مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شعاع انحنا بر رفتار جریان غلیظ در خم ۹۰ درجه

مریم شیخ الاسلامی [۱] و مهدی قمشی [۲*]

۱- دانش آموخته‌ی دکترای سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲*- نویسنده مسئول، مهدی قمشی، استاد گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز m.ghomeshi@yahoo.com

تاریخ دریافت:۹۴/۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۷

چکیده

جریان غلیظ جریانی دو فازی است که ذاتاً در اثر اختلاف چگالی روی شتاب ثقل به‌وجود می‌آید. در زمینه شناخت ویژگی‌های جریان غلیظ تا کنون تحقیقات بسیاری انجام شده است که بسیاری از آن‌ها به بررسی مسائل مختلف مربوط به جریان غلیظ در مسیرهای مستقیم اختصاص دارد. آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. در این تحقیق رفتار جریان غلیظ نمکی در یک فلوم با سه خم متوالی با شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر ، طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر وعرض ۲۰ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها در چهار دبی ۰/۵ ، ۰/۷، ۰/۹و ۱/۱ لیتر در ثانیه و چهار غلظت ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ گرم در لیتر صورت پذیرفت. برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک (ADV) مدل Vectrino+ استفاده گردید. Vectrino+ سرعت آب را بر اساس پدیده داپلر اندازه‌گیری می‌کند. نتایج نشان می‌دهد در تمامی آزمایش‌ها، ارتفاع جریان غلیظ در جداره بیرونی قوس بیشتر از جداره داخلی است. با افزایش شعاع انحنای قوس ضخامت جریان غلیظ کاهش یافت و از شیب سطح جریان غلیظ در سطح مشترک جریان غلیظ و سیال ساکن نیز کاسته شد. بیشترین اختلاف ارتفاع جداره داخلی و بیرونی در قوس اول باشعاع انحنای نسبی ۲ و کمترین مقدار آن در قوس سوم با شعاع انحنای نسبی ۶ روی داد.

کلید واژه‌ها: جریان غلیظ، شعاع انحنا نسبی، خم کانال.

Experimental Study of Radius of Curvature Influence On Density Current Behavior in 90 Degree Bend

M. Sheikholeslami[1] and M. Ghomeshi[2*]

1- Ph.D. Student of Water Structure, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

2*- Corresponding Author, Prof. of Hydraulic Structures, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received:16 September 2015 Accepted:17 January 2016

Abstract

A density current is a (two-phase) flow of a fluid of density which is caused essentially by the influence of a density difference on the gravity. The previous experimental studies have been focused on investigation into properties of gravity current in straight channels. This paper presents a series of experiments in which saline gravity currents flowed through in physical models laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz. Experiments were carried out in 8.5 m length, 20cm width and 70cm height of flume and three radiuses of curvature (40, 80,120 cm). In this study the effect of three radiuses of curvature of channel bends on density flow behavior were studied. Experiments performed by four discharges (0.5,0.7,0.9 and 1.1 L/s) and four concentrations (8, 12, 16, 20 and 40 g/L). An Acoustic Doppler velocimeter (ADV-Vectrino^{+}) was used to record the instantaneous downstream velocity. The Vectrino Velocimeter measures water speed using the Doppler effect. The results show that the elevation of the interface at the outer bank is in every case greater than the one at the inner bank. The results show that due to increasing the relative radius of channel bend decreases elevation of the interface and transverse interfacial slopes. The maximum and minimum superelevation occur in r/b =2 and r/b=6, respectively.

Keywords: Density current, Relative of radius of curvature, Curve channel .

مقدمه

زمانی که سیالی با جرم مخصوص $\rho \pm d\rho$ به درون یک تودهٔ سیال با جرم مخصوص ρ جریان یابد، تأثیر شتاب ثقل روی اختلاف جرم مخصوص موجب به‌وجود آمدن جریانی می‌شود که آن را جریان غلیظ می‌نامند. شکل (۱) بخش‌های مختلف جریان غلیظ را نشان می‌دهد. اختلاف جرم مخصوص ممکن است ناشی تفاوت دما، تفاوت در غلظت مواد محلول و یا تفاوت در غلظت ذرات رسوب معلق باشد.

جریان‌ها را براساس تغییرات چگالی در داخل آن‌ها، می‌توان به دو دسته همگن و غیر همگن یا طبقه‌ای[1] تقسیم کرد. در صورتی- که در هر مکانی از جریان مقدار چگالی ثابت باشد، جریان از نوع همگن است اما اگر چگالی در هر یک از جهات تغییر نماید، جریان از نوع طبقه‌ای یا ناهمگن می‌باشد. تفاوت جریان غلیظ با جریان در مجاری رو باز در این است که سیال پیرامون[2] تأثیر کاهنده‌ای روی نیروی ثقل دارد و ضریب کاهش به صورت $\Delta\rho/\rho_\alpha$ می‌باشد. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می باشد، شتاب ثقل کاهش یافته نام دارد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$g' = g\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \qquad (۱)$$

در این رابطه g': شتاب ثقل کاهش یافته و g: شتاب ثقل زمین (۹/۸۱) بر حسب متر بر مجذور ثانیه، ρ_a و ρ_d : به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

همچنین برای شبیه‌سازی و بررسی رژیم جریان غلیظ از عدد فرود دنسیومتریک استفاده می‌گردد (ترنر[3]، ۱۹۷۳):

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g' h \cos\theta}} \qquad (۲)$$

که در آن عدد Fr_d : فرود دنسیمتریک، U : سرعت متوسط، h : عمق جریان و θ : زاویه بستر با افق می‌باشد.

جریان غلیظ به واسطه رأس خود وارد سیال پیرامون می‌گردد. در یک مقطع مشخص بعد از عبور رأس جریان غلیظ و تلاطم‌های آن، جریان غلیظ حالتی شبه یکنواخت پیدا کرده که ناحیه بدنه جریان را تشکیل می‌دهد. الیسون و تِرنِر[4] (۱۹۵۹) روابط زیر را برای استخراج ارتفاع و سرعت متوسط بدنه جریان ارائه نموده اند:

$$Uh = \int_0^\infty u dz \approx \int_0^{h_t} u dz \qquad (۳)$$

$$U^2 h = \int_0^\infty u^2 dz \approx \int_0^{h_t} u^2 dz \qquad (۴)$$

با ترکیب روابط فوق خواهیم داشت:

$$\bar{h} = \frac{\left(\int_0^\infty u dz\right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{\left(\int_0^{h_t} u dz\right)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \qquad (۵)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \qquad (۶)$$

که در این معادله‌ها $\bar{h}$: ارتفاع بدنه، $\bar{U}$: سرعت متوسط، u: سرعت نقطه‌ای، h_t: ارتفاعی که در آن سرعت صفر است، می‌باشند.

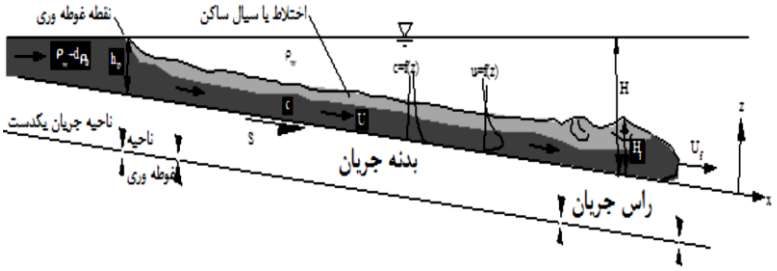
الگوی جریان در قوس

قبل از ورود جریان به خم، جریان موجود در رودخانه جریان طولی بوده و فاقد جریان عرضی می‌باشد.در این حالت پروفیل سرعت به گونه‌ای است که حداکثر مقدار سرعت در محور مرکزی رودخانه می‌باشد. با ورود جریان به قوس رودخانه، نیروی گریز از مرکز بر ذرات آب اثر کرده و باعث می‌شود سطح آب در کنار جداره بیرونی بالا رفته و در مقابل، کاهش عمق در جداره داخلی اتفاق می‌افتد. در اثر این پدیده، اختلاف تراز سطح آب بین دو کناره‌ی قوس ایجاد می‌شود. به دلیل اختلاف بار آبی[5] موجود بین دیواره داخلی و دیواره بیرونی قوس، جریان از پتانسیل بیشتر (دیواره بیرونی) به سمت پتانسیل کمتر (دیواره داخلی) حرکت می‌کند و نیروی فشاری به‌وجود می‌آورد. 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. در نزدیکی بستر کانال، جهت سرعت جریان، تنش برشی مماسی و نیروی درگ به سوی دیواره داخلی است. روزفسکی[6] (۱۹۵۷) با تحلیل جریان در خم‌ها در مختصات استوانه‌ای و بررسی جملات نسبی شتاب شعاعی نتیجه‌گیری کرد که شتاب گریز از مرکزتوسط گرادیان فشار و تنش برشی شعاعی خنثی می‌شود(به نقل از ژولین[7]، ۲۰۰۲):

$$\frac{v^2}{r} = gS_r - \frac{1}{\rho} \qquad (۷)$$

که در آن v: سرعت جریان، τ_r: تنش برشی شعاعی و S_r : شیب شعاعی سطح جریان است که با ارتفاع (z) و یا شعاع انحنا (r) تغییر می‌کند.

1 -Stratified
2- Ambient
3 -Turner
4 -Ellison. and Turner
5-Head
6- Rozovskii
7- Julien



شکل ۱- نمای شماتیکی از جریان غلیظ

اختلاف ترازسطح آب در خم

پروفیل سرعت در یک خم در صورت عدم تأثیر جریان‌های ثانویه تمایل به پروفیل گردابه آزاد (غیر چرخشی) دارد که در آن سرعت نسبت به شعاع تغییرات سرعت معکوس دارد:

$$V_z = \frac{C}{r} \qquad (۸)$$

که در آن V_z: سرعت پیشروی در انحنا به فاصله شعاعی r از مرکز انحنا و C : عدد ثابتی است که ثابت چرخش در حالت گردابه آزاد نامیده می‌شود.

اختلاف ترازسطح آب[1] در جداره داخلی و جداره بیرونی، (Δh) به صورت زیر نشان داده می‌شود (چاو[2]،۱۹۵۹):

$$\Delta h = \frac{C^3}{2g\, {r_o}^2 {r_i}^2}\left(r_o^2 - r_i^2\right) \qquad (۹)$$

رابطه‌های زیادی برای تعیین اختلاف تراز سطح آب ارائه شده است اما دقت رابطه فوق از همه‌ی آن‌ها بیشتر است (چاو، ۱۹۵۹). با قرار دادن رابطه (۸) در معادله (۹) خواهیم داشت:

$$V_m = \frac{C}{r_m} \longrightarrow \Delta h = \frac{{V_m}^2 r_m^2}{2g\, {r_o}^2 {r_i}^2}\left(r_o^2 - r_i^2\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن، r_m : شعاع انحناء متوسط و V_m : سرعت متوسط جریان می‌باشد (بیرامی، ۱۳۸۲).

در زمینه شناخت ویژگی‌های جریان غلیظ تا کنون تحقیقات بسیاری انجام شده است که بسیاری از آن‌ها به بررسی مسائل مختلف مربوط به جریان غلیظ در مسیرهای مستقیم اختصاص دارد که از آن جمله می‌توان به آلتیناکار و همکاران [3] (۱۹۹۶)، اوهی[4] (۲۰۰۳)، اسکویروس و همکاران[5] (۲۰۱۰)، ترابی پوده و همکاران (۲۰۱۳)، اصغری پری(۱۳۸۸) و سروری نژاد(۱۳۹۰) اشاره کرد. اکثر مطالعات مربوط به قوس نیز در مسیرهای مئاندری ایجاد شده در آزمایشگاه صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان کاسم و ایمران[6] (۲۰۰۴)، کرنی و همکاران[7] (۲۰۰۶)، کیویل و همکاران[8] (۲۰۰۶)، ایسلام و ایمران[9] (۲۰۰۸)، استراب و همکاران[10] (۲۰۱۱) و ژانوکو و همکاران[11] (۲۰۱۳) را نام برد.

کاسم و ایمران (۲۰۰۴) با استفاده از مدل عددی سه بعدی فلوئنت[12]، تغییرات جریان غلیظ در یک کانال مارپیچی در سه هندسه مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. هدف از این تحقیق شناخت اثر خم بر ساختار جریان غلیظ با استفاده از مدل عددی بوده است. نتایج نشان می‌دهد به علت متغیر بودن چگالی، نیروی اختلاف فشار در امتداد عمق جریان ثابت نیست. همچنین بیشینه سرعت در امتداد جریان به جای اینکه نزدیک به بالای بدنه جریان غلیظ اتفاق افتد، در نزدیکی کف مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش های ایشان نشان داد هسته چرخش نزدیک به کف کانال تشکیل می¬شود که قدرتی شبیه به جریان ثانویه در کانال‌های رو باز در شرایط دبی لبریز دارد. بر خلاف جریان در مجاری روباز هسته چرخشی ضعیف‌تری در جریان غلیظ مشاهده می‌شود.کرنی و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از یک مدل تحلیلی و نتایج حاصل از یک مدل آزمایشگاهی، به بررسی جریان غلیظ نمکی در یک خم که به‌صورت معبری در حوضچه آزمایشگاهی ایجاد شده است پرداختند. نتایج نشان می‌دهد جریان حلزونی در مسیر حاوی جریان غلیظ نمکی، معکوس می‌باشد. جهت جریان حلزونی به توزیع قائم سرعت پایین دست بستگی داشته و در این حالت (جریان در معبر) بیشینه سرعت پایین دست در نزدیک بستر بوده و در نتیجه جریان در کف به سمت دیواره خارجی است. کیویل و همکاران (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی را با استفاده از جریان غلیظ نمکی در یک معبر زیر آبی انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد بر خلاف جهت جریان ثانویه در رودخانه‌ها که به سمت دیواره داخلی است، جهت جریان ثانویه در معبر زیر آبی معکوس بوده و از دیواره داخلی به سمت دیواره خارجی می‌باشد. تغییرات جریان اصلی و تنش برشی

1- Superelevation
2- Chow
3- Altinakar *et al.*
4- Oehy
5- Sequeiros *et al.*

6- Kassem and Imran
7- Corney *et al.*
8-Keevil *et al.*
9- Islam and Imran
10- Straub *et al.*
11- Janocko *et al.*
12- Fluent

کل بر شکل‌گیری و گسترش انباشتگی در ساحل داخلی در معبرهای زیر آبی مؤثر خواهد بود و در نهایت ممکن است بر تغییر شکل این کانال‌ها نیز اثر گذارد. نتایج آزمایش‌های انجام شده درخم توسط اسلام و امران (۲۰۰۸) نشان داد همان‌طور که عدم تعادل بین نیروی گریز از مرکز و نیروی اختلاف فشارموجب تشکیل جریان حلزونی در رودخانه های مارپیچی می‌شود، این عدم تعادل منجر به شکل‌گیری چرخش‌های ثانویه در جریان غلیظ زیرگذر نیز می‌گردد سرعت عرضی ناشی از انحنا، وجود دو هسته چرخشی با چرخش متفاوت را نشان می‌دهد که یکی از آن‌ها بالای دیگری شکل می‌گیرد .آبد و همکاران[1] (۲۰۱۱) به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی جریان ثانویه ناشی از عبور جریان غلیظ نمکی ازکانالی با پیچ و خم زیاد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد پروفیل قائم سرعت در امتداد جریان و اختلاف چگالی نسبی جریان غلیظ زیرگذر مرتباً با عدد فرود دنسیمتریک ($Fr_d = \frac{V}{\sqrt{g'D\cos\theta}}$) تغییر می‌کند. در رژیم بالا با عدد فرود دنسیمتریک بالا جهت جریان ثانویه معکوس، در رژیم متوسط با مقادیر متوسط عدد فرود دنسیمتریک جهت جریان ثانویه نرمال و رژیم پایینی با عدد فرود دنسیمتریک پایین جهت جریان ثانویه معکوس می‌باشد.

تا کنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص هیدرولیک جریان در خم‌های مجاری باز صورت گرفته و از زوایای مختلف به آن پرداخته شده است. همان‌گونه که اشاره گردید در سال‌های اخیر مطالعه پیرامون رفتار جریان غلیظ در کانال‌های سینوسی و خم‌ها مورد توجه قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق مطالعه تأثیر شعاع انحناء بر ساختار جریان غلیظ در خم می‌باشد که به منظور تحقق این هدف آزمایش‌هایی در یک فلوم قوسی شکل با سه شعاع انحنای متفاوت انجام گردید.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. برای انجام این تحقیق فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱ به همراه سه قوس متوالی۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر، ساخته شد (شکل۲). برای انجام آزمایش‌ها، از نمک طعام و ماده رنگی به نام پودر رنگرزی برای ایجاد سیال غلیظ استفاده گردید. علت استفاده از ماده رنگی به همراه محلول آب و نمک برای تشخیص سیال غلیظ (محلول آب و نمک) از سیال پیرامون (آب شهری) و قابل رؤیت بودن آن می‌باشد. آزمایش‌ها در چهار دبی ۰/۵ ، ۰/۷، ۰/۹و ۱/۱ لیتر در ثانیه و در غلظت ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ گرم در لیتر صورت پذیرفت. ابتدا جریان غلیظ به کمک محلول اب و نمک و ماده رنگی در مخزن اختلاط تهیه می‌گشت. سیال غلیظ تولید شده از طریق خط لوله و با شدت ثابت از مخزن اختلاط به یک منبع با ارتفاع ثابت (مخزن جریان غلیظ) پمپاژ و سپس از طریق سیستم لوله کشی وشیر فلکه به داخل فلوم هدایت می‌گردید (شکل۳). پیش از ورود جریان غلیظ، فلوم کاملاً آبگیری شده و شیر فلکه ورود سیال غلیظ به محوطه پشت دریچه فلوم، باز می‌شد. (در انتهای ۵۰ سانتی‌متر ابتدای کانال یک دریچه برای عبور جریان غلیظ تعبیه شده است. با گشودن این دریچه جریان غلیظ در کف فلوم و در زیر آب ساکن به حرکت در می‌آید). اندازه‌گیری دبی ورودی از طریق دبی سنج و تنظیم آن از طریق شیر فلکه مذکور صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دبی، به محض آنکه سطح سیال غلیظ در پشت دریچه فلوم برابر با سطح سیال پیرامون (آب) می‌گشت، دریچه فلوم گشوده می‌شد. بدین شکل جریان غلیظ با دبی تنظیم شده وارد فلوم (سیال پیرامون) می‌گشت. حرکت جریان غلیظ زیر سیال محیطی آغاز و پس از رسیدن رأس جریان به انتهای فلوم، شیر فلکه انتهایی فلوم (شیر فلکه تخلیه) باز شده و رأس جریان و تلاطم‌های آن تخلیه می‌گردید. در این حالت بخشی از سیال ساکن (آب تمیز) نیز ازفلوم خارج می‌شود. برای جلوگیری از پایین افتادن سطح آب در فلوم بر اثر تخلیه، شیر فلکه لوله ورودی آب تمیز به فلوم باز و مقدار لازم آب به فلوم اضافه می‌شد تا مانع افت تراز گردد. برای جلوگیری از به‌وجود آمدن تلاطم در این ناحیه، تیغه آرام کننده‌ای در انتهای فلوم نصب گردید. بعد از تخلیه کامل رأس جریان و حصول اطمینان از یکنواخت بودن بدنه جریان در طول فلوم، ارتفاع جریان غلیظ در هر قوس در فواصل ۱۰ سانتی‌متری در طول فلوم در دو دیواره داخلی و دیواره خارجی قرائت و ثبت گردید. به منظور برداشت ارتفاع بدنه جریان غلیظ از اشل با دقت ۱ میلی‌متر استفاده گردید. در دیواره داخلی و خارجی هر سه قوس، خط کش‌های تلقی به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر نصب شده‌اند. نمونه‌ای از این اشل‌ها را می‌توان در شکل (۴) مشاهده کرد.

برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک[2] (ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است (شکل ۵). این دستگاه می‌تواند نوسانات سرعت را در یک بازه زمانی مشخص در سه راستای عمود بر هم ثبت و به کمک نرم افزار مربوطه پردازش نماید. اندازه‌گیری سرعت توسط این دستگاه بر پایه پدیده داپلر استوار است.

در این تحقیق در هر خم ۱۶ آزمایش و در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شده است که جدول (۱) خلاصه‌ای از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در جدول (۲) مشخصات هر آزمایش به‌ازای دبی و غلظت‌های مختلف در هر خم آورده شده است.

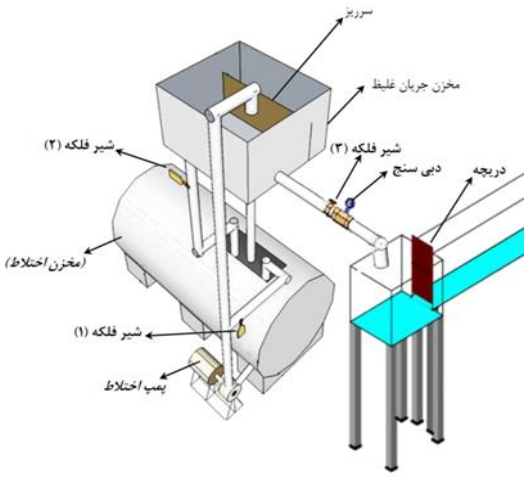
1- Abad *et al.*

2- Acoustic Doppler Velocity meter

علوم و مهندسی آبیاری (مجله ی علمی- پژوهشی)، جلد ۴۰، شماره‌ی۱ بهار ۹۶



شکل۲- فلوم مورد استفاده برای انجام آزمایش



شکل ۳- مخزن اختلاط و مخزن جریان غلیظ



شکل٤- اشل اندازه‌گیری عمق جریان غلیظ



شکل ۵- نمایی کلی از دستگاه سرعت سنج + Vectrino

جدول ۲- مشخصات هر آزمایش بازای دبی و غلظت های مختلف در هر خم

شماره آزمایش در هر خم	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
دبی جریان غلیظ (لیتردر ثانیه)	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱
غلظت (گرم در لیتر)	۸	۱۲	۱۶	۲۰	۸	۱۲	۱۶	۲۰	۸	۱۲	۱۶	۲۰	۸	۱۲	۱۶	۲۰

جدول ۳- سرعت نقطه‌ای (u) اندازه گیری شده در اعماق مختلف بازای غلظت ۲۰ گرم بر لیتر

ضخامت بدنه (سانتیمتر)	دبی جریان غلیظ (لیتر بر ثانیه)				
	۰/۵	۰/۷	۰/۹	۱/۱	
	سرعت نقطه ای (سانتی متر بر ثانیه)				
۰	۰	۰	۰	۰	
۰/۲	۲/۳۵		۲/۴۹	۲/۲۶	۲/۰۶
۱/۵	۲/۵۸		۲/۸۶	۳/۳۹	۳/۹۲
۳	۲/۶۶		۳/۲۳	۳/۵۵	۳/۹۳
۴/۵	۲/۶۱		۳/۲۱	۳/۶۴	۳/۶۵
۶	۲/۱۶		۲/۰۳	۲/۸۲	۳/۳۸
۹	۰		۰	۰	۰

نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش قبلی اشاره شد در این تحقیق برای اندازه‌گیری سرعت جریان غلیظ، سرعت سنج ADV به‌کار گرفته شد. مؤلفه های سرعت (u، v، w) در ۲۵ نقطه در هر مقطع اندازه¬گیری و ذخیره گردید. زمان ذخیره مؤلفه‌های سرعت لحظه¬ای در هر نقطه ۲۰ تا ۳۰ ثانیه به طول می‌انجامید؛ سپس سنسور دستگاه به سمت نقطه‌ی بعدی جابه جا شده و این عمل تا برداشت همه نقاط ادامه می‌یافت. برای هر نقطه به طور متوسط ۲۰۰۰ داده توسط نرم افزار ثبت شده است. شکل (۶) پروفیل عرضی سرعت پایین دست (u) را در مسیر مستقیم به ازای دبی‌های مختلف و غلظت ۲۰ گرم در لیتر نمایش می‌دهد. از مقادیر v، w به دلیل ناچیز بودن در مسیر مستقیم صرف‌نظر شده است. داده‌های ثبت شده توسط نرم افزار +Vectrino در محیط این نرم افزار با پسوند vno. ذخیره می‌گردد. سپس داده‌های ذخیره شده در محیط نرم افزار به فرمت dat تبدیل می‌شوند. در مرحله بعد، این داده‌ها به محیط نرم افزار Excel وارد و برنامه‌ای تنظیم شد تا بتواند با میانگین‌گیری در اکسل، متوسط هر یک از مؤلفه‌های سرعت را در هر نقطه برآورد نماید. در جدول (۳) مقادیر سرعت نقطه‌ای (u) در اعماق ۰/۲، ۱/۵، ۳، ۶ و ۹ و به‌ازای دبی‌های ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت ۲۰ گرم در لیتر نشان داده شده است.سرعت متوسط جریان در محور کانال با استفاده از سرعت‌های نقطه‌ای در اعماق فوق و با استفاده از رابطه (۱۱) برآورد می‌شود. این رابطه توسط الیسون و ترنر (۱۹۵۹) به منظور برآورد سرعت متوسط بدنه جریان ارائه شده است

$$\overline{U} = \frac{\int_0^{\infty} u^2 dz}{\int_0^{\infty} u\, dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u\, dz} \qquad (۱۱)$$

در این معادله $\overline{U}$: سرعت متوسط، u : سرعت نقطه‌ای، h_t : ارتفاعی که در آن سرعت صفر است، می‌باشند.

در جدول (۴) مقادیر سرعت متوسط جریان به‌ازای دبی‌های مختلف و غلظت ۲۰ گرم در لیتر محاسبه شده است. به همین ترتیب سرعت متوسط جریان برای غلظت‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ گرم در لیتر محاسبه می‌گردد. در تمامی آزمایش‌ها، ارتفاع جریان غلیظ در دیواره بیرونی بیشتر از دیواره داخلی قوس است. شکل (۷) ارتفاع جریان غلیظ را در دیواره داخلی و دیواره خارجی در رأس خم در قوس اول با نسبت شعاع انحنای ۲ نمایش می‌دهد. این موضوع در قوس دوم و سوم نیز صادق است؛ اگرچه با افزایش شعاع قوس اختلاف ارتفاع کاهش می‌یابد.

سرعت آب در در نزدیکی کف بستر به دلیل مقاومت در مقابل جریان کمتر از سرعت در سطح آب می‌باشد. ذراتی که در حال حرکت در خم هستند، علاوه بر نیروی ثقل تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز نیز می‌باشند که می‌خواهند آن‌هارا از مسیر مستقیم منحرف نماید. چون توزیع سرعت در مقطع نا متقارن است، نیروی گریز از مرکز در عمق ثابت نیست و در هر نقطه تابع سرعت جریان می‌باشد. جریان طولی و نیروی گریز از مرکز سعی بر هدایت آب در جهت x و y دارند که این امر منجر به بر هم خوردن تعادل دینامیک در مقطع جریان می‌شود. برای برقراری تعادل شیبی در سطح آب به‌وجود می‌آید که ناشی از عکس العمل نیروی گریز از مرکز بوده و سبب بالا آمدن سطح آب در جدارهبیرونی و پایین آمدن سطح آب در جداره داخلی می‌گردد.

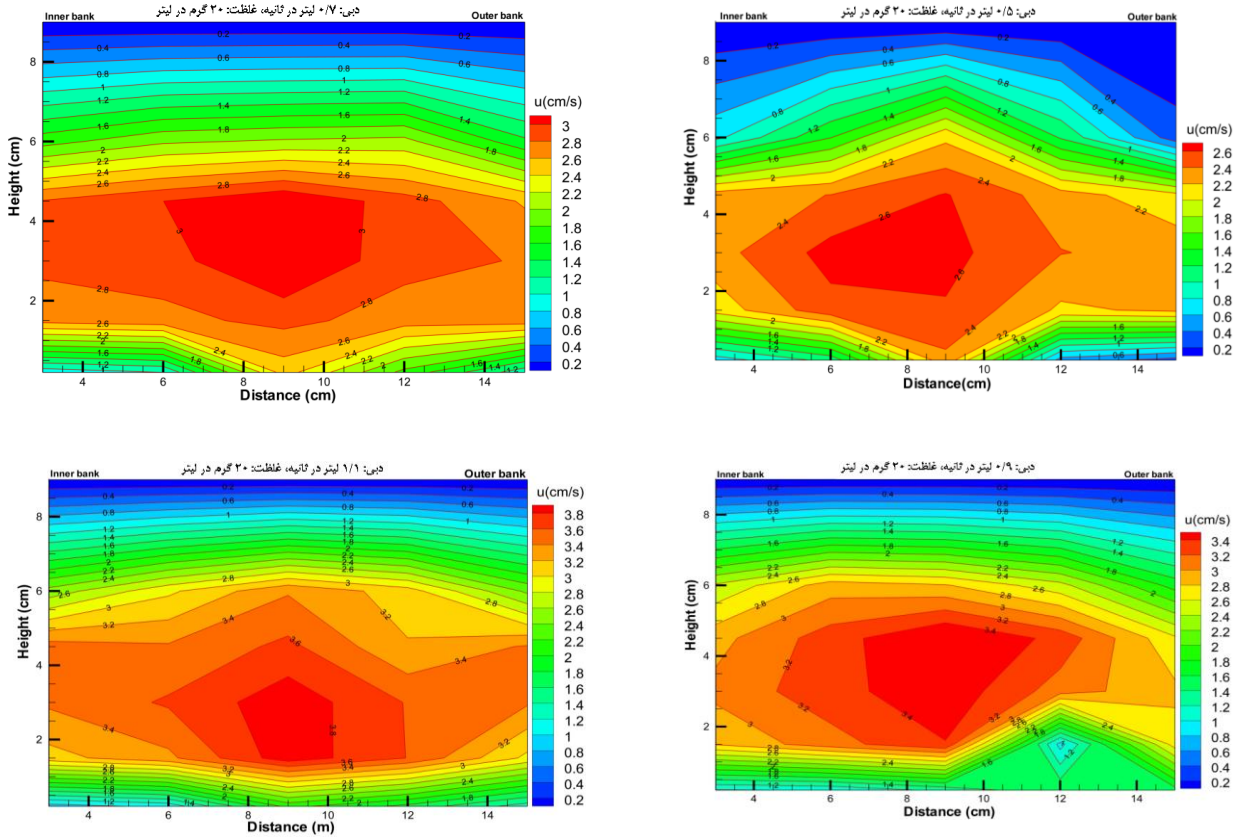
شیب سطح آب را می‌توان با صرف‌نظر نمودن از مقاومت کف بستر و از طریق معادله تعادل نیروها به صورت زیر نوشت:

$$i_y = \frac{dz}{dy} \approx \frac{U^2}{rg} \qquad (۱۲)$$

i_y : شیب سطح آب در جهت y، U : سرعت متوسط جریان در جهت و r : شعاع انحنای خم می‌باشد.

با افزایش دبی، ارتفاع جریان غلیظ در دیواره بیرونی و دیواره داخلی افزایش می‌یابد. با افزایش شعاع انحنای قوس شیب اختلاف ارتفاع تراز جریان در دیواره بیرونی و داخلی روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل۸). در قوس سوم با شعاع انحنای ۶ تراز آب تقریباً به حالت افقی درمی‌آید؛ بطوری‌که اختلاف ارتفاع در دبی ۰/۷ و ۰/۹ لیتر در ثانیه صفر ودر دبی ۰/۵ و ۱/۱ لیتر در ثانیه۰نزدیک به صفر می‌باشد (شکل۸- ج).

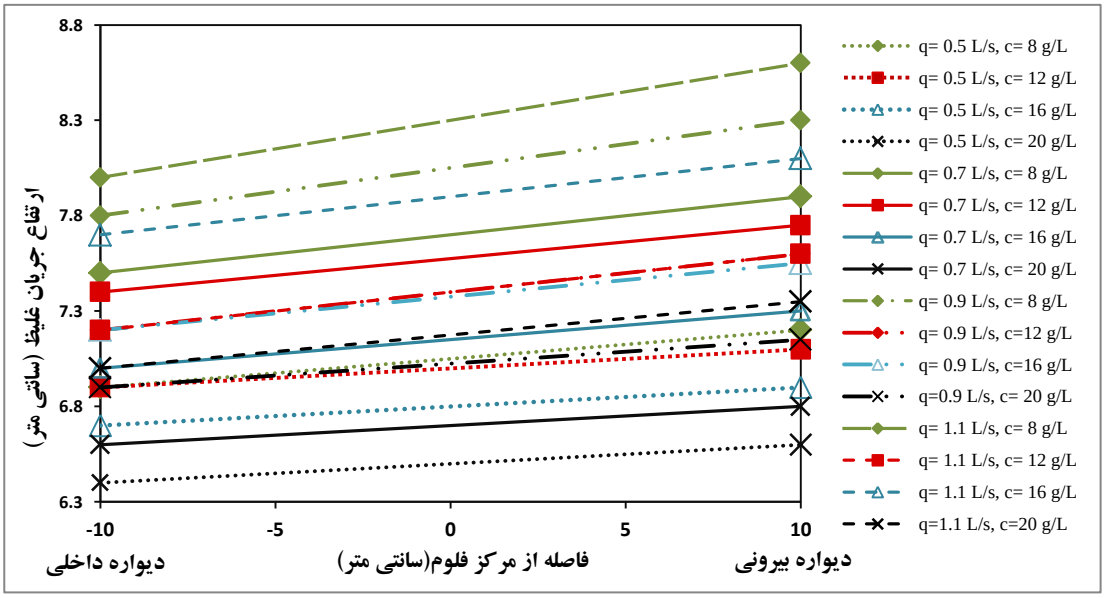
با افزایش شعاع خم نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. در این حالت سرعت عرضی کاهش و سرعت در راستای مستقیم افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این قوس سوم نزدیک به خروجی کانال بوده و نیروی مکش ناحیه خروجی منجر به افزایش سرعت طولی شده و این امر در کاهش شیب سطح آب و اختلاف ارتفاع نقش به سزایی را ایفا می‌کند. از این رو اختلاف تراز سطح آب در قوس سوم بسیار ناچیز می‌باشد.



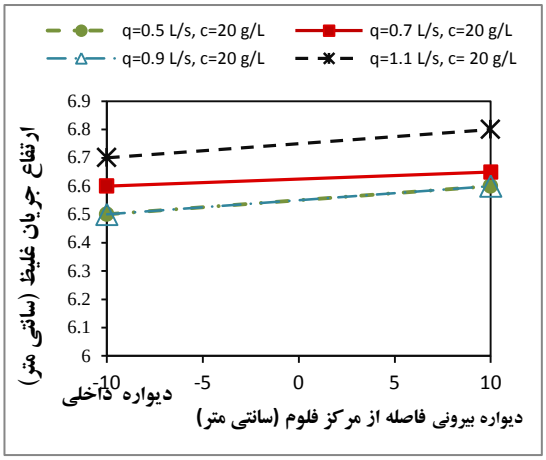
شکل٦- پروفیل عرضی سرعت پایین دست (u) به منظور تعیین سرعت متوسط جریان (محور افقی فاصله از دیواره داخلی در عرض کانال و محور قائم ارتفاع جریان غلیظ می‌باشد).

جدول٤- محاسبه سرعت متوسط جریان به‌ازای غلظت ۲۰ گرم بر لیتر

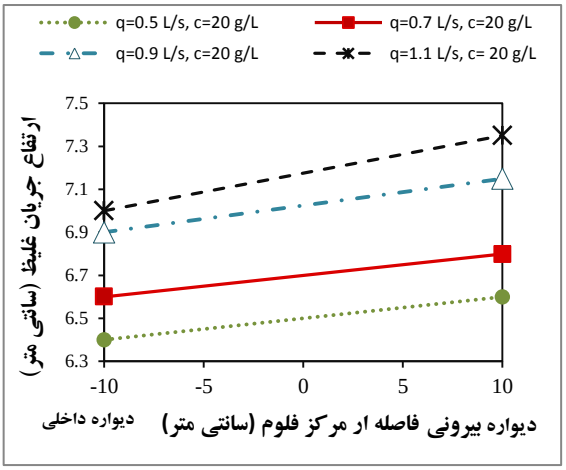
سرعت متوسط (سانتی متر بر ثانیه)	$u_{ave}^2 \Delta Z$ (cm^3/s^2)	$u_{ave} * \Delta Z$ (cm^2/s)	ΔZ (cm)	$u_{ave}\, i$ (cm/s)	دبی جریان غلیظ (لیتر بر ثانیه)
۲/۲۵۶	۰/۲۷۶	۰/۲۳۵	۰/۲	۱/۱۷۵	۰/۵
	۷/۹۰۲	۳/۲۰۵	۱/۳	۲/۴۶۶	
	۱۰/۳۰۱	۳/۹۳۱	۱/۵	۲/۶۲۱	
	۱۰/۴۲۷	۳/۹۵۵	۱/۵	۲/۶۳۷	
	۸/۵۲۸	۳/۵۷۷	۱/۵	۲/۳۸۴	
	۳/۴۸۶	۳/۲۳۴	۳	۱/۰۷۸	
۲/۶۰۹	۰/۳۱۰	۰/۲۴۹	۰/۲	۱/۲۴۴	۰/۷
	۹/۲۹۹	۳/۴۷۷	۱/۳	۲/۶۷۴	
	۱۳/۹۰۴	۴/۵۶۷	۱/۵	۳/۰۴۵	
	۱۵/۵۳۴	۴/۸۲۷	۱/۵	۳/۲۱۸	
	۱۰/۳۰۰	۳/۹۳۱	۱/۵	۲/۶۲۰	
	۳/۱۰۱	۳/۰۵۰	۳	۱/۰۱۷	
۲/۸۹۹	۰/۰۸۰	۰/۱۲۶	۰/۲	۰/۶۳۲	۰/۹
	۷/۰۳۳	۳/۰۲۴	۱/۳	۲/۳۲۶	
	۱۸/۰۴۰	۵/۲۰۲	۱/۵	۳/۴۶۸	
	۱۹/۳۸۴	۵/۳۹۲	۱/۵	۳/۵۹۵	
	۱۵/۶۵۱	۴/۸۴۵	۱/۵	۳/۳۲۰	
	۵/۹۵۷	۴/۲۲۷	۳	۱/۴۰۹	
۳/۲۱۵	۰/۲۱۳	۰/۲۰۶	۰/۲	۱/۰۳۱	۱/۱
	۱۱/۶۴۸	۳/۸۹۱	۱/۳	۲/۹۹۳	
	۲۳/۱۱۴	۵/۸۸۸	۱/۵	۳/۹۲۶	
	۲۱/۵۴۷	۵/۶۸۵	۱/۵	۳/۷۹۰	
	۱۸/۵۴۲	۵/۲۷۴	۱/۵	۳/۵۱۶	
	۸/۵۶۱	۵/۰۶۸	۳	۱/۶۸۹	



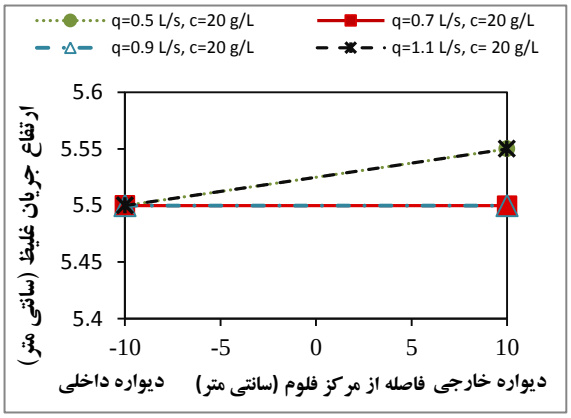
شکل۷- اختلاف تراز آب در دبی و غلظت های مختلف در قوس اول (r/b=2)



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۸- اختلاف تراز آب بین دیواره داخلی و بیرونی به‌ازای غلظت ۲۰ گرم در لیتر در دبی های مختلف الف) در قوس اول (r/b=2)، ب) در قوس دوم (r/b=4) ، ج) در قوس سوم (r/b=6) (در قوس سوم اختلاف ارتفاع در هر چهار دبی صفر و نزدیک به صفر می‌باشد؛ از این رو نمودارها همپوشانی دارند)

به منظور تخمین اختلاف تراز آب در جداره داخلی و جدار بیرونی حداکثر ، تغییرات پارامترهای موثر بر جریان غلیظ روی ضخامت جریان غلیظ مورد بررسی قرارگرفت. متغیرهای موجود برای تحلیل ابعادی اختلاف ارتفاع در دو جداره در بدنه جریان غلیظ درخم مطابق رابطه (۱۳)می‌باشد :

$$f(\Delta h, r_m, b, g, \rho_d, \rho_a, U, h) = 0 \qquad (۱۳)$$

در این معادله Δh : اختلاف ارتفاع در جداره داخلی و بیرونی خم، r_m :شعاع انحناء متوسط، b : عرض فلوم، g : شتاب ثقل، ρ_d: جرم مخصوص جریان غلیظ، ρ_a: جرم مخصوص سیال محیطی، U: سرعت متوسط جریان، h : ضخامت بدنه جریان غلیظ می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً عنوان شد شتاب ثقل مؤثر بر جریان غلیظ که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ عمل می‌کند، شتاب ثقل کاهش یافته است که به صورت g' تعریف می‌شود. با توجه به معادله (۱) پارامترهای g، ρ_d و ρ_a در تعریف شتاب ثقل مؤثر به‌کار رفته که می‌توان از با وارد کردن g' در رابطه (۱۳) تعداد پارامترها را کاهش داد:

$$f(\Delta h, r_m, b, g', U, h) = 0 \qquad (۱۴)$$

با استفاده از تحلیل ابعادی به روش باکینگهام و انتخاب پارامترهای U و g' به عنوان پارامترهای تکراری، اعداد بدون بعد زیر حاصل می‌شود:

$$f\left(\frac{g'\Delta h}{U^2}, \frac{r_m}{b}, Fr_d\right) = 0 \qquad (۱۵)$$

$$\frac{g'\Delta h}{U^2} = \left(Fr_d, \frac{r_m}{b}\right) \qquad (۱۶)$$

با استفاده از ۹۰ درصد داده‌ها و با کمک نرم افزار spss بهترین رابطه با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره به‌دست آمد. رابطه (۱۷) با ضریب همبستگی ۷۶ درصد رابطه مناسبی برای تخمین اختلاف ارتفاع دیواره بیرونی و داخلی خم می‌باشد:

$$\Delta h = \frac{U^2}{g'}\left(0.724 - 0.963Fr_d - 0.033\frac{r_m}{b}\right) \qquad (۱۷)$$

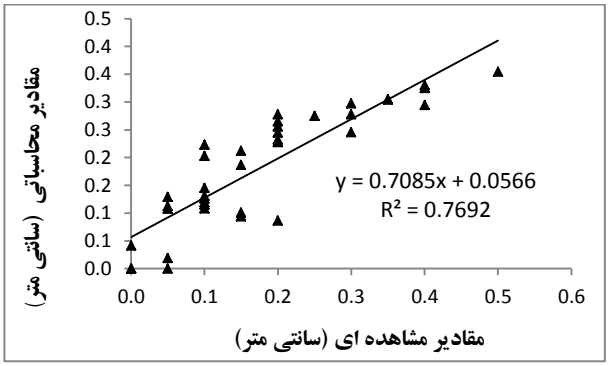
با توجه به ضریب عدد فرود دنسیمتریک و ضریب $\frac{r_m}{b}$ مشخص می‌گردد که در این معادله تأثیر عدد فرود دنسیمتریک بیش از ۳۰ برابر $\frac{r_m}{b}$ می‌باشد. بنابراین عدد فرود دنسیمتریک جریان غلیظ ورودی نقش تعیین کننده ای در تعیین اختلاف ارتفاع جداره بیرونی و جداره داخلی ایفا می‌کند. شکل (۹) اختلاف ارتفاع مشاهده شده در آزمایش‌ها را با مقادیر محاسبه شده توسط رابطه (۱۷) مقایسه می‌کند. متوسط خطای محاسبه اختلاف ارتفاع با استفاده از رابطه (۱۷) حدوداً ۲۸ در صد می‌باشد. درصد خطا با استفاده از رابطه (۱۸) برآورد شده است:

$$\%E = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left|X_{mi} - X_{pi}\right|}{\sum_{i=1}^{N} X_{mi}} \times 10 \qquad (۱۸)$$

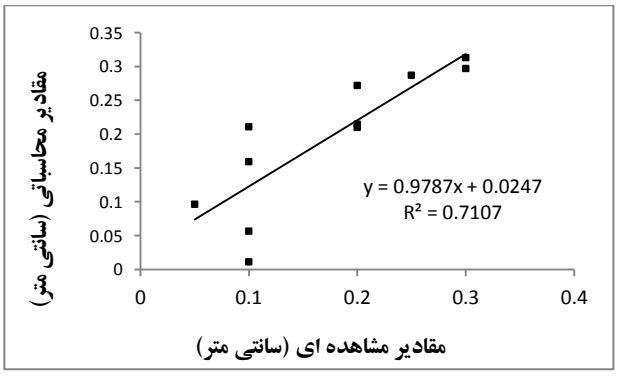
در رابطه فوق، X_P : مقادیر برآورد شده توسط رابطه و X_m : مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه و N: تعداد داده‌ها می‌باشد.

با استفاده از ۱۰ درصد باقیمانده داده‌ها صحت سنجی رابطه فوق صورت گرفت. شکل (۱۰) نمودار صحت سنجی ده درصد باقیمانده داده‌ها را نشان می‌دهد. بین مقادیر اختلاف ارتفاع مشاهده شده در آزمایش‌ها و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه ۱۷، ضریب همبستگی ۷۲ درصد مشاهده می‌گردد که از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است.

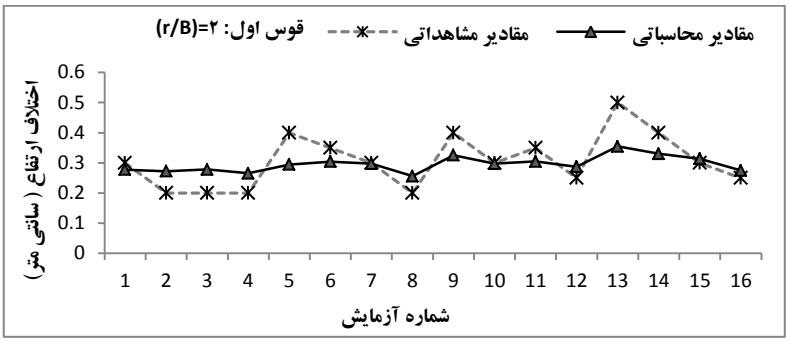
در شکل (۱۱) مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی برای هر قوس با شعاع انحنای نسبی ۲، ۴ و ۶ نمایش داده شده است. قوس اول با خطای متوسط ۱۸ درصد کمترین خطا و قوس سوم با خطای متوسط ۵۰ درصد بیشترین خطا را دارا می‌باشد. تغییر و افزایش ناگهانی سرعت (به علت کاهش نیروی گریز از مرکز و نیز نزدیک شدن به خروجی کانال) و اختلاف ارتفاع ناچیز ناشی از آن بین دیواره داخلی و دیواره بیرونی منجر به خطای بیش از اندازه در این خم شده است.



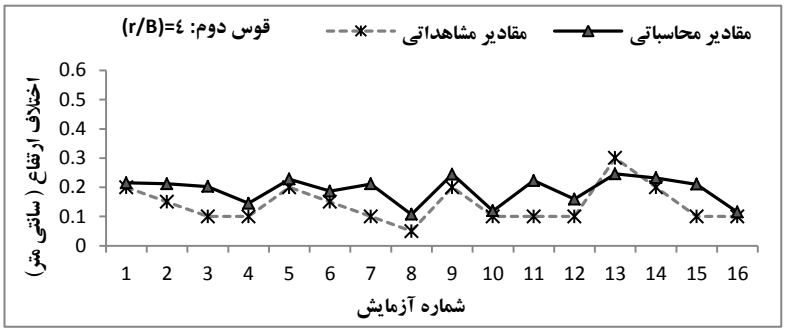
شکل ۹- مقایسه مقادیر پیش بینی شده و مقادیر مشاهده ای اختلاف تراز آب در جداره داخلی و بیرونی خم



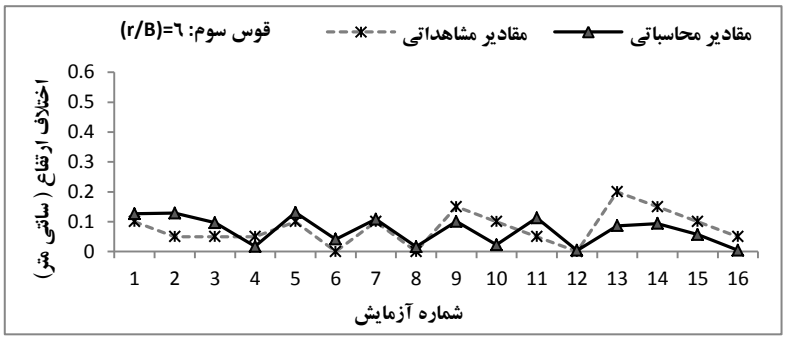
شکل ۱۰- صحت سنجی رابطه (۱۷) با استفاده از ده درصد داده ها



(الف)



(ب)

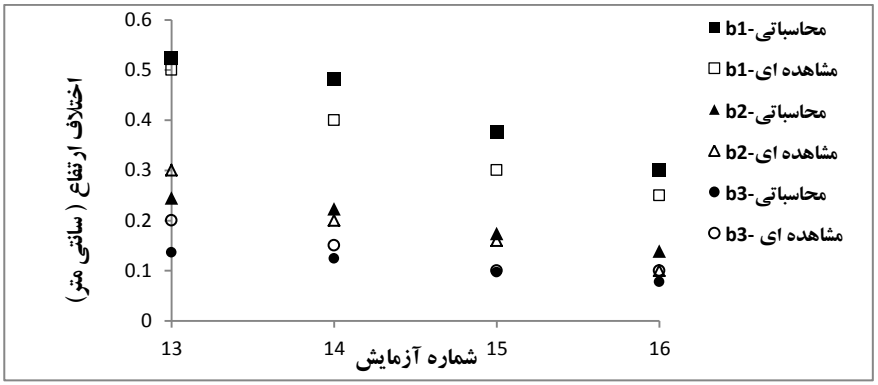


(ج)

شکل ۱۱- مقایسه مقادیر اختلاف تراز آب مشاهده شده و محاسبه شده با استفاده از رابطه(۱۷) به ازای دبی‌ها و غلظت‌های مختلف: الف) در قوس اول (r/B=2) ، ب) در قوس دوم (r/B=4) و ج) در قوس سوم (r/B=6)

شکل (۱۲) مقادیر Δh مشاهده شده و تخمین زده شده به‌ازای دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت های ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ گرم در لیتر (آزمایش ۱۳، ۱۴، ۱۵و ۱۶ برای هر خم) نشان داده شده است. در هر قوس در دبی ثابت، افزایش غلظت جریان به دلیل افزایش مولفه‌ی وزن سیال در جهت شیب، باعث افزایش سرعت در جهت طولی می‌گردد و این امر کاهش اختلاف ارتفاع را موجب می‌شود. افزایش غلظت به میزان ۲۵ درصد، به طور متوسط کاهش ۳۰ درصدی اختلاف ارتفاع را به همراه خواهد داشت.

همچنین در دبی و غلظت ثابت با افزایش شعاع انحنای قوس مقدار Δh روند کاهشی را نشان می‌دهد؛ بطوری‌که در قوس سوم و نسبت شعاع انحنای ۶ به ازای دبی ۱/۱ لیتر در ثانیه و غلظت ۲۰ گرم در لیتر میزان اختلاف ارتفاع ۶۰ درصد نسبت به قوس اول کاهش یافته است. این روند در سایر غلظت‌ها نیز مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۲- مقادیر اختلاف تراز مشاهده شده و محاسبه شده (دبی ۱/۱ لیتر درثانیه و غلظت‌های مختلف در هر خم)

نتیجه‌گیری

دراین تحقیق رفتار جریان غلیظ تحت تأثیر شعاع انحنای قوس مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد در تمامی مقاطع ارتفاع جریان غلیظ در جداره بیرونی قوس بیشتر از جداره داخلی قوس می‌باشد، همچنین با افزایش نسبت شعاع انحنا، ارتفاع جریان غلیظ در قوس کاهش یافته و شیب سطح مشترک جریان غلیظ وسیال پیرامون نیز کاهش می‌یابد. قوس اول یا شعاع انحنای نسبی ۲ بیشترین اختلاف ارتفاع و قوس سوم با شعاع انحنای نسبی ۶ کمترین اختلاف ارتفاع را داراست. در یک دبی ثابت با افزایش غلظت مخزن از ۸ گرم بر لیتر به ۲۰ گرم در لیتر اختلاف ارتفاع روند کاهشی را نشان می‌دهد.

تشکرو قدردانی

در پایان از اساتید محترم و مسئولان دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل همکاری و حمایت مالی طی انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱- اصغری پری، ا. ۱۳۸۸. بررسی اثر ارتفاع مانع بر رسوبگذاری مخزن در جریان غلیظ. رساله دکتری رشته سازه های آبی. دانشکده علوم آب. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- بیرامی، ک. سازه های انتقال آب. ۱۳۸۲. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۶۲ صفحه.

۳- . سروری‌نژاد، ب. ۱۳۹۱. بررسی اثر زاویه همگرایی بر خصوصیات جریان غلیظ ، رساله دکتری رشته سازه های آبی. دانشکده علوم آب. دانشگاه شهید چمران اهواز.

4- Abad, J. D., Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Pirmez, C., García, M. H., and G. Parker. 2011. Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory. Journal of Sediment Research, 81: 787–813.

5- Altinakar, M. S., Graf, W.H., Hopfinger E.J. 1996.Flow structure in turbidity currents. Journal of Hydraulic Research, 34(5): 713-718.

6- Corney, R. K. T., Peakall, J. D., Parsons, R., Elliott L., Amos, K. J. J,. Best, L., Keevil, G. M and D. B. Ingham. 2006. The orientation of helical flow in curved channels, Sedimentology, 53: 249–257.

7- Chow, Ven Te. 1959.Open-channel hydraulics. New York: McGraw-Hill.

8- Islam, M. A., and J. Imran. 2008. Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel. Journal of Geophysical Research, 113, C07041, doi:10.1029/2007JC004292.

9- Ellison, T. H. and J. S. Turner. 1959. Turbulent entrainment in stratified flow. Journal of Fluid Mechanics, 6(3):423-448.

10- Janocko, M., Cartigny, M. B. J., Nemec, W. and E. W. M. Hansen. 2013. Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels: Laboratory experiments and numerical simulations. Marine and petroleum geology,41: 222-249.

11- Julien, P. Y. 2002. River mechanics. Cambridge University. Press, New York.

12- Kassem, A., and J. Imran. 2004. Three-dimensional modeling of density current. II: Flow in sinuous confined and unconfined channels. Journal of Hydraulic Research, 42(6): 591– 602.

13- Keevil, G. M., Peakall,J. J., Best, L., and K. J. Amos. 2006. Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel. Marine and Petroleum Geology, 229(3–4): 241–257.

14- Oehy, C. 2003. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents, PhD thesis, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, Ecole Polytech. Fed. de Lausanne, Lausanne, France.

15- Sequeiros, O. E., Spinewine, B, Beaubouef, R. T., Sun, T., García, M. H. 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.

16- Straub, K. M., Mohrig, D., Buttles, J., McElroy B. and C. Pirmez. 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.

17- Torabi Poudeh, H., Emamgholizadeh, S. and M. Fathi-Moghadam. 2013. Experimental study of the velocity of density currents in convergent and divergent channels, International Journal of Sediment Research 28: 254-259.

18- Turner JS. 1973. Buoyancy effects in fluids. Cambridge University Press, Cambridge, England.