

مطالعه آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ در قوس ۹۰ درجه

مریم شیخ الاسلامی*^۱، مهدی قمشی^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۶

^۱- دانشجوی دکترای تخصصی سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: M.sheikhholeslami87@gmail.com

چکیده

جریان غلیظ، جریانی است که به علت اعمال نیروی ثقل بر روی دو سیال دارای چگالی متفاوت به وجود می‌آید. در این تحقیق تأثیر شعاع انحنای قوس بر پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی با سه شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر انجام شد. برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت در راستای طولی جریان (u)، در عرض کانال (v) و نیز در راستای قائم (w) از سرعت‌سنج داپلر اکوستیک (ADV) استفاده شده است. قبل از ورود به قوس، جریان موجود در مجرا جریان طولی می‌باشد. در مجاری باز، جریان در قوس در نزدیک سطح آب به طرف جداره بیرونی بوده و در نزدیکی بستر به سمت جداره داخلی قوس می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در جریان غلیظ بیشترین میزان سرعت در نزدیکی کف کانال اتفاق می‌افتد. همچنین به دلیل لایه‌بندی غلظت، نیروی ناشی از اختلاف فشار علاوه بر اختلاف ارتفاع به شتاب ثقل کاهش یافته و غلظت جریان غلیظ نیز بستگی داشته و در عمق ثابت نیست. بر اساس نتایج به دست آمده جریان جانبی معکوس شده و در نزدیکی بستر به سمت دیواره بیرونی حرکت می‌کند. همچنین با افزایش شعاع انحنای قوس، سلول چرخش کوچکتر و ضعیف‌تری تشکیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پروفیل سرعت، پروفیل غلظت، جریان ثانویه، جریان غلیظ، قوس

Experimental Study of Velocity and Concentration Profiles of Density Current in a 90 Degree Bend

M Sheikholeslami^{1*}, M Ghomeshi²

Received: 05 November 2015

Accepted: 06 November 2016

¹ Ph.D. student of Water Structure, Water Sciences Engin., Faculty, Shahid Chamran Univ., of Ahvaz, Iran

² Prof. of Hydraulic Structures, Water Sciences Engin., Faculty, Shahid Chamran Univ., of Ahvaz, Iran

* Corresponding Author, Email: M.sheikholeslami87@gmail.com

Abstract

Density currents are formed due to gravity force action on the two fluids with different densities. This paper investigates the effect of radius of stream route curvature on the velocity and concentration profiles in density current. Experiments were conducted in a flume with three different curvature radii of 40, 80 and 120 cm. Acoustic Doppler velocity meter was used to record the instantaneous downstream (u), cross stream (v) and vertical flow (w) velocities. Before entering the bend, the flow is longitudinal. In open-channel bends, surface flow moves towards the outer bank and the flow on the floor moves towards the inner bank. Results showed that in density current the maximum stream wise velocity occurred near the stream bed. Due to density stratification, in addition to the difference in height, generated pressure difference force was not constant throughout the depth of a density current and depended on reduced gravity and Concentration profile of flow. As a result, lateral flow reversed and near-bed flow towards the outer bank. With increasing the radius of the flume curvature, circulation cell became poor and smaller.

KeyWords: Bend, Concentration profile, Density current, Secondary flow, Velocity profile

مشخصات فیزیکی دو سیال و یا ترکیبی از این عوامل باشد.

برای شبیه‌سازی و بررسی رژیم جریان غلیظ از عدد فرود دنسیومتریکی^۱ استفاده می‌گردد (ترنر ۱۹۷۳):

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g' h \cos \theta}} \quad [2]$$

که Fr_d عدد فرود دنسیومتریکی، U سرعت متوسط، h عمق جریان و θ زاویه بستر با افق می‌باشند.

در شکل ۱ بخش‌های مختلف یک جریان غلیظ (زیرگذر) شامل ناحیه قبل از ورود به مخزن (جریان یکدست یا همگن)^۲، ناحیه غوطه‌وری^۳، بدنه‌ی جریان^۴ و

مقدمه

اصولاً "جریان غلیظ یا چگال یک جریان دو فازی است که در اثر حرکت یک سیال درون سیال دیگر با چگالی متفاوت به وجود می‌آید. در این حالت نیروی ثقل که عامل حرکت این گونه جریان‌ها می‌باشد دارای شتابی کمتر از شتاب ثقل زمین (۹/۸۱) بوده، که این میزان در رابطه ۱ تعریف شده است:

$$g' = g \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \quad [1]$$

در این رابطه g' شتاب ثقل کاهش یافته، g شتاب ثقل زمین (۹/۸۱)، ρ_d و ρ_a به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ می‌باشند.

عوامل ایجاد کننده اختلاف چگالی می‌تواند اختلاف دما، اختلاف در غلظت مواد معلق یا محلول، اختلاف در

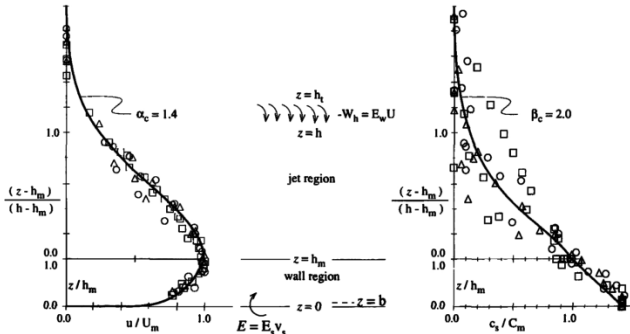
³ Plunge region

⁴ Body

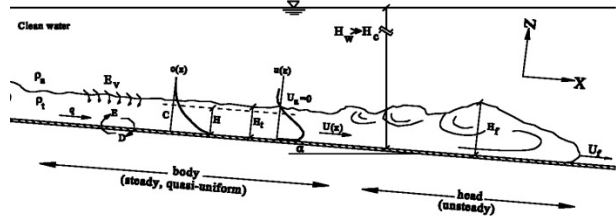
¹ Densimetric Froude number

² Homogeneous region

پیشانی^۵ (یا رأس) جریان نشان داده شده است. جریان غلیظ در قسمت جلوی خود، دارای یک پیشانی و یا یک بدنه جریان قرار می‌گیرد.



شکل ۲- پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۶)



شکل ۱- شماتیک اجزای تشکیل‌دهنده جریان غلیظ.

ناحیه دیواره^۶ و ناحیه جت^۷ (شکل ۲). ارتفاع نظیر سرعت بیشینه h_m ، این دو ناحیه را از هم جدا می‌کند. در منطقه دیواره ($Z < h_m$) توزیع سرعت لگاریتمی است (آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۶):

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln(z) + cte \quad [۳]$$

البته عموماً^۸ توزیع سرعت در این ناحیه به صورت یک رابطه توانی تجربی نیز بیان می‌شود:

$$\frac{u(z)}{u_m} = \alpha \left(\beta \frac{z}{h_m} \right)^n \quad [۴]$$

که در این معادلات $u(z)$ سرعت متوسط در عمق Z ، u_* سرعت برشی، K ثابت وان-کارمن، u_m سرعت بیشینه، h_m ارتفاع نظیر این سرعت، α ، β ضرایب و n توان تجربی می‌باشد.

در ناحیه جت ($Z > h_m$)، توزیع سرعت تقریباً گوسی است:

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \exp \left[-\alpha_c \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}} \right)^m \right] \quad [۵]$$

در این معادله h ضخامت متوسط جریان غلیظ، α_c ضریب و m توان تجربی است.

هنگام حرکت قسمتی از آب زلال به کنار پس‌زده می‌شود. بنابراین باید یک نیروی فشاری وجود داشته باشد که رأس جریان غلیظ را به جلو براند. نیروی محرک مذکور گرادیان فشار ناشی از اختلاف دانسیته بین پیشانی و سیال پیرامون می‌باشد (اوهی ۲۰۰۳). در یک مقطع مشخص بعد از عبور رأس جریان غلیظ و تلاطم‌های آن، جریان غلیظ حالت شبه‌یکنواخت پیدا کرده که ناحیه بدنه جریان را تشکیل می‌دهد. جریان در بدنه، معمولاً^۹ دائمی در نظر گرفته می‌شود و نیروی محرک بدنه، نیروی ثقل مؤثر بر سیال سنگین‌تر می‌باشد. سرعت متوسط بدنه جریان همیشه بزرگتر از سرعت پیشانی است و این اختلاف با افزایش زاویه شیب کف، بزرگتر می‌شود. برای اینکه پیوستگی جریان حفظ شود همیشه ارتفاع پیشانی جریان بزرگتر از ارتفاع بدنه جریان خواهد بود (اوهی ۲۰۰۳). آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۶) توزیع سرعت و غلظت را در جریان غلیظ اندازه‌گیری کردند. آزمایش‌های برای جریان غلیظ نمکی و جریان غلیظ رسوبی با استفاده از رسوبات ریزدانه و درشت‌دانه انجام شد. نتایج حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد جریان غلیظ شکلی شبیه جت دیواره دارد که دو ناحیه در آن قابل تشخیص است:

⁷ Jet region

⁵ Head

⁶ Wall region

را مورد بررسی کیفی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که شکل‌گیری فرم بستر در رژیم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و اثر متفاوتی نیز بر روی پروفیل سرعت در نزدیک بستر (بخش دیواره از پروفیل سرعت جریان غلیظ) و فاصله عمودی محل قرارگیری سرعت بیشینه دارد.

جریان در قوس

قبل از ورود به قوس، جریان موجود در رودخانه جریان طولی بوده و فاقد جریان عرضی می‌باشد. در این حالت پروفیل سرعت به گونه‌ای است که بیشینه مقدار سرعت در محور مرکزی رودخانه می‌باشد. با ورود جریان به قوس رودخانه، جریان تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار گرفته و با افزایش قوس و کاهش شعاع انحناء نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد. نیروی گریز از مرکز نیز در عمق ثابت نیست و در لایه‌های نزدیک به سطح آب به دلیل سرعت بیشتر، ذرات با نیروی بیشتری به طرف دیواره قوس بیرونی کشیده می‌شوند. بین نیروی گریز از مرکز، گرادیان فشار مزبور و نیز مقاومت برشی بستر، اندرکنشی ایجاد شده و در صورتی که گرادیان فشار به حدی باشد که بتواند بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در درون مقطع ایجاد می‌شود که در نزدیک سطح آب به طرف جداره بیرونی بوده و در نزدیکی بستر باعث انتقال ذرات به سمت جداره داخلی قوس می‌شود (ژولین ۲۰۰۲).

نیروی گریز از مرکز نیز در عمق ثابت نیست و در لایه‌های نزدیک به سطح آب به دلیل سرعت بیشتر، ذرات با نیروی بیشتری به طرف دیواره قوس بیرونی کشیده می‌شوند.

$$F = \frac{\rho U^2}{r_s} \approx \frac{\rho u^2}{r} \quad [6]$$

که در آن U و u سرعت جریان به ترتیب در امتداد مختصه طولی جریان پیچان رود و در امتداد خط جریان هستند.

نیروی فشاری خالص وارد بر همان جرم واحد سیال در امتداد شعاع قوس به صورت معادله γ می‌باشد:

$$P = -\gamma \frac{\partial h}{\partial r} \quad [7]$$

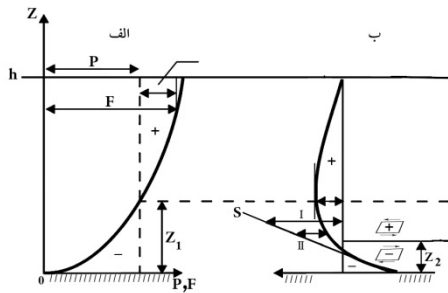
در تحقیقات انجام شده توسط حسینی و همکاران (۲۰۰۶)، پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در مسیر مستقیم و در سه شیب ۱، ۲ و ۳ درصد با دبی‌ها و غلظت‌های مختلف ترسیم شد. نتایج نشان داد پروفیل سرعت در قسمت پایینی جریان از یک رابطه لگاریتمی (یک رابطه توانی) و در قسمت بالائی جریان از یک توزیع گوسین پیروی می‌کند. کوتی و همکاران (۱۳۹۱) پروفیل‌های بدون بعد سرعت در ناحیه جت و دیواره را برای سه دبی جریان غلیظ و دو غلظت ۲۰ و ۴۰ گرم در لیتر در ۴ شیب ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد در دو مقطع در مسیر مستقیم با سرعت سنج $UDVP$ اندازه‌گیری کردند. بررسی پروفیل‌های بدون بعد سرعت نشان داد که در ناحیه دیواره تفاوت چندانی میان پروفیل‌ها در رژیم‌های مختلف جریان وجود ندارد؛ ولی در ناحیه جت، از آنجاکه با افزایش عدد فرود میزان شدت اختلاط نیز افزایش می‌یابد، پروفیل‌های سرعت ضخیم‌تر می‌شوند. کشتکار و همکاران (۱۳۸۹) پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان گل آلود در حالت دو بعدی و در یک مدل فیزیکی در محدوده حالت‌های زیر بحرانی تا فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. شکل پروفیل سرعت در جریان آب-نمک به شدت به شار شناوری و عدد ریچاردسون ورودی وابسته است. با افزایش دبی جریان ورودی، ماکزیمم سرعت و ارتفاع جریان افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش غلظت ورودی نیز ارتفاع جریان افزایش می‌یابد (افشین و همکاران ۲۰۰۸). فیروزآبادی و همکاران (۲۰۰۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی به وسیله دستگاه ADV پروفیل سه بعدی سرعت جریان را برداشت و آن را با مدل ریاضی $k-\epsilon$ مقایسه نمودند. نتایج حاصل از تحقیق تطابق خوبی بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نشان می‌دهد.

سکویروس و همکاران (۲۰۱۰) با یک سری آزمایش‌ها جریان غلیظ نمکی و رسوبی در مسیر مستقیم و روی بستر متحرک، شکل‌گیری فرم بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و فرم بستر ایجاد شده بر روی پروفیل‌های سرعت و مقدار افزایش غلظت از طریق بستر متحرک

نتیجه این پدیده، حرکت چرخشی جریان در عرض مقطع، جریان ثانویه^۸ خواهد بود (امید و حبیب زاده ۱۳۸۷). تعادل بین دو نیروی نابرابر F و P در هر نقطه با مشتق تنش برشی شعاعی روی τ_r روی Z برقرار می‌شود. این واقعیت را با معادله دیفرانسیلی زیر می‌توان بیان کرد:

$$-\frac{\partial \tau_r}{\partial z} = \frac{\rho u^2}{r} - \gamma \frac{\partial h}{\partial r} \quad [۸]$$

توزیع $-\frac{\partial \tau_r}{\partial z}$ در امتداد Z در واقع اختلاف F و P است که در شکل ۴ نشان داده شده است.

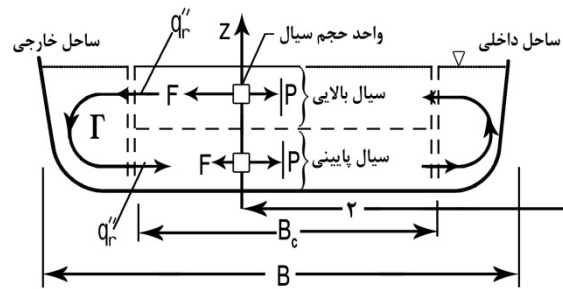


شکل ۴- نیروی گریز از مرکز و نیروی فشاری وارد بر حجم واحد سیال (امید و حبیب زاده ۱۳۸۷).

توزیع قائم سرعت پایین‌دست بستگی داشته و در این حالت بیشینه سرعت پایین‌دست در نزدیک بستر بوده و در نتیجه جریان در کف به سمت دیواره خارجی است (کاسم و ایمران ۲۰۰۴، کرنی و همکاران ۲۰۰۶، کیویل و همکاران ۲۰۰۶، ایسلام و ایمران ۲۰۰۸). نتایج ابد و همکاران (۲۰۱۱) نشان می‌دهد پروفیل قائم سرعت در امتداد جریان و اختلاف چگالی نسبی جریان غلیظ زیرگذر مرتباً با عدد فرود دنسیمیتریک (Fd) تغییر می‌کند. بر این اساس در جریان‌های فوق بحرانی و زیر بحرانی جهت جریان ثانویه معکوس و زمانی که جریان از حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی و بالعکس در حال تغییر است، جهت جریان ثانویه نرمال می‌باشد. در کانال‌های قوسی، ورود جریان غلیظ به قوس‌ها موجب تغییر

در این رابطه h در واقع همان ارتفاع سطح آزاد جریان است.

مقدار متوسط F و P به‌تقریب با هم برابرند. مقدار نیروی گریز از مرکز با زیاد شدن ارتفاع و افزایش سرعت ناشی از آن افزایش می‌کند؛ این در حالی است که مقدار P به‌طور کلی با Z تغییر نمی‌کند. بنابراین در بخش بالایی مقطع $P < F$ و در بخش پایین آن $P > F$ می‌باشد. این حالت موجب می‌شود سیال بالایی به سمت ساحل بیرونی و سیال پایینی به سمت ساحل داخلی حرکت کند (شکل ۳).



شکل ۳- شماتیک الگوی جریان در مقطع یک قوس (امید و حبیب زاده ۱۳۸۷).

همان‌گونه که عنوان شد تفاوت جریان غلیظ با جریان در مجاری رو باز در این است که سیال پیرامون^۹ تأثیر کاهنده‌ای روی نیروی ثقل دارد. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به‌عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد، شتاب ثقل کاهش یافته نام دارد که به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد.

بر اساس آزمایش‌های انجام شده در کانال‌های قوسی شکل، بر خلاف جهت جریان ثانویه در رودخانه‌ها که به‌سمت دیواره داخلی است، جهت جریان ثانویه در معبرهای^{۱۰} ایجاد شده در حوضچه آزمایشگاهی معکوس بوده و از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی می‌باشد بنابراین جریان حلزونی در معابر حاوی جریان غلیظ نمکی، معکوس می‌باشد. جهت جریان حلزونی به

¹⁰ Submarine channels

⁸ Secondary flow

⁹ Ambient

EMFM-HFD-3000 با دقت ± 0.3 تا ± 0.5 نصب شده در لوله انتقال جریان غلیظ و تنظیم آن از طریق شیر فلکه مذکور صورت می‌گرفت. در فلوم نیز سیال غلیظ و آب ساکن توسط یک دریچه کشویی از هم جدا می‌شدند. با باز شدن دریچه جریان غلیظ به درون آب ساکن هدایت می‌گردید. برای ثابت نگه داشتن سطح آب ساکن، آب تمیز با دبی مورد نیاز از انتهای فلوم به درون فلوم وارد می‌شد. از آنجایی که در جریان غلیظ به‌ویژه در مقیاس آزمایشگاهی، اختلاف چگالی سیال غلیظ و سیال پیرامون بسیار کم است، لذا کنترل اختلاف دمای سیال غلیظ و سیال پیرامون بسیار حائز اهمیت است تا تفاوت جرم مخصوص سیال غلیظ و سیال ساکن محیطی فقط به دلیل مادهٔ محلول (نمک) باشد و تفاوت دما در به‌وجود آمدن جریان غلیظ نقشی نداشته باشد. در تحقیق حاضر از یک دماسنج دیجیتال مخصوص سیالات، مدل *TFA* استفاده گردید تا تفاوت دما بیش از ۲ درجه سلسیوس نباشد. اندازه‌گیری غلظت و سرعت پس از خروج کامل رأس جریان و یکنواخت شدن بدنه جریان صورت گرفته است. به منظور بررسی پروفیل عرضی سرعت در قوس، بدنه جریان می‌بایست ارتفاع لازم برای اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای در راستای قائم را داشته باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده جهت تعیین بهترین مقدار بازشدگی دریچه نشان داد ارتفاع بازشدگی دریچه به اندازه ۱۰ سانتی‌متر بهترین شرایط بدنه را ایجاد خواهد نمود. همچنین با توجه به زیر بحرانی بودن جریان در تمامی آزمایش‌ها و سرعت بسیار کم جریان غلیظ، بعد از عبور از هر قوس و وارد شدن به مسیر مستقیم، بیشینه سرعت جریان به مرکز کانال بازگشته و اثر قوس قبلی از بین می‌رود؛ بنابراین فاصله کم بین قوس‌ها خللی در آزمایش وارد نخواهد کرد.

برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت‌سنج داپلر اکوستیک^{۱۱} (*ADV*) مدل *Vectrino+* استفاده شده است (شکل ۶). در هر مقطع در ۲۵ نقطه سرعت نقطه‌ای اندازه‌گیری شد.

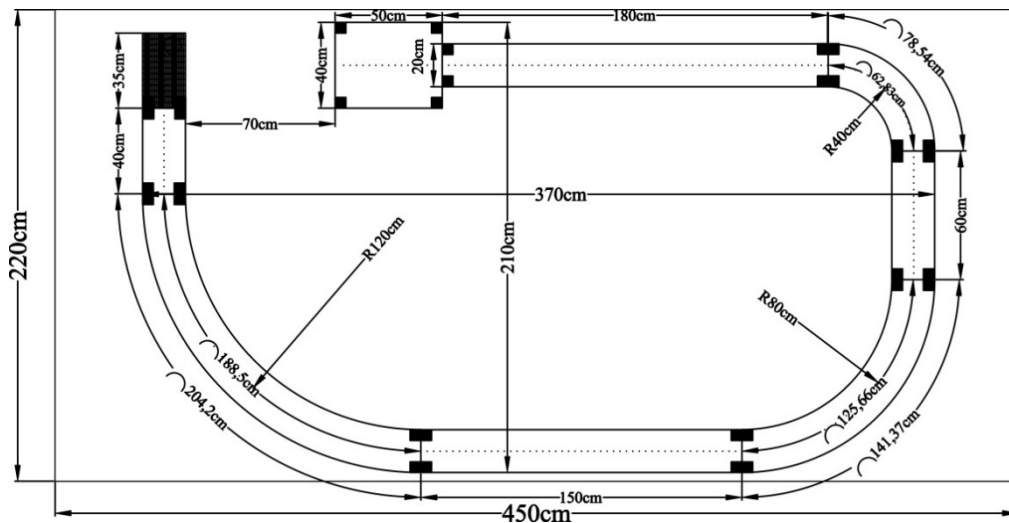
قابل توجهی در شکل جریان ثانویه و در نتیجه الگوی جریان غلیظ در قوس می‌شود. به‌طور عمده علت این امر را می‌توان به تفاوت پروفیل‌های سرعت در جریان مجاری باز و جریان غلیظ نسبت داد. بیشتر مطالعات مربوط به قوس در کانال‌های مستغرق ایجاد شده در حوضچه آزمایشگاهی بوده و آزمایشات محدودی در کانال‌های قوسی انجام شده است. هدف از انجام مطالعه حاضر بررسی رفتار جریان غلیظ در قوس و نیز تعیین تأثیر شعاع انحنای قوس بر خصوصیات جریان غلیظ می‌باشد. به‌طور کلی نوآوری تحقیق حاضر نسبت به سایر تحقیقات انجام شده در جریان غلیظ عبارتند از:

- مقایسه پروفیل‌های غلظت و سرعت جریان غلیظ در سه شعاع انحنای متفاوت.
- بررسی پروفیل سرعت عرضی و جریان ثانویه در سه قوس.

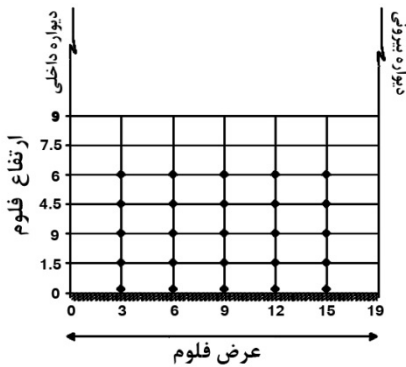
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱، دارای سه قوس متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران انجام شد (شکل ۵). برای انجام آزمایش‌ها، از نمک و ماده رنگی به نام پودر رنگریزی به‌منظور ایجاد سیال غلیظ استفاده گردید. آزمایش‌ها در چهار دبی ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ لیتر در ثانیه و در غلظت ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ گرم در لیتر صورت پذیرفت. سیال غلیظ (محلول آب، نمک و ماده رنگی) تهیه شده، توسط یک پمپ از مخزن سیال غلیظ به یک مخزن از جنس گالوانیزه به ابعاد (۱۲۵×۵۰×۱۰۰) سانتی‌متر و با ارتفاع ثابت انتقال داده می‌شد. پیش از ورود جریان غلیظ، فلوم کاملاً آبگیری شده و شیر فلکه ورود سیال غلیظ به محوطه پشت دریچه فلوم، باز می‌شد. اندازه‌گیری دبی از طریق دبی‌سنج الکترومغناطیس (مدل

¹¹ Acoustic doppler velocity meter



شکل ۵- پلان فلوم مورد استفاده برای انجام آزمایش.



شکل ۷- نمایی از محل نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت در یک مقطع عرضی.



شکل ۶- نمایی کلی از دستگاه Vectrino+.



شکل ۸- سیفون اندازه‌گیری غلظت.

فاصله نقاط در عرض کانال ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ میلی-متر از دیواره داخلی و در راستای قائم در فاصله ۲، ۱۷، ۳۲، ۴۷ و ۶۲ میلی‌متر از کف می‌باشد (شکل ۷).
 به‌منظور برداشت پروفیل قائم غلظت از بدنه جریان غلیظ، شش سری سیفون نمونه‌گیری در ابتدا و انتهای هر قوس و در مرکز کانال نصب گردید. لازم به ذکر است در این آزمایش با توجه به ضخامت کم جریان غلیظ برداشت غلظت توسط ۷ سیفون از کف و در اعماق ۰/۴، ۱/۹، ۳/۴، ۴/۹، ۶/۴، ۷/۹ و ۹/۴ سانتی‌متری انجام شد (شکل ۸).

در جدول ۱ به اختصار سرعت و عدد فرود دنسیمتریک برای آزمایش‌های مربوط به دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت‌های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ گرم در لیتر آورده شده است.

جدول ۱- سرعت و عدد فرود دنسیمتریک بازاء دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت‌های مختلف.

شماره قوس	مقطع عرضی در هر قوس	دبی جریان غلیظ (L S ⁻¹)	غلظت مخزن جریان غلیظ	سرعت در هر مقطع	عدد فرود دنسیمتریک
bend1	c1	1.1	8	1.40	0.670282
	c2	1.1	8	1.38	0.550922
	c3	1.1	8	1.41	0.503323
bend2	c1	1.1	8	1.57	0.629149
	c2	1.1	8	1.51	0.622341
	c3	1.1	8	1.55	0.674727
bend3	c1	1.1	8	1.62	0.761568
	c2	1.1	8	1.63	0.855926
	c3	1.1	8	1.69	1.053865
bend1	c1	1.1	12	1.59	0.542943
	c2	1.1	12	1.53	0.481115
	c3	1.1	12	1.62	0.494871
bend2	c1	1.1	12	1.63	0.545107
	c2	1.1	12	1.72	0.609484
	c3	1.1	12	1.65	0.580342
bend3	c1	1.1	12	1.68	0.608668
	c2	1.1	12	1.76	0.711182
	c3	1.1	12	1.85	0.855528
bend1	c1	1.1	16	1.80	0.482866
	c2	1.1	16	1.70	0.424119
	c3	1.1	16	1.75	0.42021
bend2	c1	1.1	16	1.90	0.518584
	c2	1.1	16	1.90	0.52813
	c3	1.1	16	1.94	0.556438
bend3	c1	1.1	16	2.07	0.62876
	c2	1.1	16	2.22	0.765485
	c3	1.1	16	2.41	0.921198
bend1	c1	1.1	20	2.04	0.543426
	c2	1.1	20	1.92	0.495333
	c3	1.1	20	2.10	0.570506
bend2	c1	1.1	20	2.21	0.603803
	c2	1.1	20	2.06	0.551186
	c3	1.1	20	2.13	0.583869
bend3	c1	1.1	20	2.13	0.611071
	c2	1.1	20	2.52	0.80242
	c3	1.1	20	2.77	0.975382

نتایج و بحث

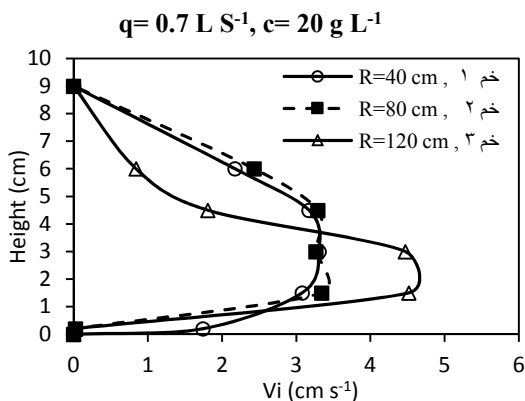
اندازه‌گیری به وسیله دستگاه سرعت‌سنج صوتی (ADV) به صورت نقطه‌ای انجام شده و جمع‌آوری سرعت‌های لحظه‌ای برای مدت ۲۰ تا ۳۰ ثانیه برای هر نقطه در عمق جریان به طول می‌انجامد و سپس حسگر دستگاه به سمت نقطه بعدی در جهت عمود بر کف

کانال و در راستای عمق جریان جابه‌جا شده و این عمل تا کامل شدن پروفیل سرعت در یک راستای قائم ادامه می‌یابد. اندازه‌گیری غلظت و سرعت بعد از عبور رأس جریان غلیظ و تلاطم‌های آن و زمانی که بدنه‌ی جریان حالت شبه‌یکنواخت پیدا کرد صورت گرفته تا بتوان تأثیر شعاع قوس را بر جریان را مورد بررسی قرارداد.

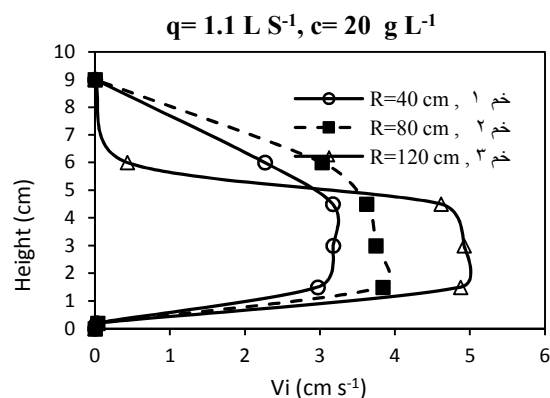
و غلظت‌ها توسط غلظت اولیه نرمال شده‌اند. اگر چه به- نظر می‌رسد با توجه به دائمی بودن جریان و ثابت بودن بازشدگی در پیچه، با افزایش دبی سرعت نیز افزایش یافته و اختلاط بیشتر سیال پیرامون رخ دهد اما با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، اختلاط در ناحیه بالایی جریان و نزدیک به سیال پیرامون صورت می‌گیرد. در ناحیه پایینی و نزدیک به کف غلظت هر نقطه در سیفون نمونه-گیری در دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه نسبت به دبی ۰/۷ لیتر در ثانیه بیشتر است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار غلظت در فاصله ۴ میلی‌متری از کف اتفاق می‌افتد. پروفیل غلظت تابعی از فاصله نقاط از کف کانال بوده و با افزایش ضخامت جریان غلیظ کاهش می‌یابد.

شکل ۹- الف و شکل ۹- ب پروفیل قائم سرعت به‌ازای غلظت ۲۰ گرم در لیتر و دبی ۰/۷ لیتر در ثانیه ۱/۱ لیتر در ثانیه در مرکز کانال را نمایش می‌دهد. با افزایش شعاع قوس، ارتفاع جریان غلیظ کاهش یافته و سرعت افزایش پیدا می‌کند. در قوس سوم علاوه بر تأثیر افزایش شعاع قوس در زیاد شدن سرعت به‌دلیل نزدیک شدن به ناحیه خروجی کانال و مکش حاصل از آن، سرعت به‌میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در شکل ۹- ج و شکل ۹- د پروفیل غلظت در راستای قائم به‌ازای دو دبی ۰/۷ و ۱/۱ لیتر در ثانیه نمایش داده شده است. غلظت اولیه مخزن جریان غلیظ ۲۰ گرم در لیتر می‌باشد

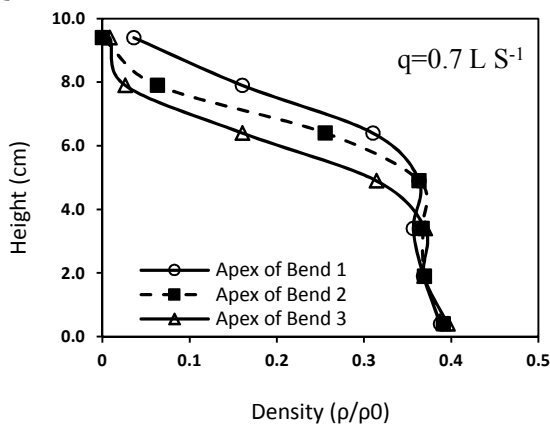
الف)



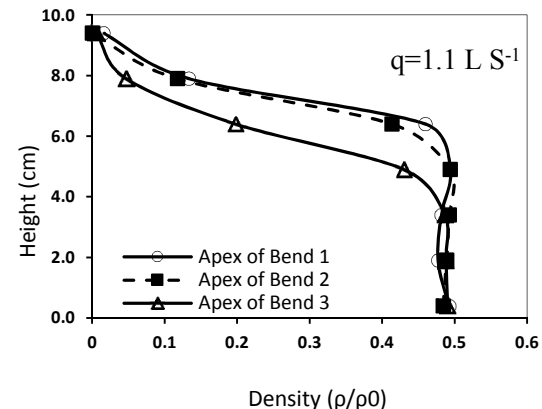
ب)



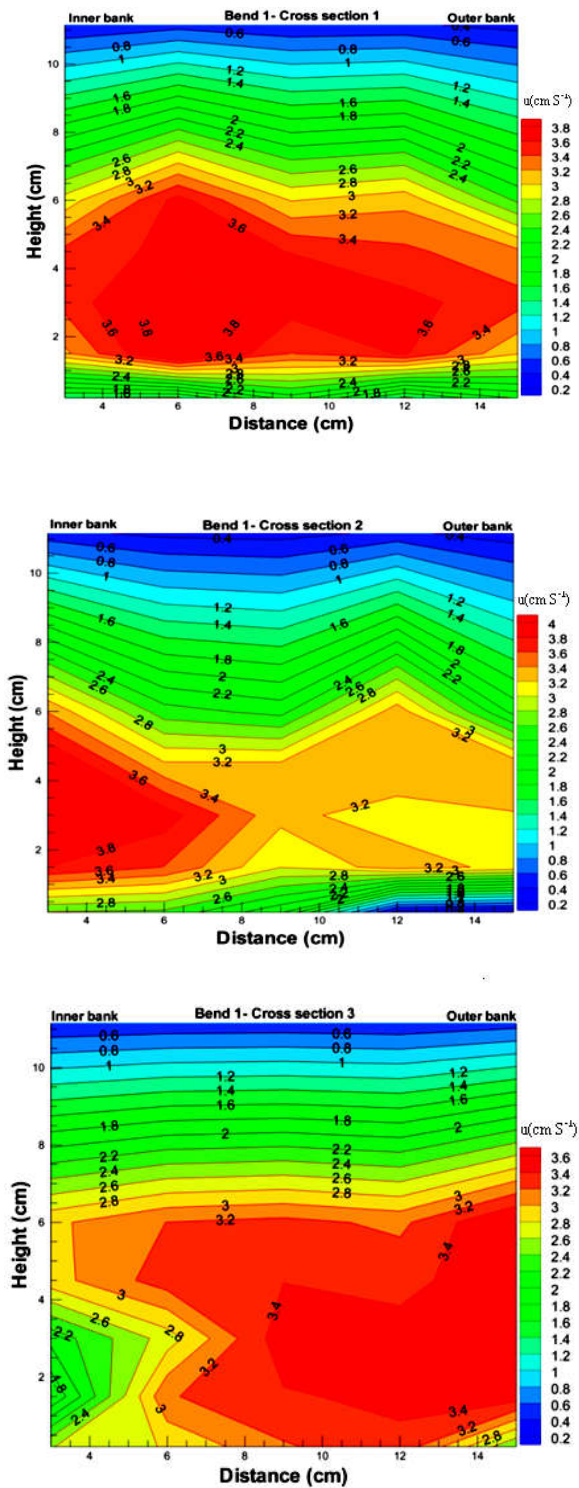
ج)



د)



شکل ۹- پروفیل قائم سرعت و غلظت در رأس (وسط) سه قوس- الف و ب: پروفیل قائم سرعت در مرکز کانال به‌ازای دبی ۰/۷ و ۱/۱ لیتر در ثانیه. ج و د: پروفیل غلظت به‌ازای دبی ۰/۷ و ۱/۱ لیتر در ثانیه (محور افقی غلظت و محور قائم عمق جریان غلیظ را نمایش می‌دهد. غلظت‌ها توسط غلظت اولیه نرمال شده‌اند).



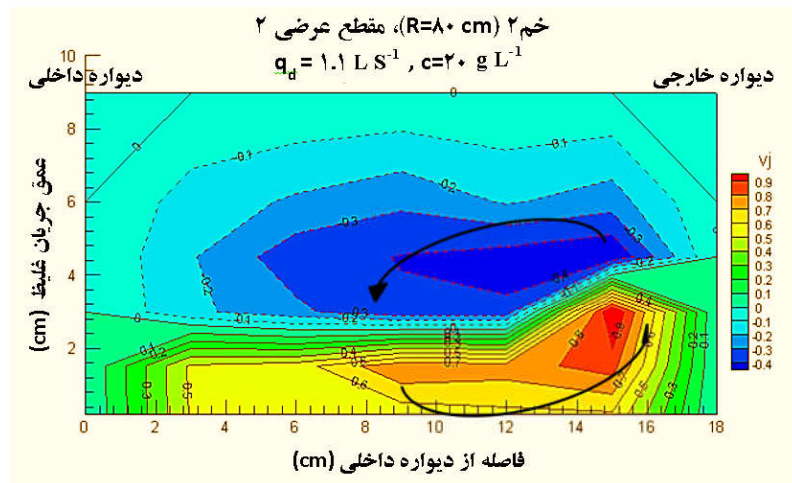
شکل ۱۰- پروفیل عرضی سرعت در راستای جریان در دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت ۲۰ گرم در لیتر در مقاطع عرضی ابتدا، وسط و انتهای قوس با شعاع انحنا ۴۰ سانتی‌متر (محور افقی فاصله از دیوار داخلی قوس و محور قائم عمق جریان از کف می‌باشد).

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد در ابتدای قوس اول جریان پروفیل عرضی خود در مسیر مستقیم را حفظ کرده و تغییر ناچیزی نشان می‌دهد. این امر در خصوص غلظت‌های ۸ و ۱۲ و ۱۶ گرم در لیتر نیز صادق است. با نزدیک شدن جریان به میانه قوس، بیشینه سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود. براساس نتایج به دست آمده در مقطع عرضی دوم (میانه قوس) بیشینه سرعت به سمت دیواره داخلی است. با ورود جریان به قوس به علت تغییر ناگهانی انحنا و اثر نیروی گریز از مرکز در امتداد جداره داخلی کاهش فشار و در امتداد جداره بیرونی افزایش فشار روی می‌دهد. گرادیان فشار طولی به معنای تغییرات فشار در راستای طولی جریان می‌باشد. اگر فشار در راستای جریان یابد گرادیان فشار منفی است و اگر فشار افزایش پیدا کند، گرادیان فشار مثبت خواهد بود. آزمایش‌ها نشان داد با حرکت جریان در طول قوس، عمق جریان در امتداد دیواره داخلی کاهش و در امتداد دیواره بیرونی افزایش می‌یابد. در نزدیکی دیواره داخلی گرادیان فشار طولی منفی رخ می‌دهد. در نتیجه سرعت بیشینه به سمت دیواره داخلی کشیده می‌شود. با حرکت جریان غلیظ در طول قوس اول، جریان توسعه یافته و جریان ثانویه ایجاد شده در مقطع عرضی سوم منجر به نزدیک شدن سرعت بیشینه به دیواره بیرونی می‌گردد.

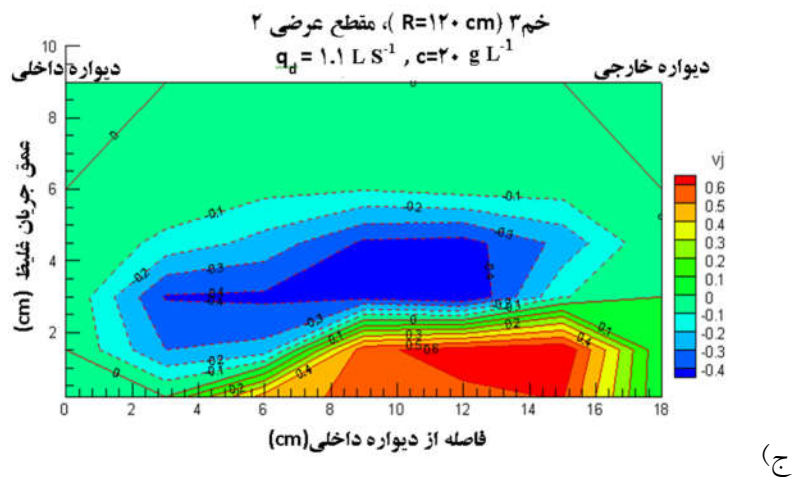
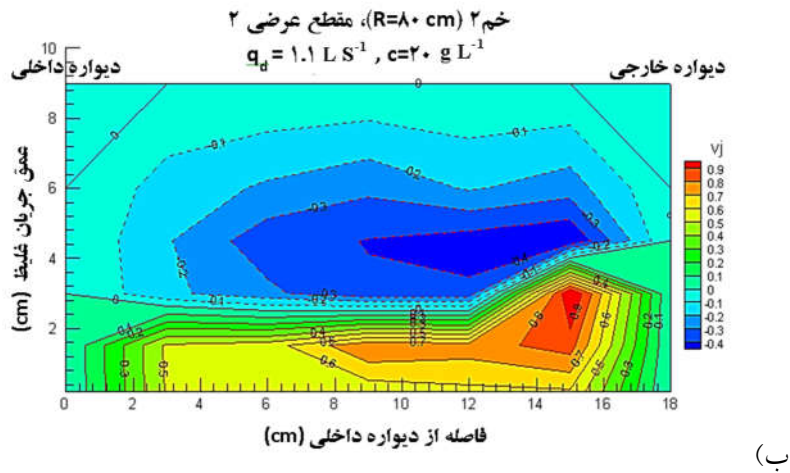
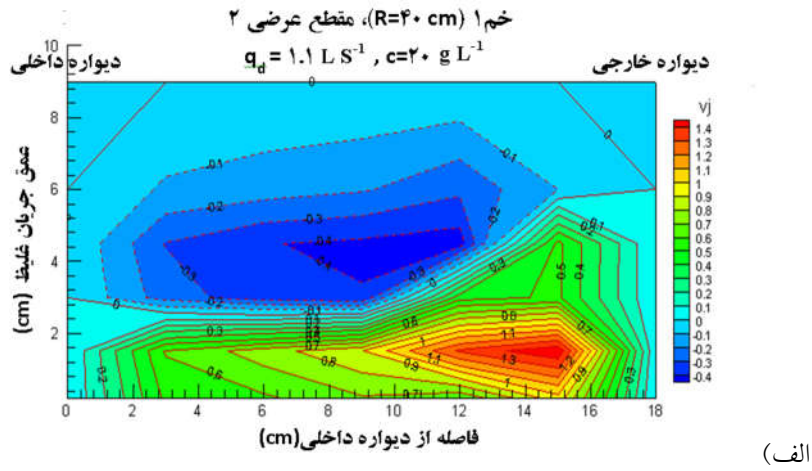
شکل‌گیری جریان ثانویه و تمایل سرعت بیشینه به سمت دیواره خارجی در پروفیل‌های عرضی سرعت در قوس دوم و سوم نیز مشاهده می‌گردد. نیروی گریز از مرکز با شعاع انحنا رابطه معکوس داشته و در نتیجه با افزایش شعاع انحنا نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. کاهش نیروی گریز از مرکز موجب کاهش جریان‌های ثانویه ناشی از آن می‌گردد. این امر منجر به افزایش سرعت جریان در مسیر جریان شده و با توجه به دائمی بودن جریان، عمق جریان غلیظ نیز کاهش می‌یابد؛ به طوری که در مقاطع عرضی قوس سوم بیشترین سرعت و کمترین عمق جریان غلیظ را می‌توان مشاهده نمود.

جریان است، نمودار آن نیز از پروفیل سرعت تبعیت خواهد کرد. از سویی دیگر غلظت در دو سوی یک حجم واحد سیال متغیر بوده و نیروی فشاری خالص بر حجم واحد سیال در عمق ثابت نیست. به دلیل تغییرات کم غلظت در جریان غلیظ نمکی نیروی اختلاف فشار در امتداد عمق جریان ثابت فرض می‌شود. بنابراین نمودار نیروی گریز از مرکز و نیروی فشاری در جریان غلیظ نمکی به صورت شکل ۱۳ می‌باشد. بر اساس شکل ۱۳ در جریان غلیظ در قوس‌ها دو هسته چرخش خواهیم داشت: یکی در نزدیکی کف فلوم و مشابه هسته چرخشی جریان ثانویه در مجاری روباز و دیگری در ناحیه بالاتر از سرعت بیشینه و به صورت معکوس به نظر می‌رسد فاصله کم از کف فلوم و تنش برشی حاکم در این ناحیه مانع از تشکیل هسته پایینی در مدل‌های آزمایشگاهی می‌گردد. در ناحیه بالایی بر خلاف جریان در مجاری باز جریان در پایین به سمت دیواره بیرونی کشیده می‌شود؛ جهت جریان ثانویه معکوس بوده و از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی می‌باشد.

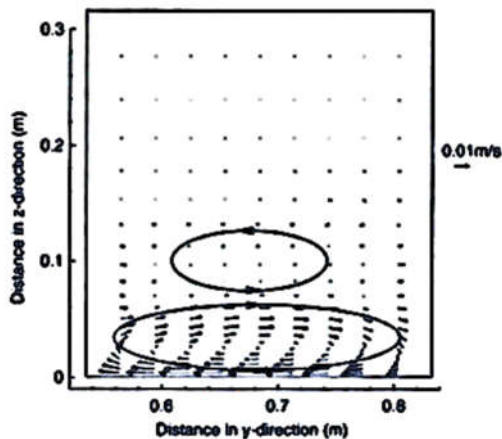
بر خلاف جریان در مجاری باز که جریان در کف به سمت دیواره بیرونی کشیده می‌شود؛ در جریان غلیظ جهت جریان ثانویه معکوس بوده و از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی می‌باشد (شکل ۱۱). در شکل ۱۲ با استفاده از نرم‌افزار Tec plot کانتورهای سرعت عرضی در رأس (وسط) قوس‌ها با شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر نمایش داده شده است. ذراتی که در حال حرکت در قوس هستند، علاوه بر نیروی ثقل تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز نیز می‌باشند که می‌خواهند آن‌ها را از مسیر مستقیم منحرف نماید. چون توزیع سرعت در مقطع نامتقارن است، نیروی گریز از مرکز در عمق ثابت نیست و در هر نقطه تابع سرعت جریان می‌باشد. در مجاری باز گرادیان قائم سرعت از کف تا سطح آب روند افزایشی داشته و سرعت بیشینه در نزدیکی سطح آزاد آب پیش می‌آید؛ این درحالی‌است که پروفیل سرعت در جریان غلیظ مطابق شکل‌های ۹-الف و ۹-ب بوده و بیشترین سرعت جریان در نزدیکی کف کانال اتفاق می‌افتد. از آنجایی که نیروی گریز از مرکز تابع پروفیل سرعت



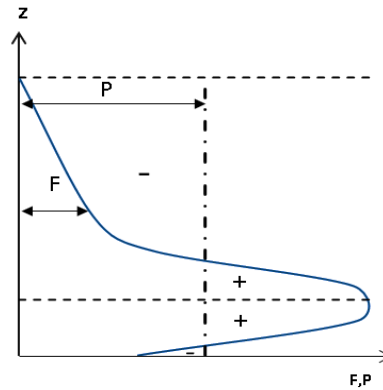
شکل ۱۱- جریان ثانویه در قوس در جریان غلیظ (خط چین‌ها سرعت منفی را نشان می‌دهند).



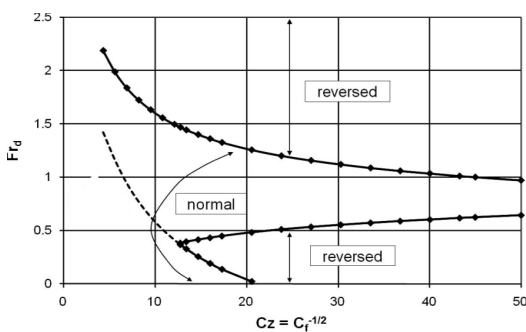
شکل ۱۲- نمایش بردارهای سرعت عرضی (v_z) در وسط قوس به ازای دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت ۲۰ گرم در لیتر، الف: قوس اول با شعاع ۴۰ cm، ب: قوس دوم با شعاع ۸۰ cm، ج: قوس سوم با شعاع ۱۲۰ cm.



شکل ۱۴- توزیع سرعت عرضی در مقطع در رأس قوس (کاسم و ایمران ۲۰۰۴).



شکل ۱۳- نیروی گریز از مرکز و نیروی خالص فشاری وارد بر حجم واحد سیال در جریان غلیظ.



شکل ۱۵- چگونگی تغییر جریان ثانویه نزدیک بستر با توجه به عدد فرود جریان (ابد و همکاران ۲۰۱۱).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد با افزایش شعاع قوس، ارتفاع جریان غلیظ کاهش یافته و سرعت افزایش پیدا می‌کند. همچنین غلظت تابعی از فاصله نقاط از کف کانال بوده و با افزایش ضخامت جریان غلیظ کاهش می‌یابد. ورود جریان به قوس، جریان پروفیل عرضی خود در مسیر مستقیم را حفظ کرده و سرعت بیشینه در محور کانال دیده می‌شود. با نزدیک شدن جریان به میانه قوس، به علت ایجاد گرادیان فشار منفی بیشینه سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود. بعد از این بازه جریان تحت تأثیر جریان ثانویه قرار گرفته و

در نتایج حاصل از مدل‌سازی جریان غلیظ در قوس توسط کاسم و ایمران (۲۰۰۴) با استفاده از نرم افزار فلونت هر دو هسته چرخش قابل مشاهده است (شکل ۱۴)؛ این در حالی است که در مدل‌های آزمایشگاهی تنها هسته چرخشی بالایی که به صورت معکوس می‌باشد مشاهده می‌گردد (کیویل و همکاران ۲۰۰۸، کرنی و همکاران ۲۰۰۶). با افزایش شعاع قوس نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. در این حالت سرعت عرضی کاهش یافته و سرعت در راستای مستقیم افزایش پیدا می‌کند. در این حالت از ضخامت جریان غلیظ کاسته شده و هسته چرخشی کوچکتری تشکیل خواهد شد (شکل ۱۲). در تمامی آزمایش‌ها این تحقیق عدد فرود دینامیک کمتر از ۱ بوده و رژیم جریان پایین و زیر بحرانی است و جریان ثانویه نیز معکوس می‌باشد؛ از این رو نتایج حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از ابد و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد (شکل ۱۵). با افزایش شعاع قوس نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. در این حالت سرعت عرضی کاهش یافته و سرعت در راستای مستقیم افزایش پیدا می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش شعاع قوس، سرعت در راستای عرض کانال کاهش یافته و سرعت در راستای طولی جریان افزایش پیدا می‌کند که این امر در یک دبی ثابت منجر به کاهش عمق جریان خواهد شد.

بیشترین مقدار سرعت به سمت دیواره بیرونی انتقال می- یابد. بر اساس نتایج به دست آمده جریان غلیظ در قوس در کف به سمت دیواره بیرونی و در سطح به سمت دیواره داخلی است؛ از این رو جهت جریان ثانویه معکوس بوده و از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی می باشد.

منابع مورد استفاده

- امید م ح و حبیب زاده ع، ۱۳۸۷. فرآیندهای رودخانه‌ای. انتشارات دانشگاه تهران، ۲۷۲ صفحه.
- کشتکار ش، ایوب زاده ع و فیروزآبادی ب، ۱۳۸۹. بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان گل آلود با استفاده از مدل فیزیکی. پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۸۷، صفحه‌های ۳۶ تا ۴۳.
- کوتی ف، کاشفی پور س م و قمشی م، ۱۳۹۱. تجزیه و تحلیل پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۶، شماره ۵۹، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۹.
- Abad JD, Sequeiros OE, Spinewine B, Pirmez C, García MH and Parker G, 2011. Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory. *Journal of Sedimentary Research* 81: 787–813.
- Afshin H, Firoozabadi B, and Rad M, 2008. Hydrodynamics analysis of density current. *Journal of Applied Engineering* 21(3): 211-226
- Altinakar MS, Graf WH and Hopfinger EJ, 1996. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research* 34(5): 713-718.
- Corney RKT, Peakall J, Parsons DR, Elliott L, Amos KJ, Best JL, Keevil GM, Ingham DB, 2006. The orientation of helical flow in curved channels. *Sedimentology* 53: 249–257.
- Darby SE and Peakall J, 2012. Modelling the equilibrium bed topography of submarine meanders that exhibit reversed secondary flows. *Geomorphology* 163–164: 99–109.
- Ezz H, Cantelli A and Imran J, 2013. Experimental modeling of depositional turbidity currents in a sinuous submarine channel. *Sedimentary Geology* 290: 175–187.
- Firoozabadi, B. Afshin, H. and Aram, E, 2009. Three-dimensional modeling of density current in a straight channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 135: 393-402
- Hosseini SA, Shamsai A and Ataie-Ashtiani B, 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *Flow Measurement and Instrumentation* 17: 59–68
- Islam MA and Imran J, 2008. Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel, *Journal of Geophysical Research* 113, C07041, 10.1029/2007JC004292.
- Janocko M, Cartigny MJB, Nemeč W and Hansen EWM, 2013. Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels: Laboratory experiments and numerical simulations. *Marine and Petroleum Geology* 41: 222-249
- Julien, PY, 2002. *River Mechanics*, Cambridge Univ. Press, New York.
- Kassem A and Imran J, 2004. Three-dimensional modeling of density current. II: Flow in sinuous confined and unconfined channels. *Journal of Hydraulic Research* 42(6): 591– 602.
- Keevil GM, Peakall J, Best JL and Amos KJ, 2006. Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel. *Marine Geology* 229(3–4): 241–257.
- Oehy C, 2003. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents, PhD thesis, Fac. ENAC, Ecole Polytech. Fed. de Lausanne, Lausanne, France.
- Sequeiros OE, Spinewine B, Beaubouef RT, Sun T, García MH and Parker G, 2010. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(7): 412–433.
- Straub KM, Mohrig D, Buttles J, McElroy B and Pirmez C, 2011. Quantifying the influence of channel sinuosity on the depositional mechanics of channelized turbidity currents: A laboratory study. *Marine and Petroleum Geology* 28: 744–760.
- Turner JS, 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press, Cambridge, England.