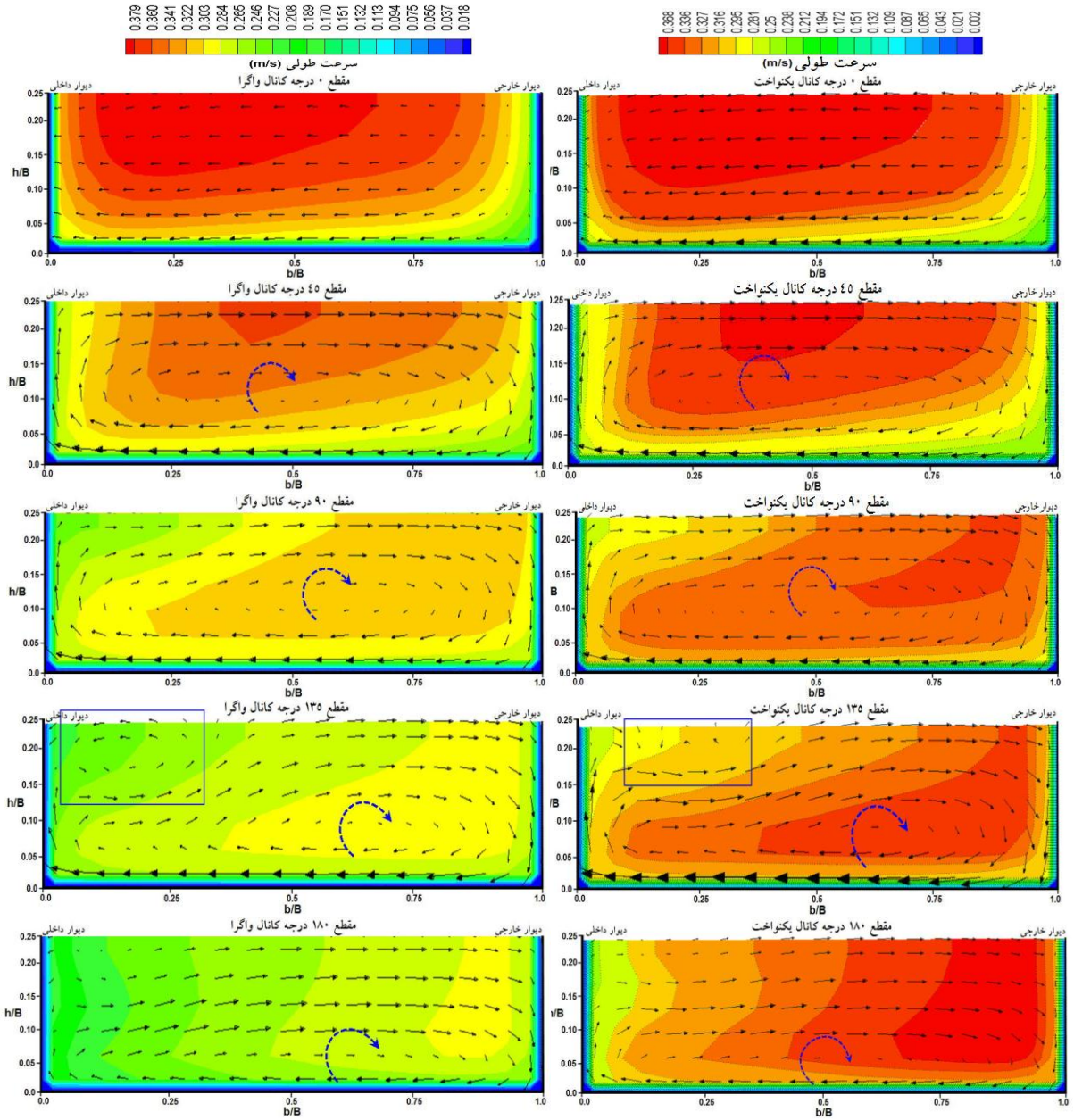
جریان های ثانویه و کانتورهای سرعت برای مقاطع عرضی ۰ ، ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ درجه ی در قوس یکنواخت و واگرا در شکل (۹) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اندازه ی سرعت در قوس واگرا به علت تأثیرپذیری از باز شدگی کمتر از اندازه ی سرعت در قوس یکنواخت است اما گستره ی تغییرات سرعت در کانال واگرا بزرگتر از کانال با عرض یکنواخت می‌باشد. کانتورهای سرعت برای هر دو قوس دارای شکل تقریباً یکسانی هستند، به نحوی که هسته پرسرعت بعد از ۹۰ درجه ی کاملاً به سمت جدار خارجی متمایل شده و تا پایان قوس در ان محل باقی می-ماند. هم چنین با نگاه دقیق تر به کانتورهای سرعت می‌توان به راحتی شکل و نحوه ی رفتار پروفیل-های قائم سرعت درمقاطع عرضی مختلف موجود در شکل (۵) را توجیه نمود. به عنوان مثال در قسمت مرکزی مقطع عرضی ۴۵ درجه ی، هرچه به سطح آب نزدیک می‌شویم کانتورهای سرعت رنگ‌های تیره‌تری را نشان می‌دهند که نشان دهنده ی افزایش سرعت در جهت عمودی و به سمت بالا می‌باشد و شکل (۵) نیز این مسئله را به خوبی تأیید می‌نماید.

در جدار داخلی و نزدیک سطح آب مقطع ۱۳۵ درجه ی کانال با قوس یکنواخت یک سلول چرخشی در خلاف جهت گردش جریان ثانویه مشاهده می‌گردد (قسمت‌هایی که در شکل (۹) با کادر مستطیلی نشان داده شده‌اند). در این ناحیه در یک سلول کوچک بردارهای عرضی سرعت در خلاف جهت بردارهای سرعت سطح آب بین جدار خارجی و خط مرکزی کانال می‌باشند. در مقطع ۱۳۵ درجه ی کانال واگرا نیز چنین سلول چرخشی که برخلاف جهت چرخش جریان ثانویه ی اصلی باشد مشاهده می‌شود با این تفاوت که در مقایسه ی باقوس یکنواخت توسعه یافته تر است. مرکز جریان ثانویه در مقطع ۴۵ درجه ی در ناحیه‌ای بین مرکز و جدار داخلی کانال قرار دارد و از حدود
زاویه ی ۹۰ درجه ی 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 تدریجاً به سمت کف کانال نقل مکان می‌نماید.

بررسی شیب طولی پروفیل سطح آب

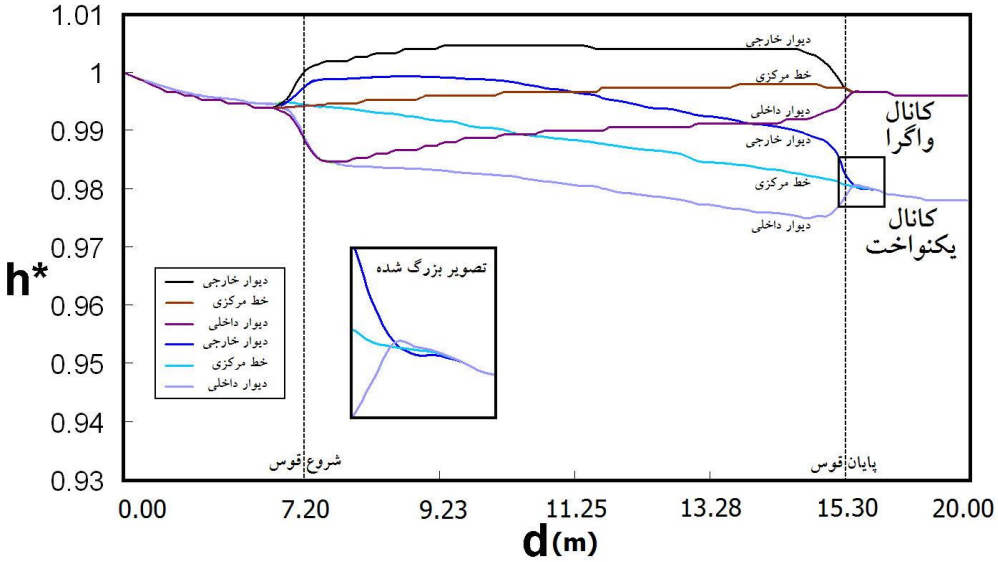
در شکل (۱۰) تغییرات شیب طولی سطح آب برای جدار بیرونی، خط مرکزی و جدار داخلی کانال نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است، تغییرات جانبی سطح آب در هر دو کانال قبل از

رسیدن به قوس شروع می‌شود. این پدیده به دلیل تغییر در جهت حرکت مومنتوم طولی به واسطه ی ورود جریان به داخل قوس می‌باشد [۲]
که موجب خواهد شد بازه ی کوتاهی قبل از ورودی قوس نیز تحت تأثیر قرار گیرد. سپس با رسیدن به قوس به دلیل اثر نیروی گریز از مرکز، سطح آب در جدار خارجی با تغییرات نسبی مثبت و در جدار داخلی با تغییرات نسبی منفی روبرو می‌شود.



الف) کانال با قوس یکنواخت ب) کانال با قوس واگرا

شکل (۹) مقایسه ی کانتورهای سرعت و جریان های ثانویه در مقاطع عرضی مختلف در کانال‌های با قوس یکنواخت و واگرا



شکل (۱۰) روند تغییرات طولی سطح آب در جداره ی‌های داخلی و خارجی کانال‌های یکنواخت و واگرا
(d: فاصله از ابتدای کانال (متر) و h*: نسبت بی بعد تراز سطح آب)

اما مسئله این جاست که چگونگی این روند تغییرات برای دو کانال متفاوت است. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد، تغییرات سطح برای قوس یکنواخت روندی کاهشی (شیب طولی منفی) و برای قوس واگرا روندی افزایشی (شیب طولی مثبت) دارد. به این معنی که با حرکت در جهت طولی کانال، سطح آب به طور کلی در جدار داخلی، خط مرکزی و جدار خارجی کانال یکنواخت دچار افت می‌گردد؛ در حالی که این پارامتر در قوس واگرا افزایش می‌یابد. علت این موضوع تأثیرگذاری بازشدگی مقطع کانال بر الگوی جریان است که طی ان در طول بازشدگی مقطع کانال دبی در واحد عرض کاهش یافته و با در نظر گرفتن نمودار انرژی مخصوص، عمق آب در کانال افزایش می‌یابد. در جدول (۳) درصد کاهش تراز سطح آب در مجاورت دیواره ی خارجی قوس یکنواخت در مقایسه ی با قوس واگرا ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود با فاصله گرفتن از ابتدای قوس درصد اختلاف تراز سطح آب در دو قوس مذکور افزایش می یابد.

هم‌چنین می‌توان پس از خروج از قوس کانال یکنواخت، تغییراتی نوسانی شکل را در سطح آب مشاهده کرد که دلیل ان اثر تبدیل شدن مسیر قوسی شکل به حالت مستقیم است [۲] و مسافتی لازم دارد تا مومنتوم جانبی ایجاد شده توسط هندسه ی کانال مستهلک گردد. همان گونه که در شکل (۱۰) نیز مشخص است، این پدیده در قسمت خروجی قوس کانال واگرا مشاهده نمی‌شود.

جدول (۳) درصد کاهش تراز آب در پروفیل طولی سطح آب برای دیواره ی خارجی قوس یکنواخت نسبت به قوس واگرا

درجه ی قوس	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۳۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۷۰	۱۸۰
کاهش تراز (٪)	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۰/۹	۱/۰	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۶

بررسی توزیع تنش برشی در بستر قوس‌ها

بررسی چگونگی تغییرات بستر نیاز به مطالعه ی توأم جریان سیال و رسوبات بستر و هم‌چنین اندرکنش آن ها دارد اما با در نظر گرفتن چگونگی توزیع تنش برشی کف، تا اندازه‌ای می‌توان الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری را برای بسترهای متحرک پیش‌بینی کرد.

تاکنون محققان بسیاری به بررسی تنش برشی بستر در قوس کانال‌ها پرداخته‌اند. از این میان می‌توان به کویپرز و ورودِن‌هیل (۱۹۷۳) اشاره کرد که با بررسی قوس‌های مختلف، معادلات زیر را برای محاسبه ی تنش برشی بستر در جهات x و y ارائه نموده‌اند [۱۷]:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{C^2}\overline{U}\sqrt{\overline{U}^2+\overline{V}^2} \qquad (۱۲)$$

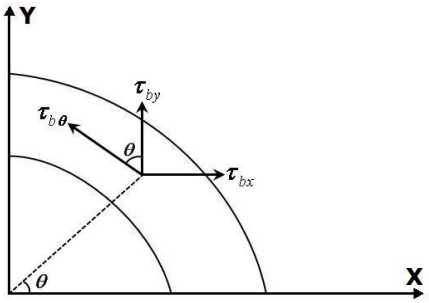
$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{C^2}\overline{V}\sqrt{\overline{U}^2+\overline{V}^2} \qquad (۱۲)$$

در این فرمول‌ها $\overline{U}$ و $\overline{V}$ به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهات x و y بر حسب متر بر ثانیه، هم‌چنین τ_{bx} و τ_{by} نیز به ترتیب تنش برشی بستر در جهات x و y می‌باشند. پس از محاسبه ی مؤلفه ی‌های تنش برشی بستر در جهات x و y ، مؤلفه ی طولی تنش برشی در راستای θ را می‌توان به کمک رابطه ی (۱۲) به دست آورد [۱۷]:

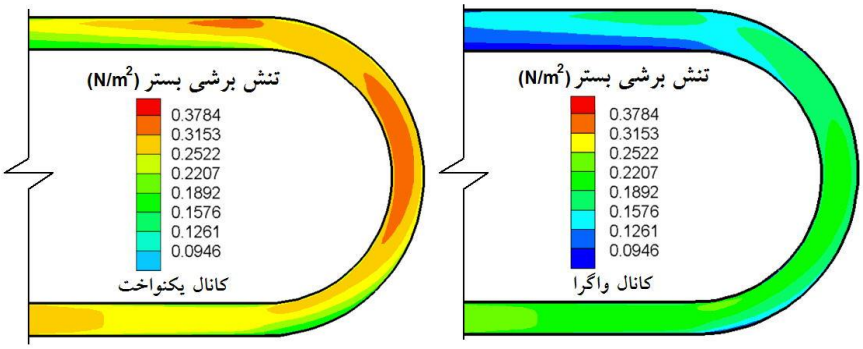
$$\tau_{b\theta} = \tau_{by}\cos\theta - \tau_{bx}\sin\theta \qquad (۱۴)$$

شکل (۱۲) تغییرات تنش برشی را در دو کانال با قوس یکنواخت و واگرا نشان می‌دهد. در کانال یکنواخت ناحیه‌ای با تنش برشی بیشینه در قسمت خروجی قوس دیده می‌شود که در اندک زمانی پس از شروع ازمایش، شروع حرکت ذرات متحرک بستر از این نقطه خواهد بود[۱۴]. هم‌چنین دهقانی و همکارانش نیز این موضوع را گزارش نموده‌اند [۱۸]. این ناحیه در کانال واگرا نیز موجود می‌باشد اما به دلیل افزایش سطح آب و کاهش شدید سرعت آب، تنش برشی در این ناحیه قابل ملاحظه نیست. دلیل پیدایش چنین ناحیه با تنش بالایی(بیشتر از ۰/۳ نیوتن بر متر مربع) در این ناحیه از کانال یکنواخت، گرادیان سرعت زیاد در این قسمت از کانال است که ناشی از جا به جایی هسته پر سرعت به طرف دیواره خارجی کانال و گسترش آن در صفحه ی نزدیک به بستر می‌باشد.

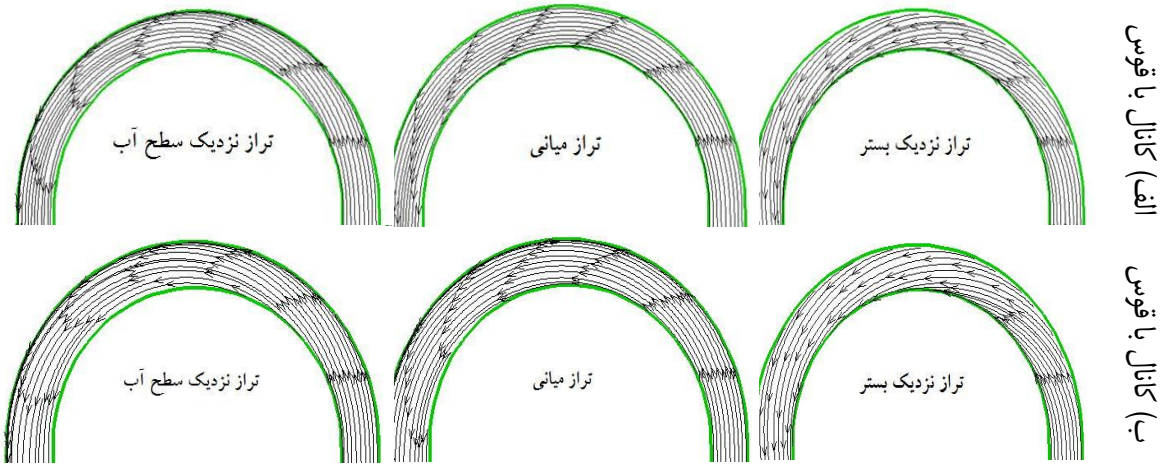
هم‌چنین ناحیه با تنش بالا که در قسمت میانی و نزدیک جدار داخلی در قوس باعرض یکنواخت مشاهده می‌گردد، در کانال با قوس واگرا مشاهده نمی‌شود.



شکل (۱۱) اجزای تنش برشی بستر برای یک قوس در مختصات کارتزین و قطبی



شکل (۱۲) مقایسه ی تنش های برشی کف برای دبی ۳۰lit/s در قوس‌های یکنواخت و واگرا



شکل (۱۳) مقایسه ی خطوط جریان در صفحه ی نزدیک سطح آب، عمق متوسط، و نزدیک بستر در قوس‌های یکنواخت و واگرا

بررسی خطوط جریان در ترازهای افقی مختلف در طول کانال

شکل (۱۳) نشان می‌دهد که الگوی خطوط جریان برای هر دو کانال شکل یکسانی دارند؛ با این تفاوت که به دلیل بازشدگی تدریجی مقطع کانال هرچه به سمت خروجی قوس نزدیک می‌شویم خطوط جریان از هم فاصله گرفته و دارای تراکم کمتری می‌باشند که نشان دهنده ی کاهش دبی در واحد عرض است. در صفحه ی نزدیک بستر، الگوی خطوط جریان انحراف شدیدی را به سمت جدار داخلی قوس نشان می‌دهد و ذرات جریان از قوس پیروی نمی‌کنند. میزان انحراف ذرات در صفحه ی نزدیک بستر در ورودی قوس بیشتر از صفحه ی نزدیک سطح آب می‌باشد که دلیل ان وجود جریان یک-طرفه به سمت جدار داخلی در بستر کانال و بیشتر بودن شدت جریان ثانویه در ترازهای پایین‌تر جریان نسبت به ترازهای بالاتر است. الگوی خطوط جریان در صفحه ی عمق متوسط این کانال تأثیر چندانی از جریان ثانویه نگرفته و از انحنای ان پیروی می-کند. مسیر خطوط جریان در صفحه ی نزدیک سطح آب به سمت دیواره خارجی کانال تمایل دارد. ذرات آب از جدار داخلی ورودی قوس شروع به حرکت می‌نمایند، به سمت جدار خارجی حرکت کرده و نهایتاً در پایین‌دست به دیواره بیرونی کانال برخورد می‌کند [۲].

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر آبتدا الگوی جریان در دو کانال با قوس ۱۸۰ درجه ی یکنواخت و واگرا شبیه‌سازی و سپس با هم مقایسه ی شدند. پروفیل‌های طولی سرعت در هر دو کانال کاملاً هم شکل بوده و فرم ظاهری ان ها یکسان است. در تمامی مقاطع مورد بررسی، قوس داخلی کاهش سرعت طولی بیشتری را نسبت به قوس خارجی از خود نشان می‌دهند. این کاهش بیشتر سرعت در قوس خارجی نسبت به قوس داخلی تقریباً ثابت و حدوداً ۵ تا ۷ درصد است. به دلیل کوچکتر بودن مؤلفه ی سرعت طولی قوس واگرا نسبت به یکنواخت، ماکزیمم قدرت جریان حلزونی در کانال یکنواخت به میزان ۱۰/۵۵ درصد کمتر از کانال واگرا می‌باشد. در مقطع ۱۳۵ درجه ی کانال واگرا نیز سلول چرخشی که برخلاف جهت چرخش جریان ثانویه ی اصلی باشد مشاهده می‌شود و توسعه یافته تر می باشد. مسیر سرعت حداکثر در صفحه ی نزدیک سطح آب در حدود زاویه ی ۵۰ درجه ی خط مرکزی کانال را در قوس واگرا قطع می‌نماید؛ در حالی که این اتفاق در حدود زاویه ی ۵۵ درجه ی در قوس یکنواخت رخ می‌دهد. خط سرعت حداکثر در قوس واگرا در حدود زاویه ی ۸۰ درجه ی قوس با جدار خارجی مماس می‌گردد، اما در قوس با عرض یکنواخت خط سرعت حداکثر در حدود زاویه ی بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه ی با جدار خارجی قوس مماس می‌شود و تا پایان قوس در همین حالت باقی می‌ماند. تغییرات سطح آب برای کانال یکنواخت روندی کاهشی (شیب طولی منفی) و برای کانال واگرا روندی افزایشی (شیب طولی مثبت) دارد. به این معنی که با حرکت در جهت طولی کانال، سطح آب به طور کلی در جدار داخلی، خط مرکزی و جدار خارجی کانال یکنواخت دچار افت می‌گردد؛ در حالی که این پارامتر در کانال واگرا افزایش می‌یابد. محدوده ی کاهش تراز آب در پروفیل طولی سطح آب برای دیواره ی خارجی قوس یکنواخت نسبت به قوس واگرا بین ۰/۱٪ برای ابتدای قوس تا ۱/۶٪ برای انتهای قوس می‌باشد. ناحیه ی با تنش برشی زیاد در خارج قوس کانال واگرا نیز موجود است اما به دلیل افزایش سطح آب و کاهش شدید سرعت آب، تنش برشی در این ناحیه قابل ملاحظه نیست و هم‌چنین الگوی خطوط جریان برای هر دو قوس کانال شکل یکسانی دارند.

منابع

۱- پیرستانی، م. (۱۳۸۳). "بررسی الگوی جریان و آبشستگی در دهانه ی ورودی آبگیر کانال‌های دارای انحنا." رساله ی دکتری، دانشگاه ازاد اسلامی، واحد تحقیقات و فن اوری، تهران.

۲- پور نصیری، م.، پیرستانی، م. ر. و مجدزاده طباطبایی، م. ر. (۱۳۸۷). "بررسی تغییرات قدرت جریان حلزونی در کانال‌های قوسی (U) شکل." هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

۳- دهقانی، ا. ا. و همکاران. (۱۳۸۵). "بررسی شرایط جریان بر تغییرات بستر کانال‌های آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه ی." مجله هیدرولیک

۴- قبادیان، ر.، محمدی، ک. و فصیحی، س. (۱۳۸۸). "شبیه‌سازی و مقایسه ی خصوصیات جریان در قوس ۱۸۰ درجه ی یکنواخت همگرا با استفاده از مدل عددی سه بعدی."هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۵- منصوری، ا. ر. (۱۳۸۵). "شبیه‌سازی عددی سه بعدی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه ی." پایان‌نامه ی کارشناس ارشد مهندسی عمران آب، دانشکده ی فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

۶- واقفی، م. و قدسیان. م. (۱۳۸۹). "تأثیر تنگ‌شدگی مقطع بر تغییرات توپوگرافی بستر ناشی از آبشکن T شکل مستقر در انتهای قوس ۹۰ درجه ی." پنجمین کنگره ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

7- Chow, V. T. (1959). "Open channel hydraulics." McGraw-Hill Books Co., pp. 439-486.

8- Ruther, Nils, (2006). "Computational fluid dynamics in fluvial sedimentation engineering." Norwegian University Of Science and Tecnology.

9- Mosonyi, E., and Gotz, W. (1973). "Secondary currents in subsequent model bends." International Symposium on River Mechanics, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1:191–201.

10- Lu, W. Z., Zhang, W. S., Cui, C. Z., and Leung, A. Y. T. (2004). "A numerical analysis of free surface flow in curved open channel with velocity-pressure-free-surface correction." Computational Mechanic (33), 215-224.

11- Leschziner, M. A., and Rodi, W. (1979). "Calculation of strongly curved open channel flow." Journal of Hydraulic Division, 105(10), 1297-1313.

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

13- Booij, R. (2003). "Measurements and large eddy simulations of some curved flumes." Journal of Turbulence, 4(1), 8-16.

14- Olsen, N.R.B. (2006). "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.

15- Huang, S. L., Jia, Y. F., and Wang S. Y. (2006). "Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport In Channel Bends." Journal of Hydrodynamics, 18(4): 411-417.

16- Ghodsian, M., and Vaghefi, M. (2009). "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend." International Journal of Sediment Research, Vol. 24, No. 2, pp. 145–158.

17- Wang, J. L., and Sui, J. Y. (2010). "Floating Rate of Frazil Ice Particle In Flowing Water In Bend Channes - A Three-Dimensional Numerical Analysis." Journal of Hydrodynamics, 22(1):19-28.

18- Naji Abhari, M., Ghodsian, M., Vaghefi, M., and Panahpur, N. (2010). "Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend." Journal of Flow Measurement and Instrumentation.