# بررسی اثر غلظت و شعاع انحنا بر روی ضخامت بدنه جریان گل‌آلود در خم ۹۰ درجه


**چکیده**

**رسوبگذاری در مخازن سدها، مهمترین عامل کاهش عمر مفید آن‌ها می‌باشد. جریان‌های گل‌آلود، جریان‌هایی مملو از رسوب هستند که به صورت لایه‌ای زیر آب شفاف مخازن به حرکت در می‌آیند و عامل عمده و مهم انتقال رسوبات به داخل مخازن سدها، دریاها و اقیانوس‌ها می‌باشند. در این پژوهش به بررسی اثر شعاع انحنای قوس، غلظت و دبی جریان غلیظ رسوبی گذرنده از خم ۹۰ درجه، بر روی ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ پرداخته شده است. بدین منظور، آزمایش‌ها با استفاده از جریان غلیظ رسوبی با ذرات رسوبی معلق به مشخصه‌ی $D_{50} = 1.93\ \mu m$ و دبی ۰/۵ و ۱/۱ لیتر بر ثانیه در چهار غلظت رسوبی ورودی به فلوم ۹، ۱٤، ۱۹ و ۲۳ گرم بر لیتر و در فلومی به عرض ۲۰ سانتی‌متر و با دو شعاع انحنای ٤۰ و ۸۰ سانتی‌متر در شرایط جریان ورودی زیربحرانی انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده با عبور جریان کدر از خم ۹۰ درجه، اضافه ارتفاعی در جداره‌ی خارجی قوس و کاهش ارتفاع در جداره‌ی داخلی قوس، به علت نیروی گریز از مرکز بوجود آمده ناشی از ورود جریان به خم مشاهده شد. علاوه بر این نتایج نشان داد که با افزایش غلظت، ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس کاهش یافت و با افزایش دبی، افزایش یافت. در غلظت و دبی ثابت، با افزایش شعاع انحنای قوس، ارتفاع بدنه‌ی جریان کدر در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس و نیز شیب عرضی سطح جریان کدر، کاهش یافت. شیب عرضی ایجاد شده در سطح جریان کدر، در دبی ثابت، در خم ۹۰ درجه تند $(R/B = 2)$ با افزایش غلظت، کاهش یافت.**



**کلید واژه‌ها: جریان کدر، قوس ۹۰ درجه، ضخامت بدنه جریان، شیب عرضی سطح جریان.**


# Investigation the effect of concentration and radius of bend curvature on turbidity current body thickness in 90 degree bend


**Abstract**

Sedimentation in dam reservoirs, is the most important factor reducing dam service life. Turbidity currents are sediment-laden flows, that move under clear water of reservoirs in the form of layer. They are major and significant factors of sediment transport into the reservoirs, seas and oceans. In this study, the effect of radius of bend curvature, concentration and flow rate has been investigated on thickness of turbidity current body passing through 90 degree bend. For this purpose, the experiments were carried out using sediment dense flow with characteristic suspended sediment particles $D_{50} = 1.93\ \mu m$ and 0.5, 1.1 $l/s$ flow rate in four sediment concentrations at flume entrance (9, 14, 19, 23 $g/l$) with 20cm flume width and two radius of curvature (40 and 80 cm), under subcritical condition of input flow. According to the obtained results, upwelling of the water surface in the outer wall and height reduction in the inner wall of the bend by turbidity current passing through of 90 degree bend, due to the centrifugal force caused by flow entry to the bend. It was also observed that with increasing concentration, thickness of turbidity current body decreases at the inner and outer wall of the bend and with increasing the flow rate, mentioned thickness increases. In constant concentration and flow rate, by increasing the radius of bend curvature, the height of turbidity current body in the inner and outer walls of the bend and also the transverse tilt of the turbidity flow, are reduced. With concentration increase, transverse tilt created on the surface of turbidity current in constant flow rate in steep 90 degree bend **(**$R/B = 2$) decreased.



**Key words: Turbidity current, 90 Degree bend, Thickness of current body, Transverse tilt of surface flow.**

## مقدمه

به علت محدودیت دسترسی به منابع تامین آب شیرین در جهان و نیز رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، نیاز به تامین آب آشامیدنی روز به روز بیشتر می‌شود. پروژه‌های سد سازی به منظور احداث سد در مسیر رودخانه‌ها از بهترین روش‌های بهره‌برداری منابع آب برای حفظ حیات، افزایش ظرفیت ذخیره سازی، گسترش منابع آب و استحصال انرژی برقابی می‌باشد. یکی از مسائل مهم در سد سازی؛ رسوبگذاری و پر شدن مخازن از رسوب است، که باعث کاهش حجم مفید مخازن می‌شود. استفاده‌ی پایدار از مخازن، در زمینه‌ی مدیریت منابع آب مستلزم کنترل رسوبگذاری داخل مخازن و یا حتی استخراج رسوب است (اوهی و همکاران[1]، ۲۰۱۰).

جریان غلیظ[2] حرکت نسبی است بین دو لایه‌ی سیال، که حتی با اختلاف کمی در چگالی ایجاد می‌گردد. این اختلاف ممکن است ناشی از دما، مواد معلق، عناصر شیمیایی، مواد محلول و یا ترکیبی از آن‌ها باشد. از آنجایی که عملاً اختلاف در وزن مخصوص و یا در واقع تاثیر شتاب ثقل بر روی اختلاف جرم مخصوص باعث ایجاد این گونه جریان‌ها می‌شود، لذا به این جریان‌ها، جریان‌های ثقلی[3] هم گفته می‌شود. اگر اختلاف دانسیته به علت مواد معلق باشد به این جریان‌ها، جریان‌های گل آلود یا کدر[4] نیز اطلاق می‌گردد. جریان‌های گل‌آلود، جریان‌های زیر گذر پر رسوب هستند که در اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها و مخازن اتفاق می‌افتند (پارکر و همکاران[5]، ۱۹۸۶).

جریان‌های چگال بر اساس جرم مخصوص سیال ورودی نسبت به سیال پیرامون به سه دسته‌ی جریان‌های روگذر، میان‌گذر و زیرگذر تقسیم بندی می‌شوند. در جریان‌های زیرگذر دانسیته‌ی جریان غلیظ ورودی نسبت به سیال ساکن بیشتر است، این جریان‌ها در خط‌القعر مخازن حرکت کرده، بنابراین از مسیرهای پیچ و خم‌دار عبور می‌کنند. از جمله ویژگی‌های عمده‌ی مورفولوژی شیب و مخروط افکنه‌های زیردریایی، کانال‌های پیچیده‌ی مئاندری زیر اقیانوس‌ها و مخازن با مقیاس‌های مختلف است. این کانال‌ها به عنوان مجرای جریان ثقلی چگال عمل می‌کنند و به نوبه‌ی خود توسط این جریان‌های زیر گذر شکل گرفته‌اند (ایسلام و همکاران[6]، ۲۰۰۸). لذا شناخت اثر این پیچ و خم‌ها بر مشخصات جریان ضروری می‌باشد.

در خم‌های مجاری روباز عدم تعادل بین دو نیروی رقیب که هر دو در مسیر شعاعی عمل می‌کنند، حرکت حلزونی یا گردش ثانویه را ایجاد می‌کند. نیروی گریز از مرکز ایجاد شده توسط سرعت جهت جریان که به دور شدن از مرکز انحنا، و نیروی اختلاف فشار ناشی از شیب سطح آب که به طرف مرکز انحنا عمل می‌کند. نیروی گریز از مرکز در نزدیکی سطح آزاد غالب است در حالی که نیروی اختلاف فشار در نزدیک بستر غالب است. باقیمانده‌ی دو نیرو محرک یک حرکت حلزونی با حرکت سیال نزدیک به سطح به دور از مرکز انحنا و سیال نزدیک به کف به طرف داخل خم است (به نقل از ایسلام وایمران[7]، ۲۰۰۸).

مطالعه‌های بسیاری در زمینه‌ی بررسی جریان‌های غلیظ در مسیرهای مستقیم به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. از جمله این مطالعه‌های آزمایشگاهی انجام شده؛ پژوهش دریایی و همکاران (۱۳۹۲) که به بررسی اثر شیب و زبری کف بر روی سرعت پیشانی و بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی پرداخته‌اند، مرادی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی تغییرات بدنه‌ی جریان غلیظ نمکی در مقاطع همگرا و تاثیر آن بر شدت اختلاط پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش شیب و غلظت، ارتفاع بدنه کاهش و با افزایش دبی، ارتفاع بدنه افزایش می‌یابد. کوتی و همکاران (۱۳۹۰) پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ نمکی را بررسی کردند. از جمله نتایج حاصل از آزمایش‌های ایشان نشان داد که ارتفاع سرعت ماکزیمم و ضخامت بدنه جریان با افزایش دبی و کشش سیال پیرامون، افزایش و با افزایش غلظت وشِیب کاهش پیدا می‌کند. بشاورد و همکاران (۱۳۹۰) پارامترهای موثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریان‌های غلیظ رسوبی در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل را مورد بررسی قرار دادند. کشتکار و همکاران (۱۳۸۹) ضخامت و پروفیل جریان گل‌آلود را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان دریافتند که افزایش مقادیر ارتفاع بازشدگی دریچه ورودی و همچنین افزایش مقادیر غلظت جریان گل‌آلود ورودی باعث کاهش ضخامت و افزایش سرعت جریان گل‌آلود می‌شوند. شهنی کرم‌زاده و همکاران (۱۳۸۵) به بررسی تاثیر تغییرات شیب و غلظت بر روی سرعت راس و بدنه جریان‌های غلیظ نمکی پرداختند. از جمله یافته‌های ایشان کاهش ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ با افزایش غلظت می‌باشد. فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۳) که جریان چگال سه بعدی را با استفاده از ADV مورد مطالعه قرار دادند. از جمله نتایج بدست آمده حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش دبی مقدار ارتفاع بدنه همواره افزایش یافته و با افزایش غلظت و شیب کاهش می‌یابد، مگر در مواقعی که درون آمیختگی بیشتر شود. موسوی حکمتی و همکاران (۱۳۸۴) پخش عرضی جریان چگال سه بعدی مغشوش را بررسی کردند.

در خصوص شناخت رفتار جریان غلیظ در مسیرهای دارای انحنا و در کانال‌های مستغرق نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) به بررسی رفتار جریان غلیظ نمکی در خم ۹۰ درجه پرداختند. ایشان دریافتند که ارتفاع جریان غلیظ در جداره‌ی بیرونی قوس بیشتر از جداره‌ی داخلی است و با افزایش شعاع انحنای قوس ضخامت جریان غلیظ کاهش یافته و

[1] Oehy et al.
[2] Density current
[3] Gravity currents
[4] Turbidity current
[5] Parker et al.
[6] Islam et al.
[7] Islam and Imran

از شیب سطح جریان غلیظ در سطح مشترک جریان غلیظ و سیال ساکن نیز کاسته می‌شود. از جمله مطالعه‌های انجام شده در کانال‌های زیردریایی[1] عبارتند از: کیویل و همکاران[2] (۲۰۰۶) با استفاده از جریان غلیظ نمکی به بررسی سرعت سه بعدی و توزیع تلاطم پرداختند، کورنی و همکاران[3] (۲۰۰۶) یک مدل تحلیلی و آزمایشگاهی جریان در داخل مئاندرهای رودخانه‌ای و جریان چگال نمکی در داخل خم‌های کانال زیردریایی را بررسی و مقایسه کردند. ایسلام وایمران (۲۰۰۸) آزمایش‌های خود را روی جریان زیرگذر ثقلی نمکی در کانال سینوسی مستغرق انجام دادند. ایسلام و همکاران (۲۰۰۸) با دو نوع جریان غلیظ زیرگذر نمکی و رسوبی اثر دو بخشی شدن جریان را روی حرکت حلزونی در کانال‌های زیردریایی مورد بررسی قرار دادند. استراب و همکاران[4] (۲۰۰۸) بر روی رسوبگذاری جریان کدر در کانال‌های زیردریایی سینوسی کار کردند. استراب و همکاران[5] (۲۰۱۰) اثر کانال‌های سینوسی را بر مکانیک رسوبگذاری جریان‌های کدر کانالیزه[6] مورد بررسی قرار دادند. سامنر و همکاران[7] (۲۰۱۴) مطالعات صحرایی خود را بر روی جریان ثقلی در کانال زیردریایی طبیعی انجام دادند. همچنین مطالعه‌ی کاسو و ولز[8] (۲۰۱۰) که به بررسی اثر نیروی کوریولیس بر چرخش ثانویه جریان گرانشی در کانال زیردریایی پرداخته‌اند.

با توجه به مروری بر منابع در اکثر تحقیقات انجام شده در خصوص جریان‌های غلیظ، بیشتر بررسی رفتار آن‌ها در مسیر مستقیم مورد توجه قرار گرفته است و در مسیرهای دارای انحنا، شکل کانال به صورت سینوسی بوده است و در این نوع کانال‌ها اثر غلظت جریان غلیظ رسوبی در نظر گرفته نشده است، بنابراین در این مقاله به بررسی اثر شعاع خم، غلظت و دبی جریان بر ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی، در قوس ۹۰ درجه پرداخته شد. عامل چگال در این پژوهش رسوبی می‌باشد که جزء جریان‌های غلیظ تجزیه پذیر یا ناپایدار محسوب می‌گردد. این نوع جریان‌ها به علت رسوبگذاری یا فرسایش در طول مسیر ، شار شناوری متغیری دارند.

## معرفی جریان غلیظ

شتاب ثقل کاهش یافته که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$g' = g\left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a}\right) = g\frac{\Delta\rho}{\rho_a} \qquad (۱)$$

که در آن، $\rho_t$ جرم مخصوص سیال غلیظ، $\rho_a$ جرم مخصوص سیال محیطی، $g$ شتاب ثقل، $g'$ شتاب ثقل موثر و $\Delta\rho$ اختلاف جرم مخصوص بین دو سیال می‌باشد.

یکی از پارامترهای مهم در جریان‌های غلیظ، عدد فرود دنسیومتریک است که بیان کننده‌ی حالت جریان می‌باشد:

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

که در آن، $U$ سرعت متوسط جریان، $h$ ارتفاع جریان غلیظ و $\theta$ زاویه‌ی شیب کف بستر می‌باشد.

نوع متداول تر این عدد به صورت زیر است، که به آن عدد ریچاردسون[9] گویند.

$$\frac{1}{Fr_D^2} = \frac{g'h\cos\theta}{U^2} = Ri \qquad (۳)$$

در شکل (۱) نمای یک جریان غلیظ زیرگذر به همراه پروفیل سرعت و غلظت آن نشان داده شده است.

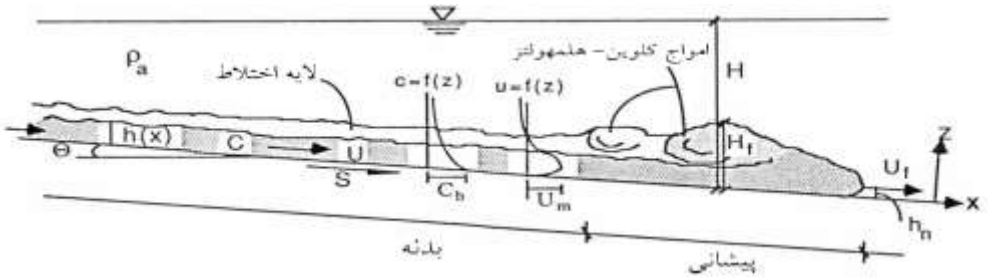
معمولاً حدفاصل بین جریان کدر و سیال محیطی به راحتی قابل تشخیص نیست، لذا الیسون و ترنر[10] (۱۹۵۹) معادلات زیر را به منظور تخمین ارتفاع و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ ارائه نمودند.

$$Uh = \int_0^\infty u dz = \int_0^{h_t} u dz = \bar{U}h_t = q \qquad (۴)$$

$$U^2h = \int_0^\infty u^2 dz = \int_0^{h_t} u^2 dz = \beta_u \bar{U}^2 h_t \qquad (۵)$$

که در آن، $u$ سرعت نقطه‌ای، $h_t$ ارتفاع جایی است که سرعت جریان غلیظ در آنجا صفر است، $\bar{U}$ متوسط سرعت جریان تا جایی که سرعت به صفر می‌رسد و $\beta_u$ ضریب توزیع سرعت بوسینسک است.

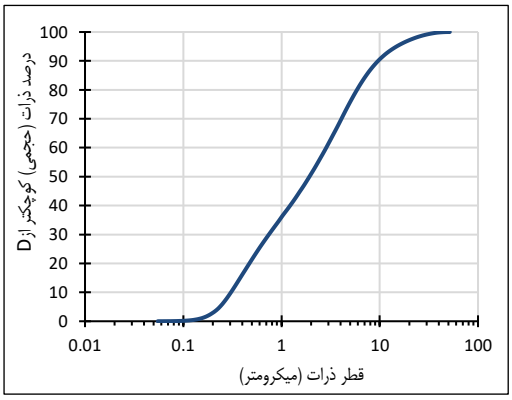
[1] Submarine channels
[2] Keevil et al.
[3] Corney et al.
[4] Straub et al.
[5] Straub et al.
[6] Channelized
[7] Sumner et al.
[8] Cossu and Wells
[9] Richardson number
[10] Elison and Turner




**شکل ۱- شمای یک جریان غلیظ : ابتدای جریان غلیظ، پیشانی با ارتفاع $H_f$ قرار دارد که با سرعت $U_f$ در سیال ساکن با چگالی همگن $\rho_a$ بر روی یک سطح مایل با زاویه‌ی $\alpha$ پیشروی می‌کند. بدنه ای به ارتفاع $h$ و سرعت لایه ای متوسط $U$ و غلظت متوسط $C$ ، پیشانی را دنبال می‌کند (آلتیناکار و همکاران[1]، ۱۹۹۰)**

## مواد و روش ها

این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. آزمایش‌ها در فلومی به عرض ۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و با شیب کف صفر درجه، در خم ۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر انجام گردید. شعاع انحنای نسبی $(\frac{R}{B})$ این خم‌ها به ترتیب ۲ که یک قوس تند و ۴ که قوسی ملایم است، می‌باشد. رسوب مورد استفاده برای تهیه‌ی جریان غلیظ در این آزمایش‌ها، پودر سنگ است که منحنی دانه بندی آن با استفاده از دستگاه مسترسایزر استخراج و در شکل (۲) نشان داده شده است.




**شکل۲- منحنی دانه بندی پودر سنگ**

با استفاده از منحنی دانه بندی پودر سنگ مورد استفاده در آزمایش، انحراف معیار هندسی $(\sigma_g)$ بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه شد.

$$\sigma_{g=}(D_{84}/D_{16})^{0.5}$$

مقدار انحراف معیار هندسی حدود ۴.۴ بدست آمد که نشان دهنده‌ی غیر یکنواخت بودن رسوب مورد استفاده می‌باشد

در شکل (۳) طرح شماتیک مخزن تهیه‌ی جریان غلیظ، مخزن هد ثابت و فلوم نشان داده شده است. در ابتدا، فلوم از آب زلال شهری پر شد. جریان غلیظ با استفاده از وزن کردن پودر سنگ مورد نیاز برای رسیدن به غلظت مورد نظر در ورودی فلوم با $G_s = 2.65$ و $D_{50} = 1.93\ \mu m$ ، در مخزنی به حجم ۲۵۰۰ متر مکعب با کمک یک همزن و پمپ کف کش که برای اختلاط بیشتر و جلوگیری از رسوب در داخل آن قرار داشت، تهیه و سپس با استفاده از پمپ گریز از مرکز به مخزن هد ثابت هدایت شد. با کمک دریچه‌ی کشویی بخش کوچکی از ابتدای فلوم جدا شده و مخزن جریان غلیظ ابتدای فلوم را تشکیل می‌دهد. جریان غلیظ ورودی به مخزن ابتدای فلوم از طریق یک لوله، از مخزن هد ثابت با باز کردن شیر و تنظیم دبی مورد نظر با کمک دبی‌سنج الکترومغناطیسی گرفته شد و به ابتدای فلوم وارد گردید. هنگامی که ارتفاع جریان غلیظ پشت دریچه به ارتفاع آب ساکن بعد از دریچه رسید، دریچه‌ی کشویی به یکباره، با ارتفاع بازشدگی ۱۰ سانتی‌متر که از قبل تنظیم شد، با کمک اهرمی باز گردید و جریان غلیظ شروع به حرکت در طول فلوم می‌کند. در انتهای فلوم یک زهکش تحتانی برای تخلیه‌ی جریان غلیظ و جلوگیری از برگشت آن تعبیه شده است. با استفاده از اشل‌هایی که در فواصل ۱۰ سانتی‌متری از یکدیگر بر روی جداره‌ی داخلی و خارجی قوس‌ها نصب شده بود (شکل (۴))، ارتفاع جریان مربوط به ضخامت بدنه‌ی جریان، یعنی مرز بین ناحیه‌ی ذرات معلق و ناحیه‌ی پخش بالا از کف فلوم به صورت چشمی یادداشت گردید. برای اینکه اختلاف چگالی، تنها ناشی از حضور مواد معلق بررسی گردد، دمای جریان غلیظ و آب ساکن در هر آزمایش با استفاده از دماسنج دیجیتالی اندازه‌گیری و آزمایش‌ها با اختلاف دمای بیش از ۲ درجه حذف گردیدند و دوباره تکرار شدند. در این آزمایش‌ها از دو دبی

[1] Altinakar et al.

جریان غلیظ ورودی به فلوم ۰/۵ و ۱/۱ لیتر بر ثانیه و ۴ غلظت ورودی به فلوم ۹، ۱۴، ۱۹ و ۲۳ گرم بر لیتر استفاده شد. در شکل (۵) بدنه‌ی جریان غلیظ در حال عبور از خم ۹۰ درجه تند ($\frac{R}{B}$ =) 2) با غلظت ۲۳ گرم بر لیتر و دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است.

به منظور تعیین رژیم جریان در ورودی فلوم از مقادیر عدد فرود دنسیومتریک از رابطه (۲)و رینولدز، رابطه (۷) استفاده شد.

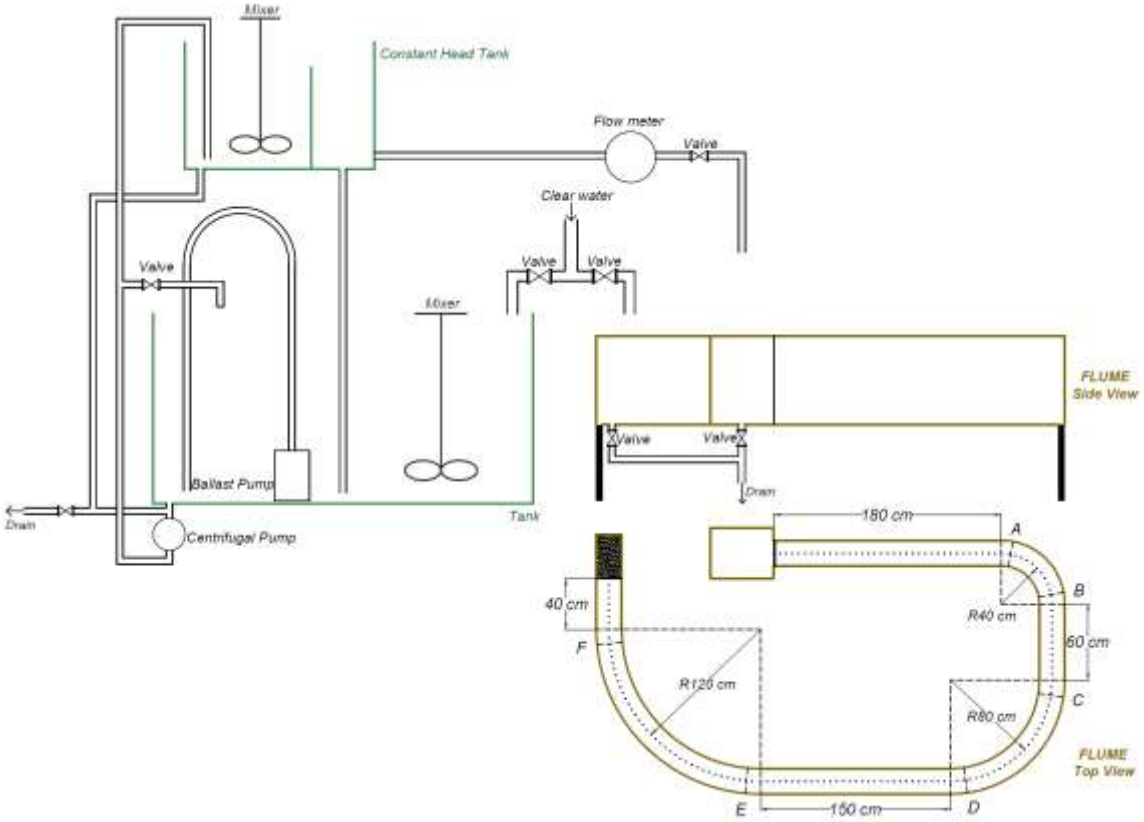
$$Re = \frac{\rho_m U_0 h}{\mu_m} \qquad (۷)$$

در این رابطه، $U_0$ سرعت متوسط جریان کدر ورودی، $h$ ارتفاع جریان کدر که در اینجا ارتفاع جریان در مسیر مستقیم اول، $\rho_m$ جرم واحد حجم جریان کدر می‌باشد و $\mu$ نشان‌دهنده‌ی لزجت دینامیکی مخلوط آب و رسوب یا جریان گل‌آلود می‌باشد که با استفاده از روابط (۸) و (۹) (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷) محاسبه گردید.

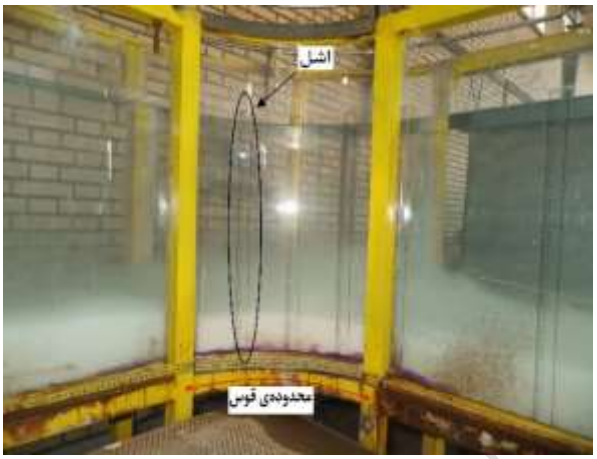
$$\rho_m = \rho[1 + C_V(G_s - 1)] \qquad (۸)$$

$$\mu_m = \mu[1 + 2.5C_V + 6.25C_V^2] \qquad (۹)$$

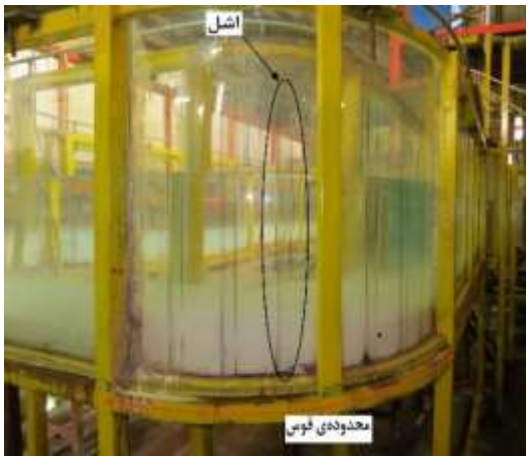
که در آن‌ها، $\rho$ جرم واحد حجم بخش آب در جریان کدر که با استفاده از دمای جریان بدست آمد، $C_V$ غلظت حجمی رسوب و $G_s$ جرم مخصوص رسوبات مورد استفاده، $\mu$ لزجت دینامیکی بخش آب در جریان کدر است که با استفاده از دمای جریان بدست آمد و $C_V$ غلظت حجمی رسوب می‌باشد.




**شکل۳- شماتیک فلوم و مخزن تهیه جریان غلیظ**




**(الف) جداره‌ی داخلی قوس**




**(ب) جداره‌ی خارجی قوس**

**شکل٤- اشل‌های نصب شده بر روی جداره‌های داخلی و خارجی قوس ۹۰ درجه با شعاع انحنای ٤٠ سانتی‌متر**

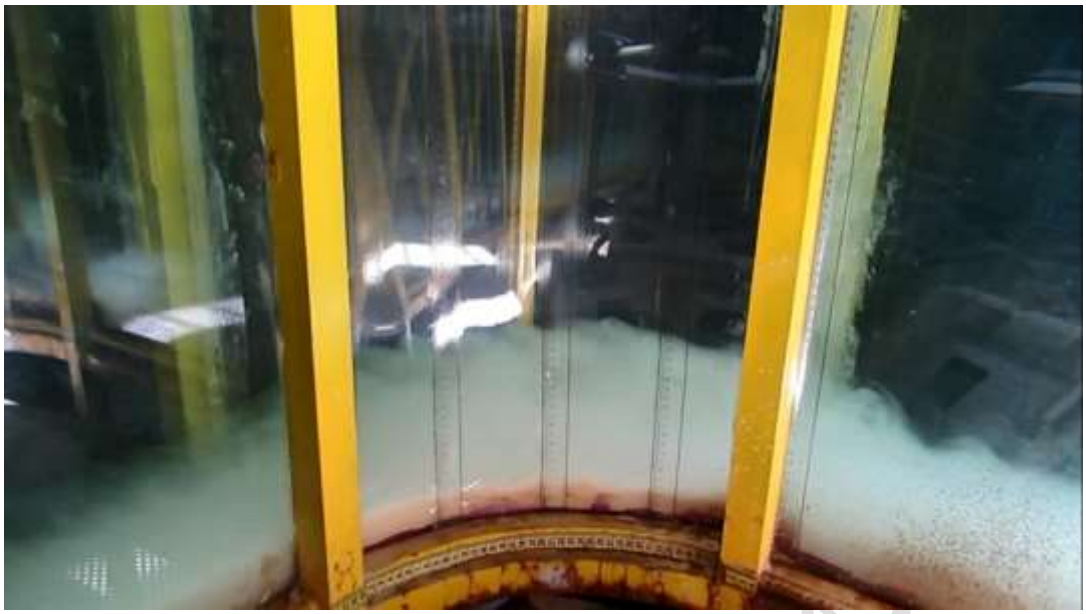
**نتایج و بحث**

آزمایش‌ها با استفاده از چهار غلظت جریان کدر ورودی به فلوم ۹، ۱۴، ۱۹ و ۲۳ گرم بر لیتر، در دو دبی جریان چگال ۰/۵ و ۱/۱ لیتر بر ثانیه، در دو قوس با شعاع‌های انحنای ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر ($\frac{R}{B}=2$و4) انجام گرفت. به علت عدم تشخیص ارتفاع چشمی جریان غلیظ (ارتفاع مربوط به مرز بین ناحیه‌ی ذرات معلق و ناحیه‌ی پخش بالا از کف فلوم) در قوس با شعاع ۸۰ سانتیمتر و دبی ۰/۵ لیتر بر ثانیه، داده‌های برداشتی با دبی ۰/۵ لیتر بر ثانیه در قوس با شعاع انحنای ۴۰ سانتی‌متر، و دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه در قوس با شعاع‌های انحنای ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت.

مقادیر عدد فرود دنسیومتریک، عدد رینولدز و دانسیته‌ی جریان غلیظ رسوبی با استفاده از روابط (۲)، (۷) و (۸) محاسبه و در جدول (۱) ارائه شده است بر اساس مقادیر بدست آمده در این جدول، شرایط جریان در ورودی زیربحرانی و متلاطم بود.

**جدول (۱) مشخصات آزمایش‌های انجام شده**

| $Q\ (\frac{l}{s})$ | $C\ (\frac{g}{l})$ | $\rho_m$ | $Fr_D$ | $Re$ |
|---|---|---|---|---|
| 0.5 | 9 | 1001.2 | 0.46 | 3119 |
| | 14 | 1004.4 | 0.42 | 3095 |
| | 19 | 1007.6 | 0.39 | 3069 |
| | 23 | 1010.3 | 0.37 | 3042 |
| 1.1 | 9 | 1001.6 | 0.75 | 6646 |
| | 14 | 1004.7 | 0.68 | 6644 |
| | 19 | 1007.5 | 0.67 | 6828 |
| | 23 | 1010 | 0.64 | 6827 |

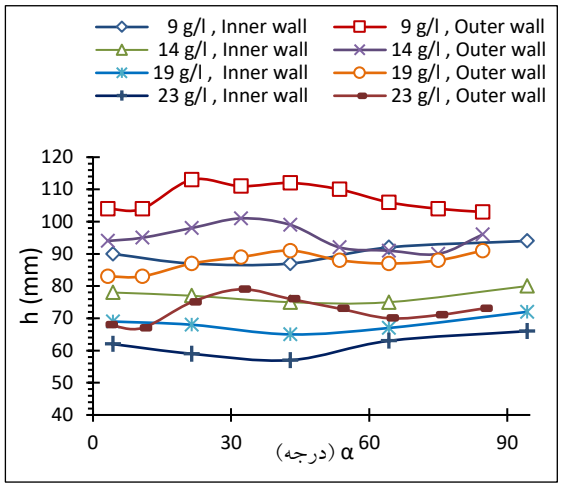


**شکل۵- بدنه‌ی جریان غلیظ عبوری از خم ۹۰ درجه با شعاع انحنای نسبی ۲ و غلظت و دبی جریان غلیظ ورودی به فلوم ۲۳ گرم بر لیتر و ۱/۱ لیتر بر ثانیه**

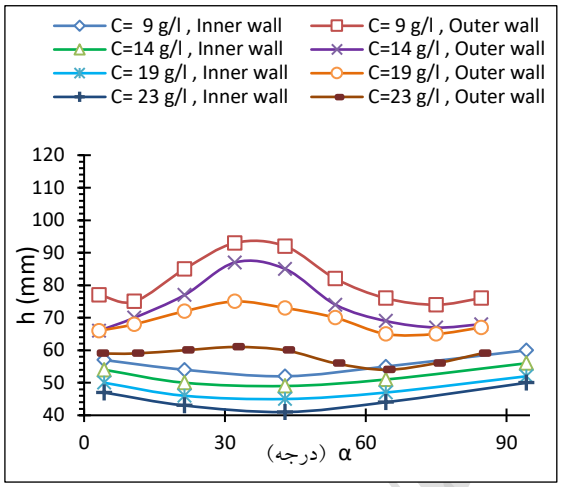
با استفاده از داده‌های برداشتی که در شکل (۶) ترسیم شده‌اند، مشاهده شد که؛ در هر آزمایش ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ در قوس خارجی بیشتر از قوس داخلی می‌باشد و بالاآمدگی ارتفاع جریان غلیظ در جداره‌ی خارجی قوس و پایین‌آمدگی ارتفاع ، در جداره‌ی داخلی قوس ایجاد شده است که علت ایجاد این شیب عرضی در سطح جریان کدر، تعامل جریان و انحنای کانال و نیروی گریز از مرکز ناشی از آن می‌باشد. چنین اضافه ارتفاعی در جداره‌ی خارجی برای جریان‌های چگال در خم کانال، در کانال‌های مستغرق توسط کیویل و همکاران (۲۰۰۶)، کورنی و همکاران (۲۰۰۶)، ایسلام وایمران (۲۰۰۸)، ایسلام و همکاران (۲۰۰۸)، استراب و همکاران (۲۰۰۸)، استراب و همکاران (۲۰۱۰) و سامنر و همکاران (۲۰۱۴) تعریف شده است. کاسو و ولز (۲۰۱۰) با بررسی اثر نیروهای کوریولیس بر جریان ثقلی در کانال‌های زیردریایی سینوسی نشان دادند که برای پارامتر کوریولیس ($f$) مثبت، نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز در جهت یکسان عمل می‌کنند و شیب فصل مشترک به طرف خم خارجی افزایش می‌یابد. این اضافه ارتفاع توسط مطالعه‌ی شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) در خم ۹۰ درجه با استفاده از جریان غلیظ نمکی نیز مشاهده شده است.

**۱- اثر غلظت بر ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در قوس**

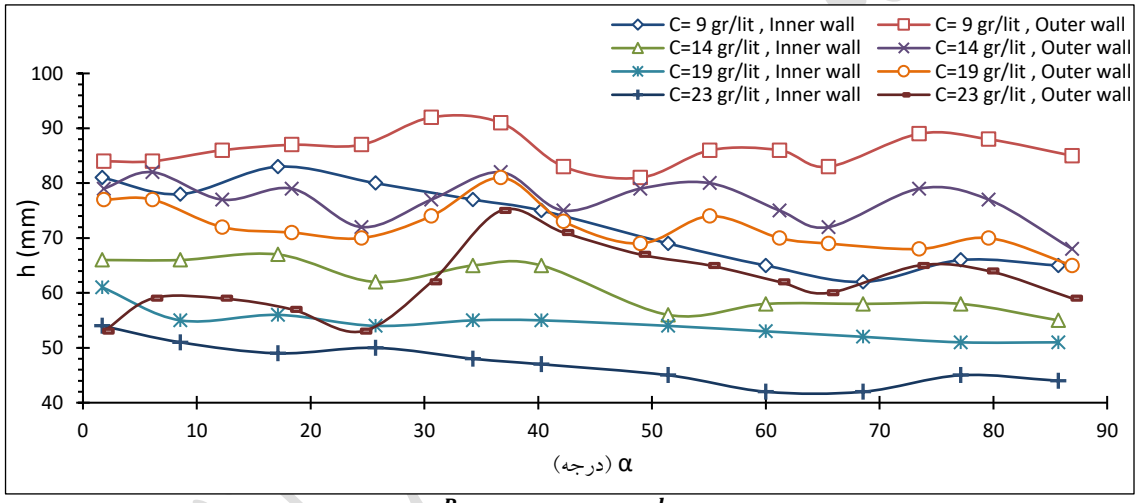
آزمایش‌ها در چهار غلظت ورودی به فلوم ۹، ۱۴، ۱۹ و ۲۳ گرم بر لیتر انجام گرفت. با توجه به نمودارهای نشان داده شده در شکل (۶) مشاهده شد که؛ در دبی ثابت با افزایش غلظت، ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در دو دبی ۰/۵ و ۱/۱ لیتر بر ثانیه، در قوس خارجی، ارتفاع ماکزیمم جریان کدر با کمترین غلظت حدوداً ۱/۴ برابر ارتفاع ماکزیمم جریان با بیشترین غلظت ،و در قوس داخلی، ارتفاع جریان کدر با کمترین غلظت نیز در حدود ۱/۴ برابر ارتفاع جریان با بیشترین غلظت بدست آمد. با افزایش غلظت به میزان شار مومنتم ورودی افزوده و به تبع آن نیروهای رانش بیشتری به جریان چگال وارد می‌شود (موسوی حکمتی و همکاران، ۱۳۸۴)، و با افزایش نیروی رانش، جریان شتاب گرفته و سرعت آن افزایش می‌یابد و در نتیجه، ارتفاع جریان کاهش می‌یابد. کاهش ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ با افزایش غلظت در مطالعه‌ی شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) در خم ۹۰ درجه و در مطالعه مسیر مستقیم از جمله پژوهش های؛ مرادی و همکاران (۱۳۹۰)، کوتی همکاران (۱۳۹۰)، کشتکار و همکاران (۱۳۸۹)، شهنی کرم زاده و همکاران (۱۳۸۵) و فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۳) نیز بیان شده است.




$\frac{R}{B} = 2$ و $Q = 1.1\ \frac{l}{s}$ (ب)




$\frac{R}{B} = 2$ و $Q = 0.5\ \frac{l}{s}$ (الف)



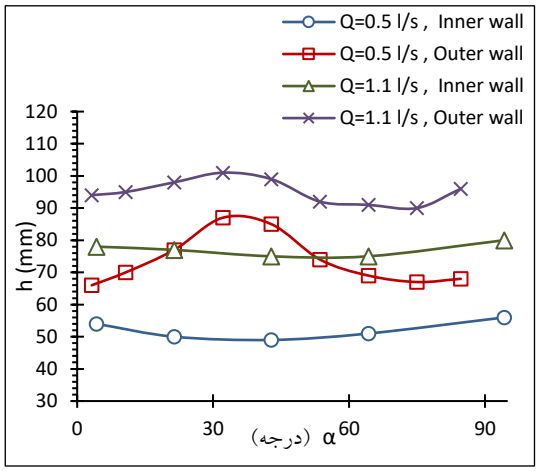

$\frac{R}{B} = 4$ و $Q = 1.1\ \frac{l}{s}$ (ج)

**شکل٦- ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ نسبت به زاویه از ابتدای قوس در غلظت‌های مختلف**

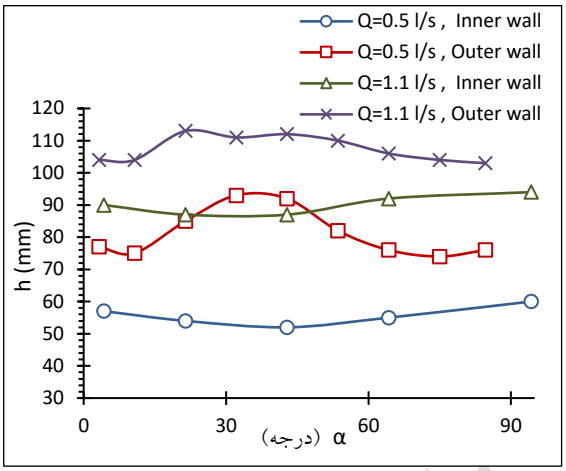
همانطور که در شکل (۶- ج) مشاهده می‌شود؛ سطح بالای جریان غلیظ در قوس با شعاع انحنای نسبی ۴ و دبی جریان غلیظ ۱/۱ لیتر بر ثانیه، دارای چند نقطه ماکزیمم و مینیمم است. اینگونه تغییر سطح ایجاد شده در بالای جریان ممکن است ناشی از موج‌های داخل جریان غلیظ و یا انعکاس نیروها به علت دیواره‌های نزدیک بهم باشد.

### ۲- اثر دبی بر ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در قوس

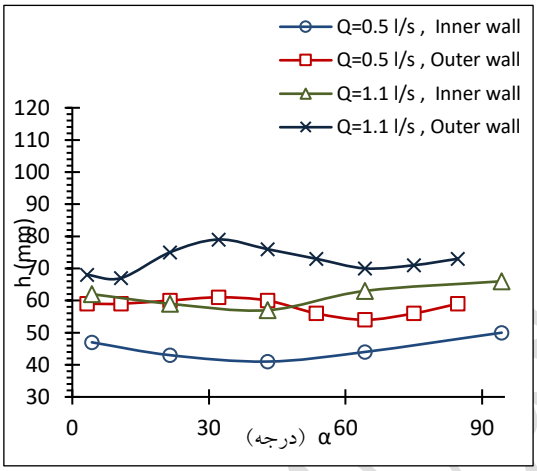
با افزایش دبی از ۰/۵ به ۱/۱ لیتر بر ثانیه در قوس با شعاع انحنای نسبی ۲ (قوس تند)، ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس افزایش می‌یابد (شکل (۷)). این افزایش به گونه‌ای است که در هر چهار غلظت، ارتفاع ماکزیمم بدنه‌ی جریان کدر در دیواره‌ی خارجی قوس با دبی جریان غلیظ ۱/۱ لیتر بر ثانیه در حدود ۱/۲ برابر دبی ۰/۵ لیتر بر ثانیه، و در دیواره‌ی داخلی قوس ضخامت بدنه‌ی جریان کدر با دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه حدوداً ۱/۵ برابر دبی ۰/۵ لیتر بر ثانیه می‌باشد. افزایش ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ با افزایش دبی در مطالعه جریان غلیظ نمکی توسط شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) در خم ۹۰ درجه و مطالعات مرادی و همکاران (۱۳۹۰)، کوتی و همکاران (۱۳۹۰) و فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۳) در مسیر مستقیم نیز مشاهده شده است.



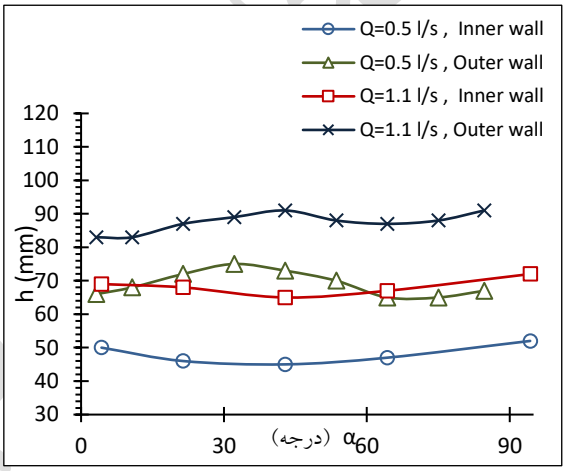

$C = 14\frac{gr}{lit}$ (ب)




$C = 9\frac{gr}{lit}$ (الف)




$C = 23\frac{gr}{lit}$ (د)

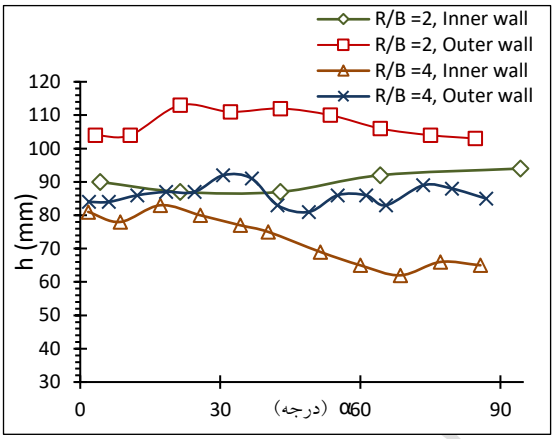



$C = 19\frac{gr}{lit}$ (ج)

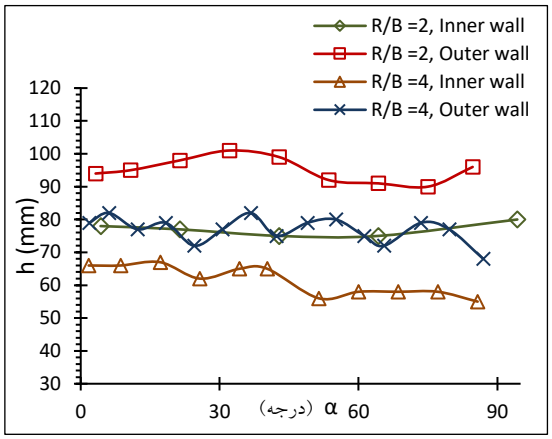
**شکل۷- ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در جداره‌ی داخلی و خارجی قوس در مقابل زاویه از ابتدای قوس در دو دبی مختلف**

### ۳- اثر شعاع قوس بر ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ

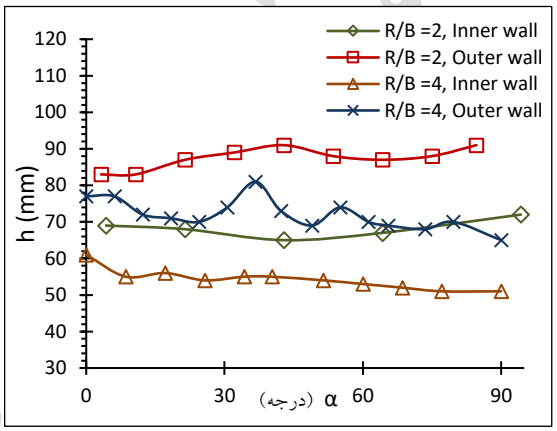
داده‌های برداشتی در دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه و شعاع‌های انحنای نسبی ۲ و ۴ ($\frac{R}{B} = 2$و4) در شکل (۸) نشان دادند که در غلظت و دبی ثابت، با افزایش شعاع انحنای قوس، ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس کاهش می‌یابد. که علت آن، کاهش نیروی گریز از مرکز با افزایش شعاع انحنا می‌باشد. زیرا نیروی گریز از مرکز با شعاع انحنا رابطه‌ی معکوس دارد. این یافته با مطالعه‌ی شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) همخوانی دارد.



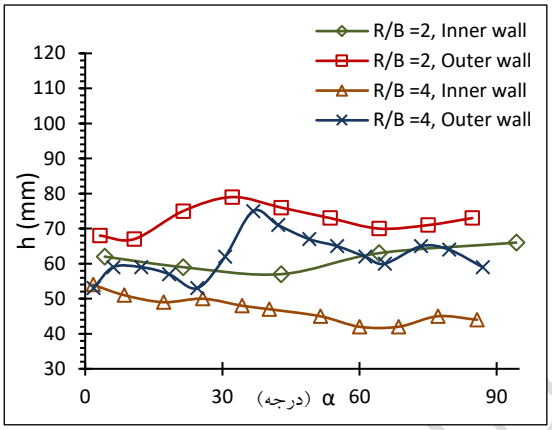

(الف) $Q = 1.1\ \frac{l}{s}$ و $C = 9\frac{g}{l}$




(ب) $Q = 1.1\ \frac{l}{s}$ و $C = 14\frac{g}{l}$




(ج) $Q = 1.1\ \frac{l}{s}$ و $C = 19\frac{g}{l}$




(د) $Q = 1.1\ \frac{l}{s}$ و $C = 23\frac{g}{l}$

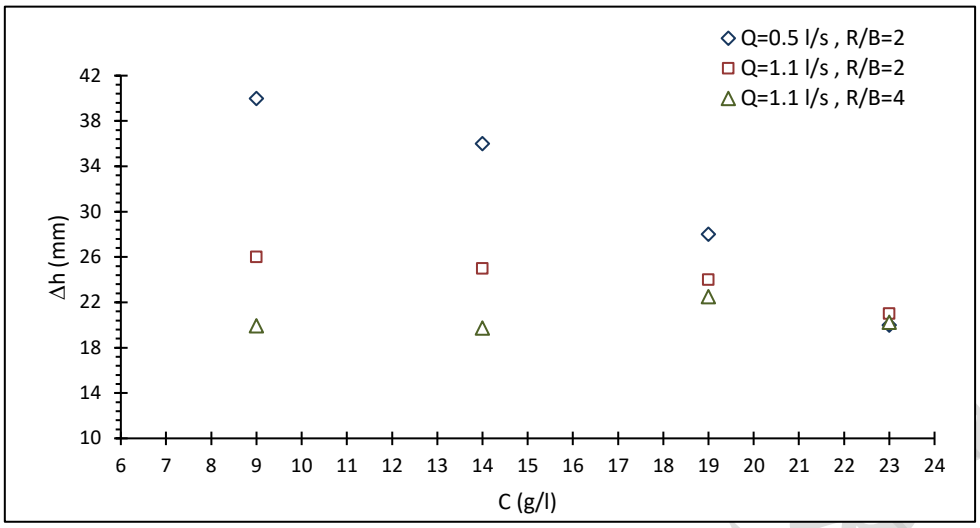
**شکل۸- ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در جداره‌ی داخلی و خارجی قوس در مقابل زاویه از ابتدای قوس در خم‌های مختلف**

## ٤- بررسی اختلاف ارتفاع قوس داخلی و خارجی بدنه‌ی جریان غلیظ

در این قسمت، با استفاده از داده‌های برداشت شده‌ی ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ از مرز بین ناحیه‌ی ذرات معلق و ناحیه‌ی پخش بالا از کف فلوم، اختلاف ارتفاع قوس داخلی و خارجی بدنه‌ی جریان غلیظ و یا به عبارت دیگر تغییرات شیب عرضی سطح جریان کدر بررسی می‌شود. بدین منظور اختلاف ارتفاع ماکزیمم ضخامت بدنه در دیواره‌ی خارجی قوس و مینیمم ضخامت بدنه در دیواره‌ی داخلی قوس، در قوس با $\frac{R}{B} = 2$ ، و در قوس با $\frac{R}{B} = 4$ اختلاف ارتفاع متوسط ماکزیمم ضخامت‌ها در دیواره‌ی خارجی قوس، و متوسط مینیمم ضخامت‌ها در دیواره‌ی داخلی قوس در شکل (۹) ترسیم گردید.

### ٤-١- اثر غلظت بر شیب عرضی

در قوس با $\frac{R}{B} = 2$ و دبی ۰/۵ لیتر بر ثانیه با افزایش غلظت اختلاف ارتفاع بدنه‌ی جریان در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس کاهش می‌یابد. روند این کاهش به گونه‌ای است که شیب عرضی سطح جریان کدر، در بیشترین غلظت (۲۳ گرم بر لیتر) دو برابر کمترین غلظت (۹ گرم بر لیتر) می‌باشد. در همین قوس، در دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه، میزان روند کاهش اختلاف ارتفاع با افزایش غلظت بسیار کمتر شده، به طوری که تفاضل اختلاف ارتفاع در بیشترین و کمترین غلظت ۵ میلیمتر می‌باشد و در قوس با $\frac{R}{B} = 4$ و دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه، می‌توان شیب عرضی سطح جریان کدر را با افزایش غلظت تقریبا ثابت در نظر گرفت. اگرچه به نظر می‌رسد با افزایش غلظت شیب عرضی سطح جریان کدر کاهش می‌یابد، اما نتیجه گیری کلی نمی‌توان کرد. در مطالعه‌ی شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) افزایش غلظت، کاهش اختلاف ارتفاع را موجب شده است.




**شکل (۹) اختلاف ارتفاع قوس داخلی و خارجی بدنه‌ی جریان غلیظ در برابر غلظت در دبی‌ها و شعاع انحنای نسبی متفاوت**

### ۲-٤-اثر دبی بر شیب عرضی

داده‌ها در این قسمت فقط مربوط به قوس با شعاع انحنای نسبی ۲ (قوس تند) می‌باشد. با افزایش دبی از ۰.۵ به ۱.۱ لیتر بر ثانیه در این قوس، میزان اختلاف ارتفاع یا شیب عرضی سطح جریان کدر کاهش می‌یابد، میزان این کاهش در غلظت‌های کمتر، بیشتر است (شکل(۹)). با وجود اینکه در این دو مشاهده با افزایش دبی، شیب عرضی سطح جریان کدر کاهش یافته، اما نتیجه‌گیری کلی نمی‌توان کرد.

### ۳-٤- اثر شعاع خم بر شیب عرضی

در مقایسه‌ی اختلاف ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس‌ها با دو شعاع انحنای نسبی ۲ و ۴ ، و دبی ورودی جریان غلیظ یکسان ۱/۱ لیتر بر ثانیه، مشخص شد که در قوس با شعاع انحنای نسبی ۲ (قوس تند)، شیب عرضی سطح جریان کدر نسبت به قوس با شعاع انحنای نسبی ۴ (قوس ملایم) بیشتر بوده است. که به علت بیشتر بودن نیروی گریز از مرکز در قوس با شعاع انحنای کوچکتر است. با زیاد شدن غلظت تفاوت اختلاف ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس‌ها در دو شعاع انحنای نسبی ۲ و ۴، کاهش می‌یابد، به گونه ای که در بیشترین غلظت (۲۳ گرم بر لیتر) مقدار شیب عرضی در دو قوس نزدیک به هم است. کاهش اختلاف ارتفاع با افزایش شعاع انحنای نسبی قوس در پژوهش شیخ الاسلامی و قمشی (۱۳۹۴) نیز مشاهده شده است.

### نتیجه گیری

در این تحقیق با بررسی اثر چهار غلظت ۹، ۱۴، ۱۹ و ۲۳ گرم بر لیتر، دو دبی جریان غلیظ رسوبی ۰/۵ و ۱/۱ لیتر بر ثانیه و دو شعاع انحنای نسبی ۲ و ۴ بر ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در شرایط جریان ورودی متلاطم و زیربحرانی نتایج زیر حاصل شد.

- در هر آزمایش ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی در جداره‌ی خارجی قوس بیشتر از جداره‌ی داخلی قوس است. این اضافه ارتفاع مشاهده شده در جداره‌ی خارجی قوس به علت نیروی گریز از مرکز ناشی از انحنای کانال است.
- در دبی ثابت با افزایش غلظت، ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس کاهش می‌یابد که علت آن افزایش نیروی رانش با افزایش غلظت و در نتیجه افزایش سرعت جریان و به تبع آن کاهش ارتفاع جریان است.
- در غلظت ثابت با افزایش دبی، ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس افزایش می‌یابد.
- در غلظت و دبی ثابت، با افزایش شعاع انحنای قوس، ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس کاهش می‌یابد که علت آن کاهش نیروی گریز از مرکز با افزایش شعاع انحنا می‌باشد.
- در خم ۹۰ درجه‌ی تند ($\frac{R}{B}=2$)،در دبی ثابت، با افزایش غلظت، شیب عرضی سطح جریان غلیظ رسوبی کاهش می‌یابد، که این کاهش در دبی کوچکتر، محسوس تر است.
- با افزایش شعاع انحنای خم، شیب عرضی سطح جریان کدر کاهش می‌یابد. این کاهش در غلظت‌های کمتر، مشهودتر است.

## منابع


۱- بشاورد، ح.، قمشی، م. و منصوری هفشجانی، م. ۱۳۹۱. بررسی پارامترهای مؤثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریانهای غلیظ رسوبی در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۵ (۲): ۴۰-۳۳.

۲- دریایی، م.، کاشفی پور، س. م. و قمشی، م. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و زبری کف بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۷ (۳): ۳۱-۲۱.

۳- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. ۵۴۹.

۴- شهنی کرم زاده، ن.، محمودیان شوشتری، م و قمشی، م. ۱۳۸۵. مطالعه آزمایشگاهی تغییرات سرعت در جریان های غلیظ. هفدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران.

۵- شیخ الاسلامی، م. و قمشی، م. ۱۳۹۴. بررسی رفتار جریان غلیظ در خم ۹۰ درجه. دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۶- فیروزآبادی، ب.، موسوی حکمتی، س. م. و راد، م. ۱۳۸۳. بررسی تجربی جریان چگالی سه بعدی با استفاده از ADV. نهمین کنفرانس دینامیک شارها، دانشگاه شیراز.

۷- کشتکار، ش.، ایوب زاده، س. ع. و فیروزآبادی، ب. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی ضخامت و پروفیل‌های سرعت جریان گل‌آلود. نشریه آب و خاک، ۲۴ (۶): ۱۰۷۳-۱۰۸۲۳.

۸- کوتی، ف.، کاشفی پور، س. م. و قمشی، م. ۱۳۹۰. تجزیه و تحلیل پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۶ (۵۹): ۲۹-۱۵.

۹- مرادی، ا.، قمشی، م. و سروری نژاد، ب. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تغییرات بدنه و شدت اختلاط جریان های غلیظ در مقاطع همگرا. اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران.

۱۰- موسوی حکمتی، س. م. ر.، فیروزآبادی، ب. و راد، م. ۱۳۸۴. پخش عرضی جریان چگال سه بعدی مغشوش. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

11- Altinakar, S., Graf, W. H., and Hopfinger, E. J. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope, Journal of Hydraulic Research. 28 (1), 54-57.

12- Corney, R. K. T., Peakall, J., Parsons, D. R., Elliott, L., Amos, K. J., Best, J. L., Kevil, G. M., and Ingham, D. B. 2006. The orientation of helical flow in curved channels, Sedimentology. 53 (2): 249–257.

13- Cossu, R., and Wells, M. G. 2010. Coriolis forces influence the secondary circulation of gravity currents flowing in large-scale sinuous submarine channel systems, Geophysical Research Letters. 37 (17), L17603.

14- Elison, T. H. and Turnrr, J. S.. 7959. Turbulent entrainment in stratifiedflows. Journal of Fluid Mechanic, 6:423-448.

15- Islam, M. A., and Imran, J. 2008. Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel, Journal Of Geophysical Research. 113, C07041.

16- Islam, M. A., Imran, J., Pirmez, C., and Cantelli, A. 2008. Flow splitting modifies the helical motion in submarine channels, Geophysical Research Letters. 35, L22603.

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

18- Oehy, C., Cesare, G. and Schleiss, A., 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. Journal of Hydraulic Research, 48(1): 81-90.

19- Parker, G., and Fukushima, y., and Pantin, H. M. 1986. Self-accelerating turbidity currents,Journal of Fluid Mechanics. 171: 145-181.

20- Straub, K. M., Mohrig, D., Buttles, J., McElroy, B., and Pirmez, C. 2010. Quantifying the influence of channel sinuosity on the depositional mechanics of channelized turbidity currents: A laboratory study, Marine and Petroleum Geology. 28 (3): 744–760.

21- Straub, K. M., Mohrig, D., McElroy, B., and Buttles, J. 2008. Interactions between turbidity currents and topography in aggrading sinuous submarine channels: A laboratory study, GSA Bulletin. 120 (3/4): 368–385.

22- Sumner, E. J., Peakall, J., Dorrell, R.M., Parsons, D. R., Darby, S. E., Wynn, R. B., Mcphail, S. D., Perrett, J., Webb, A. and White, D. 2014. Driven around the bend: Spatial evolution and controls on the

orientation of helical bend flow in a natural submarine gravity Current. Journal of Geophysical Research: Oceans. 119 (2): 898–913.

نسخه نهایی- قبل از انتشار