Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 3, Fall 2026, p. 93-109

Research Paper

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir/?lang=en

EXTENDED ABSTRACT

Effects of Sediment Concentration and Bend Curvature Radius on the Body Thickness of Turbidity Currents in a 90-Degree Bend

N. Mahmoodieh[1] and M. Ghomeshi[2*]

1- M.Sc. graduated, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz ,Iran.
2- Corresponding Author ,Professor Hydraulic Structures Department, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.(ghomeshi@scu.ac.ir)*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 21 March 2018
Revised: 21 June 2018
Accepted: 02 July 2018
Available online: 07 November 2026

Keywords:
Turbidity currents; Sediment concentration; Bend curvature; Flow discharge; Current body thickness.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mahmoodieh, N., & Ghomeshi, M. 2026. 'Effects of Sediment Concentration and Bend Curvature Radius on the Body Thickness of Turbidity Currents in a 90-Degree Bend', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(3), pp. 93–109. doi: 10.22055/jise.2018.19003.1374.

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.

Introduction

Sedimentation in dam reservoirs progressively reduces useful storage capacity and reservoir lifespan. A major mechanism of sediment delivery is the passage of turbidity currents: sediment-laden gravity flows that move beneath clearer ambient water because of density differences. Such currents also transport sediment within lakes, seas, and submarine channels (Parker et al., 1986). Their behavior can change substantially as they encounter curved pathways, where centrifugal acceleration and transverse pressure gradients modify the current interface and generate secondary circulation.

Although density currents have been studied in straight channels and sinuous submerged channels (Islam and Imran, 2008), less experimental information is available on the combined

influence of sediment concentration, discharge, and bend radius on the thickness of sediment-laden currents in a single 90-degree bend. This study therefore examines the distribution of current body thickness along the inner and outer bend walls and the resulting transverse interface inclination under controlled laboratory conditions.

Materials and Methods

Experiments were conducted in a physical hydraulic flume with a rectangular cross-section, 20 cm wide and 70 cm high, and a horizontal bed. Two 90-degree bends were investigated, with curvature radii of 40 and 80 cm. Relative to the channel width, these correspond to R/B = 2 (sharp bend) and R/B = 4 (mild bend). The experiments used sediment-laden underflows prepared from suspended stone powder with a median grain size (D50) of 1.93 micrometres and a geometric standard deviation of approximately 4.4.

Four sediment concentrations (9, 14, 19, and 23 g/L) and two inlet discharges (0.5 and 1.1 L/s) were considered. The sediment-water mixture was prepared with mechanical mixing to limit settling and supplied through a constant-head tank. An electromagnetic flowmeter regulated the inlet discharge. Before each experiment, the flume was filled with clear water. The prepared mixture entered an upstream compartment, and a sliding gate was then opened to a preset height of 10 cm so that the underflow could travel through the channel. A downstream bottom drain helped prevent return flow.

Graduated scales located at 10 cm intervals along the inner and outer bend walls were used to visually record the height of the boundary between the main suspended-sediment region and the overlying diffusion region. The temperatures of the mixture and ambient water were monitored; experiments with a temperature difference exceeding 2 degrees Celsius were repeated. Inlet densimetric Froude and Reynolds numbers were evaluated to identify the flow regime. All reported inflows were turbulent and subcritical. For the 80 cm bend at 0.5 L/s, the interface could not be identified reliably, so those measurements were excluded from the comparative analysis.

Results and Discussion

The experiments consistently showed a thicker turbidity-current body along the outer wall than along the inner wall of the bend. Upon entering the curved reach, the current experienced centrifugal effects associated with changes in flow direction; the interface consequently rose near the outer wall and fell near the inner wall. This asymmetry produced a transverse inclination of the current surface, consistent with the importance of bend-driven secondary circulation reported in earlier studies of density underflows (Islam and Imran, 2008).

At a fixed discharge, increasing inlet sediment concentration from 9 to 23 g/L reduced body thickness along both bend walls. The largest thickness at the lowest concentration was approximately 1.4 times that at the highest concentration in the comparisons reported. Higher sediment concentration increased the density-related driving force and flow acceleration, offering a physical explanation for the reduction in thickness. The decrease occurred in both the sharp and mild bends where reliable observations were available.

Discharge had the opposite effect on body thickness. In the sharp bend (R/B = 2), increasing discharge from 0.5 to 1.1 L/s increased the current thickness on both walls across the tested concentrations. The maximum outer-wall thickness at the higher discharge was about 1.2 times the corresponding value at the lower discharge; the approximate ratio for the inner wall was 1.5. Thus, discharge and concentration produced distinct and opposing trends in the measured body height.

At the same concentration and discharge, increasing the curvature radius from 40 to 80 cm (R/B from 2 to 4) lowered current thickness along both walls. The milder bend also produced a smaller transverse thickness difference. These observations are consistent with the weaker centrifugal influence associated with a larger curvature radius and are in agreement with the bend-flow behavior discussed by Sheikh Eslami and Ghomshi (2015).

The transverse interface inclination generally decreased with increasing concentration in the sharp bend, especially at the smaller discharge. At 1.1 L/s, its dependence on concentration was weaker, and the difference between the two bend geometries diminished at higher concentrations.

Although a smaller transverse thickness difference was observed when discharge increased in the sharp bend, the available measurements were insufficient to establish a universal discharge-dependent trend. Local variations in interface height were also observed and may reflect internal waves or interactions with the channel walls.

Conclusion

Controlled experiments in 90-degree bends demonstrate that sediment-laden turbidity currents have an asymmetric body thickness, with a higher interface at the outer wall than the inner wall. Increasing sediment concentration reduces the thickness on both walls, whereas increasing discharge increases it under the investigated conditions. A larger curvature radius reduces both body thickness and the transverse interface inclination.

Concentration-related reductions in transverse inclination were most evident for the sharp bend at low discharge. These findings clarify how sediment concentration, inflow discharge, and channel geometry jointly affect density-current behavior and may help interpret sediment transport through curved reservoir and submarine flow passages. Their application should account for the restricted range of laboratory conditions and the unavailable low-discharge measurements in the milder bend.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH 1397.86.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Nasrin Mahmoodieh, Tester, Data analysis
Second Author: Mehdi Ghomeshi, Reviewing the results, Review of reforms.

Acknowledgment

This study was supported financially from grant provided by vice-chancellor of research of Shahid Chamran university of Ahvaz. The authors would like to thanks for providing the grant.

References

1- Islam, M.A. and Imran, J. (2008). Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel. Journal of Geophysical Research: Oceans, 113(C7), C07041. https://doi.org/10.1029/2007JC004292

2- Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin, H.M. (1986). Self-accelerating turbidity currents. Journal of Fluid Mechanics, 171, 145–181. https://doi.org/10.1017/S0022112086001404

3- Sheikh Eslami, M. and Ghomshi, M. (2015). Investigation of density current behavior in a 90-degree bend. 10th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Persian).

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۳، پاییز ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۰۹-۹۳

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

نسرین محمودیه[۱] و مهدی قمشی[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
ghomeshi@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۳۱ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۱۶

چکیده

رسوب‌گذاری در مخازن سدها، مهمترین عامل کاهش عمر مفید آن‌ها می‌باشد. جریان‌های گل‌آلود، جریان‌هایی مملو از رسوب هستند که به‌صورت 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، ۱۴، ۱۹ و ۲۳ گرم بر لیتر و در فلومی به عرض ۲۰ سانتی‌متر و با دو شعاع انحنای ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر در شرایط جریان ورودی زیربحرانی انجام شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده با عبور جریان کدر از خم ۹۰ درجه، اضافه ارتفاعی در جداره‌ی خارجی قوس و کاهش ارتفاع در جداره‌ی داخلی قوس، به‌علت 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، انتقال رسوب، شیب عرضی سطح جریان، هیدرودینامیک کانال‌های منحنی.

مقدمه

به‌علت محدودیت دسترسی به منابع تأمین آب شیرین در جهان و نیز رشد جمعیت و گسترش شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع، نیاز به تأمین آب آشامیدنی روز به روز بیشتر می‌شود. پروژه‌های سد سازی به‌منظور 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 (Oehy et al., 2010).

جریان غلیظ (Density current) 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 (Gravity currents) هم گفته می‌شود. اگر اختلاف دانسیته به‌علت مواد معلق باشد به این جریان‌ها، جریان‌های گل آلود یا کدر (Turbidity current) نیز اطلاق می‌گردد. جریان‌های گل‌آلود، جریان‌های زیر گذر پر رسوب هستند که در اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها و مخازن اتفاق می‌افتند (Parker et al., 1986).

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 به‌عنوان مجرای جریان ثقلی چگال عمل می‌کنند و به نوبه‌ی خود توسط این جریان‌های زیر گذر شکل گرفته‌اند (Islam et al, 2008). 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

DOI: 10.22055/jise.2018.19003.1374

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 (Islam and Imran, 2008).

مطالعه‌های بسیاری در زمینه‌ی بررسی جریان‌های غلیظ در مسیرهای مستقیم به‌صورت دو بعدی و سه بعدی انجام شده است. از جمله این مطالعه‌های آزمایشگاهی انجام شده؛ پژوهش Daryaei et al (2013) که به بررسی اثر شیب و زبری کف بر روی سرعت پیشانی و بدنه‌ی جریان غلیظ رسوبی پرداخته‌اند، Moradi et al (2011) 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. Kouti et al (2012) 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. Beshavard et al. (2012) پارامترهای موثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریان‌های غلیظ رسوبی در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل را مورد بررسی قرار دادند. Keshtkar et al. (2010) 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. Shahni Karamzadeh et al. (2006) 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. Firouzabadi et al. (2004) که جریان چگال سه بعدی را با استفاده از ADV مورد مطالعه قرار دادند. از جمله نتایج به‌دست 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. Mousavi Hekmati et al. (2005) 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. مطالعه‌ی Sheikh Eslami و Ghomshi (2015) 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 از شیب سطح جریان غلیظ در سطح مشترک جریان غلیظ و سیال ساکن نیز کاسته می‌شود. از جمله مطالعه‌های انجام شده در کانال‌های زیردریایی (Submarine channels) عبارتند از: Keevil et al (2006) با استفاده از جریان غلیظ نمکی به بررسی سرعت سه بعدی و توزیع تلاطم پرداختند، Corney et al. (2006) یک مدل تحلیلی و آزمایشگاهی جریان در داخل مئاندرهای رودخانه‌ای و جریان چگال نمکی در داخل خم‌های کانال زیردریایی را بررسی و مقایسه کردند. Islam و Imran (2008) آزمایش‌های خود را روی جریان زیرگذر ثقلی نمکی در کانال سینوسی مستغرق انجام دادند. Islam et al (2008) 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. Straub et al. (2011) بر روی رسوب‌گذاری جریان کدر در کانال‌های زیردریایی سینوسی کار کردند.

Straub et al. (2010) اثر کانال‌های سینوسی را بر مکانیک رسوب‌گذاری جریان‌های کدر کانالیزه (Channelized) مورد بررسی قرار دادند. Sumner et al. (2014) مطالعه‌های صحرایی خود را بر روی جریان ثقلی در کانال زیردریایی طبیعی انجام دادند. همچنین مطالعه‌ی Cossu و Wells (2010) که به بررسی اثر نیروی کوریولیس بر چرخش ثانویه جریان گرانشی در کانال زیردریایی پرداخته‌اند. در سال‌های اخیر، بررسی رفتار هیدرودینامیکی جریان‌های گل‌آلود در کانال‌های دارای انحنا مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. Adema et al (2025) با استفاده از آزمایش‌های سه‌بعدی فلوم، نقش گردش ثانویه و جریان‌های جانبی را در ساختار جریان‌های چگال بررسی کردند. همچنین، Wen et al (2026) با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی نشان دادند که تغییرات انحنای کانال می‌تواند موجب ایجاد نامتقارنی در توزیع چگالی، تغییر ساختار گردش ثانویه و تغییر ضخامت جریان گل‌آلود شود. این مطالعات بر اهمیت بررسی اثر هندسه مسیر بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان‌های رسوبی تأکید دارند.

با توجه به مروری بر منابع در اکثر تحقیق‌های 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 به‌صورت 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 به‌عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن، ρ_t جرم مخصوص سیال غلیظ، ρ_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:

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

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

نوع متداول‌تر این عدد به صورت زیر است، که به آن عدد ریچاردسون (Richardson number) گویند.

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

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 Ellison و Turner (1959) معادلات زیر را به منظور تخمین ارتفاع و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ ارائه نمودند.

$$Uh = \int_0^{\infty} udz = \int_0^{h_t} udz = \bar{U}h_t = q \quad (۴)$$

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

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 β_u ضریب توزیع سرعت بوسینسک است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده‌ی مهندسی آب و محیطزیست 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 به‌ترتیب دو که یک قوس تند و چهار 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.

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

$$\sigma_g = (D_{84}/D_{16})^{0.5} \quad (۶)$$

مقدار انحراف معیار هندسی حدود ۴/۴ به‌دست آمد که نشان دهنده‌ی غیر یکنواخت بودن رسوب مورد استفاده می‌باشد.

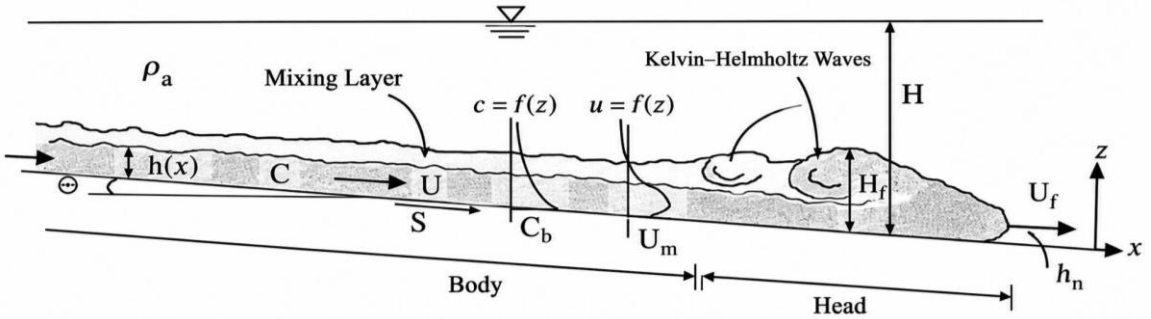


Fig. 1- Schematic representation of a turbidity current: At the leading edge of the current, a head of height H_f advances at a velocity U_f through an ambient fluid of uniform density ρ_a over an inclined bed with a slope angle α. The head is followed by a body of height h depth-averaged velocity U, and mean sediment concentration C (Altinakar et al., 1990).

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 ρ_a بر روی یک سطح مایل با زاویه‌ی α پیشروی می‌کند. بدنه ای به ارتفاع h و سرعت لایه ای متوسط U و غلظت متوسط C ، پیشانی را دنبال می‌کند (Altinakar et al., 1990).

DOI: 10.22055/jise.2018.19003.1374

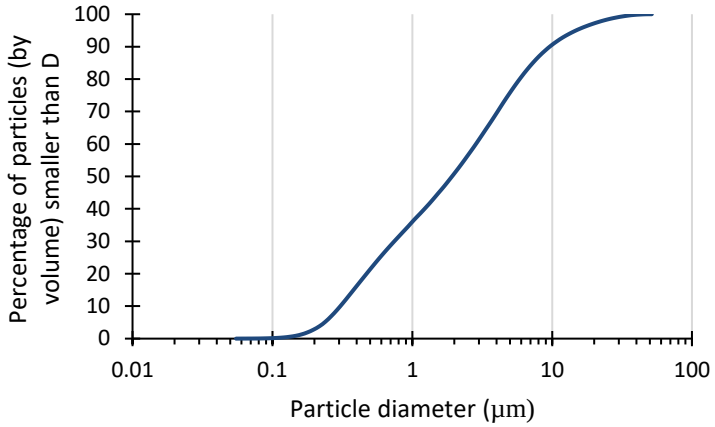


Fig. 2- Particle size distribution curve of stone powder
شکل ۲- منحنی دانه بندی پودر سنگ

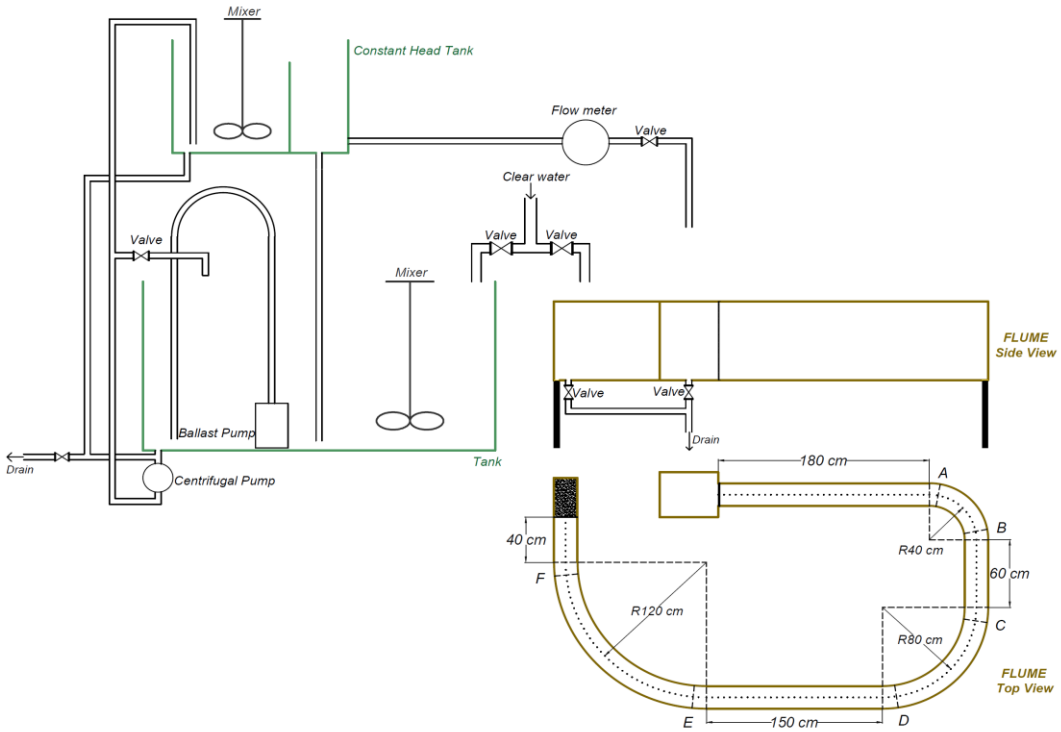
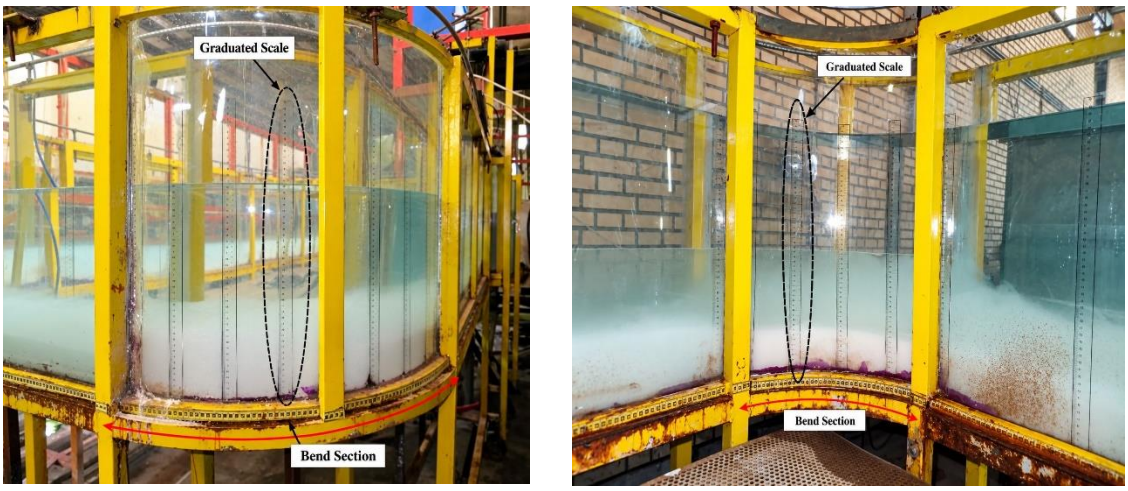


Fig. 3- Schematic diagram of the flume and turbidity current preparation tank
شکل ۳- شماتیک فلوم و مخزن تهیه جریان غلیظ

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 فوم از طریق یک لوله، از مخزن هد ثابت با باز کردن شیر و تنظیم دبی مورد نظر با کمک دبی‌سنج الکترومغناطیسی گرفته شده و به ابتدای فوم وارد گردید. هنگامی که ارتفاع جریان غلیظ بهشت 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 فوم 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 دو درجه حذف گردیدند و دوباره تکرار شدند. در این آزمایش‌ها از دو دبی جریان غلیظ ورودی به فلوم ۰/۵ و ۱/۱ لیتر بر ثانیه و چهار 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 (R/B=2) با غلظت ۲۳ گرم بر لیتر و دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است.



A) Outer wall of the bend

A) Inner wall of the bend

Fig. 4- Graduated scales installed on the inner and outer walls of the 90° bend with a radius of curvature of 40 cm.

شکل ٤- اشل‌های نصب شده بر روی جداره‌های داخلی و خارجی قوس ۹۰ درجه با شعاع انحنای ٤٠ سانتی‌متر

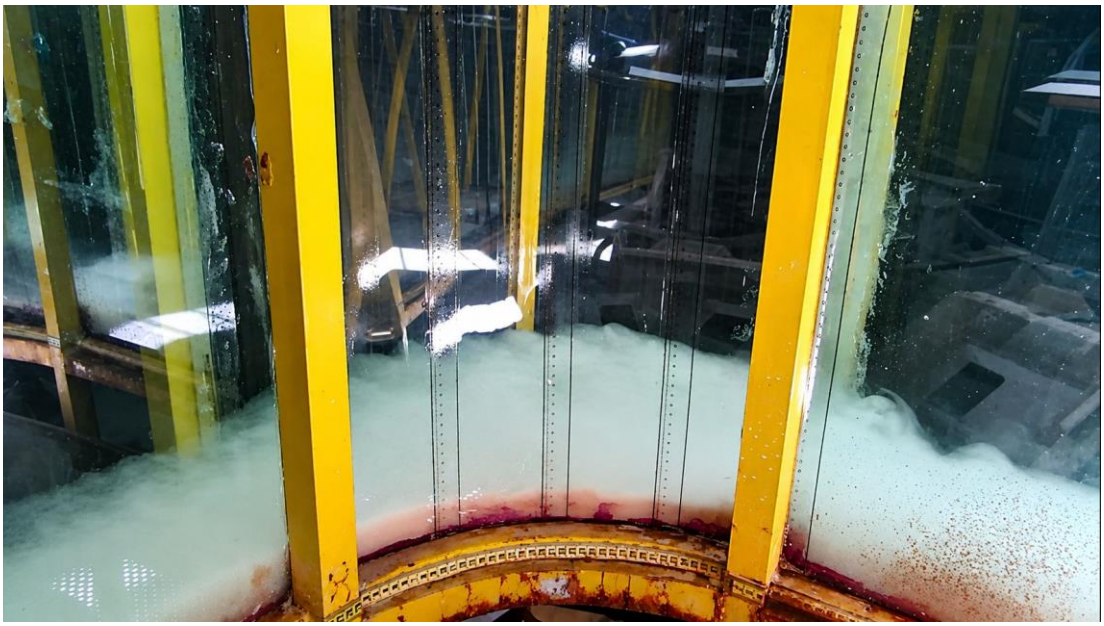


Fig. 5- Body of the turbidity current passing through a 90° bend with a relative radius of curvature of 2, an inflow sediment concentration of 23 g/L, and a discharge of 1.1 L/s.

شکل ٥- 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

DOI: 10.22055/jise.2018.19003.1374

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

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

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

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

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

که در آن‌ها، ρ 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، μ لزجت دینامیکی بخش آب در جریان کدر است که با استفاده از دمای جریان بدست آمد و C_V غلظت حجمی رسوب می‌باشد.

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. به‌علت 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.

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 Keevil et al. (2006)، Corney et al. (2006)، Islam و Imran (2008)، Islam et al. (2008)، Straub et al. (2008)، Straub et al. (2011) و Sumner et al. (2014) تعریف شده است. Cossu و Wells (2010) 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 Sheikh Eslami و Ghomshi (2015) در خم ۹۰ درجه با استفاده از جریان غلیظ نمکی نیز مشاهده شده است.

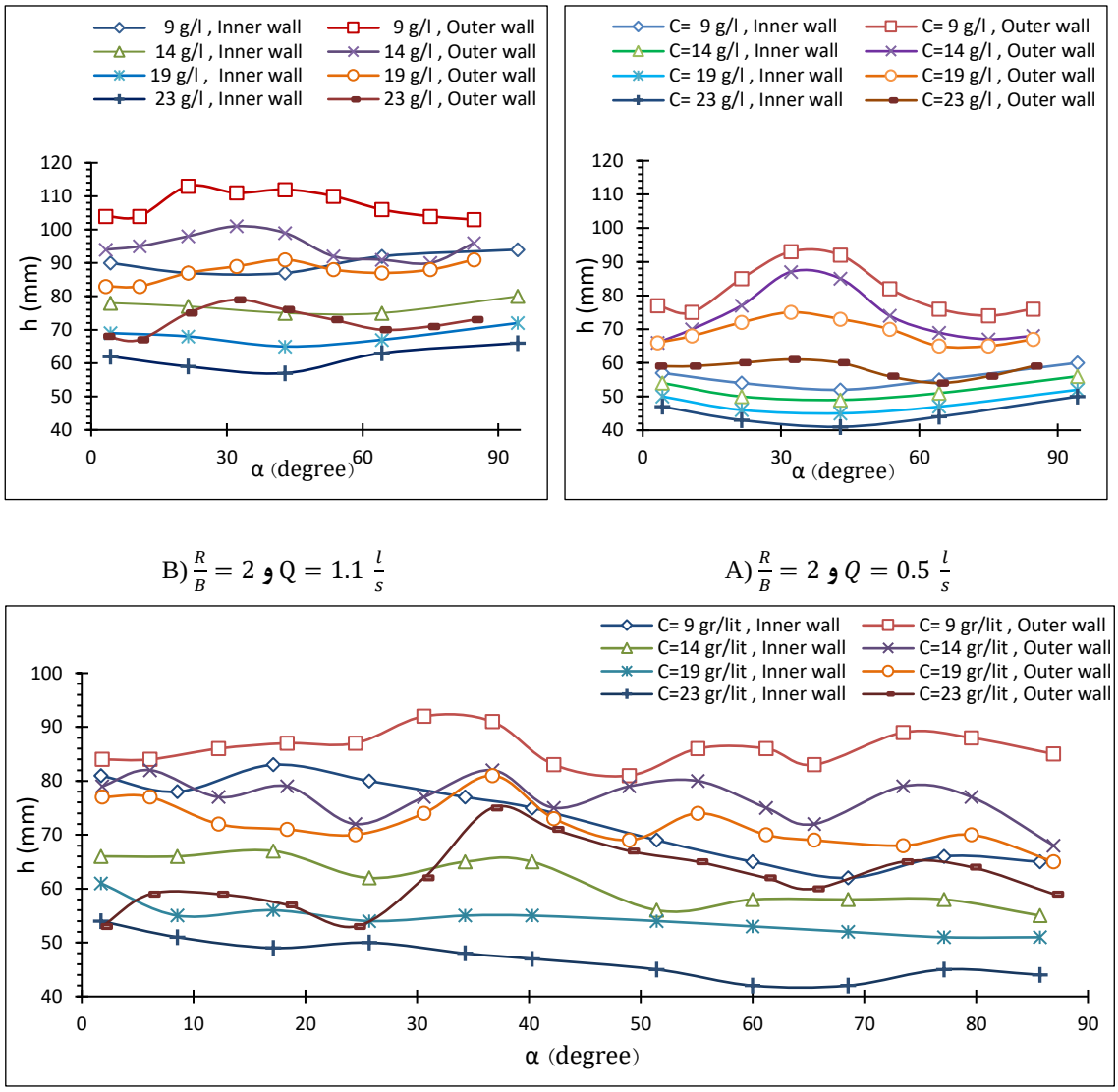
جدول ۱- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

Table 1- Characteristics of the conducted experiments

$Q\ (\frac{l}{s})$	$C\ (\frac{g}{l})$	ρ_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

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 به‌دست آمد. با افزایش غلظت به میزان شار مومنتم ورودی افزوده و به تبع آن نیروهای رانش بیشتری به جریان چگال وارد می‌شود (Sheikh Eslami and Ghomshi, 2015).



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

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

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

Fig. 6- Thickness of the body of a density current versus the angular position measured from the beginning of the bend at different concentrations.

شکل ٦- ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ نسبت به زاویه از ابتدای قوس در غلظت‌های مختلف

DOI: 10.22055/jise.2018.19003.1374

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 مطالعه Eslami و Ghomshi (2015) در خم ۹۰ درجه و در مطالعه مسیر مستقیم از جمله پژوهش های؛ Moradi et al. (2011)، Kouti et al. (2012)، Keshtkar et al. (2010)، Shahni Karamzadeh et al. (2006) و Firouzabadi et al. (2004) نیز بیان شده است. در پژوهش حاضر مشاهده شد که با افزایش غلظت رسوب ورودی، ضخامت بدنه جریان گل‌آلود در جداره‌های داخلی و خارجی خم کاهش می‌یابد. در همین راستا، Raeisi et al. (2026) در مطالعه آزمایشگاهی جریان‌های چگال رسوبی در محیط لایه‌بندی‌شده نشان دادند که افزایش غلظت ورودی می‌تواند موجب کاهش ضخامت جریان شود. اگرچه شرایط هیدرودینامیکی و هندسه محیط در دو پژوهش متفاوت است، همسویی روند مشاهده‌شده نشان‌دهنده اهمیت غلظت رسوب در تعیین ساختار و ضخامت جریان چگال است.

همان‌طور که در شکل (۶- ج) مشاهده می‌شود؛ سطح بالای جریان غلیظ در قوس با شعاع انحنای نسبی چهار 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 به‌علت دیواره‌های نزدیک بهم باشد.

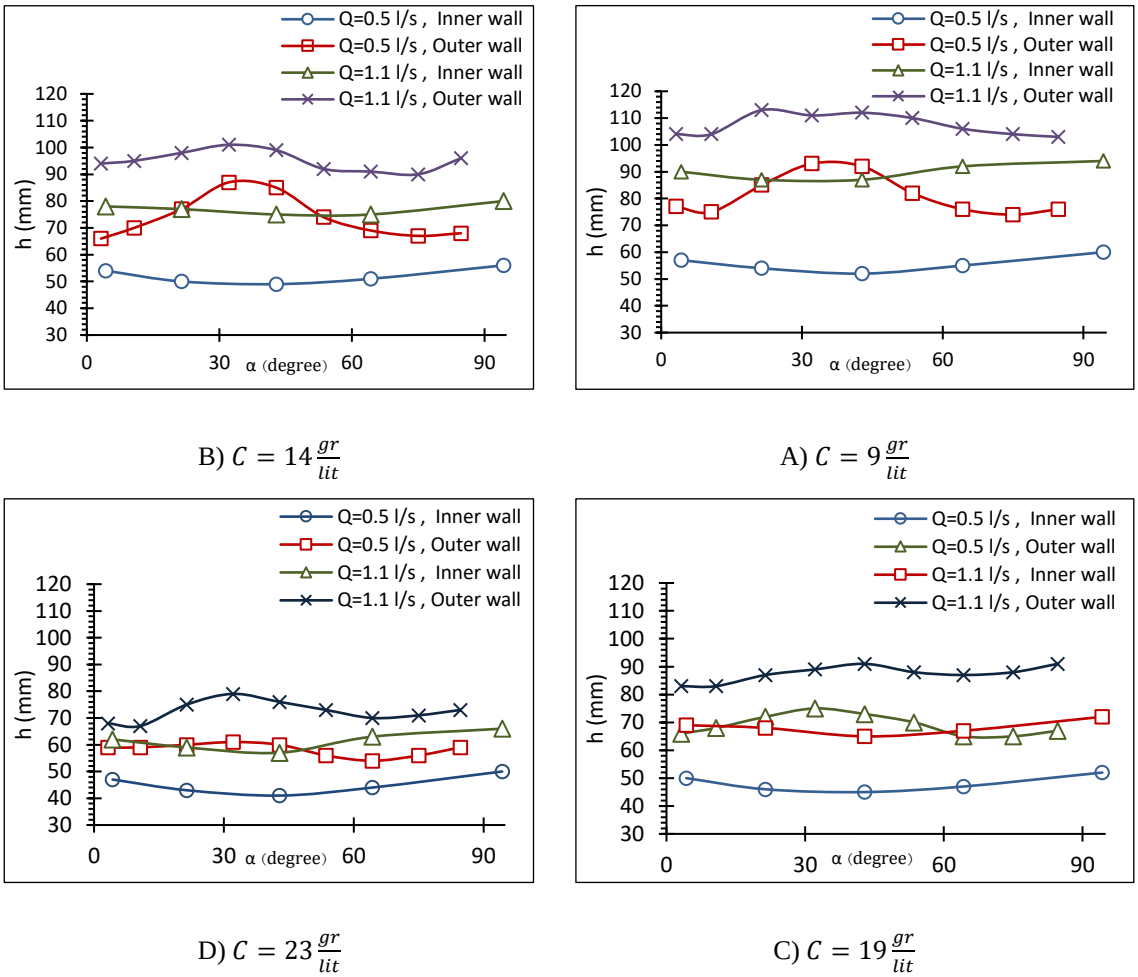


Fig. 7- Thickness of the body of a density current along the inner and outer walls of the bend versus the angular position measured from the beginning of the bend at two different flow rates.

شکل ۷- ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در جداره‌ی داخلی و خارجی قوس در مقابل زاویه از ابتدای قوس در دو دبی مختلف

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 دو (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 Sheikh Eslami و Ghomshi (2015) در خم ۹۰ درجه و مطالعه‌های Moradi et al. (2011)، kouti et al. (2012) و Firouzabadi et al. (2004) در مسیر مستقیم نیز مشاهده شده است.

۳- اثر شعاع قوس بر ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ

داده‌های برداشتی در دبی ۱/۱ لیتر بر ثانیه و شعاع‌های انحنای نسبی دو و چهار ($\frac{R}{B}=2$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 Sheikh Eslami و Ghomshi (2015) همخوانی دارد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزایش شعاع انحنای خم، در شرایط غلظت و دبی ثابت، موجب کاهش ضخامت بدنه جریان گل‌آلود در جداره‌های داخلی و خارجی قوس می‌شود. Wen et al. (2026) نیز با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی نشان دادند که انحنای کانال بر توزیع چگالی، ضخامت جریان و ساختار گردش ثانویه جریان‌های گل‌آلود تأثیر می‌گذارد.

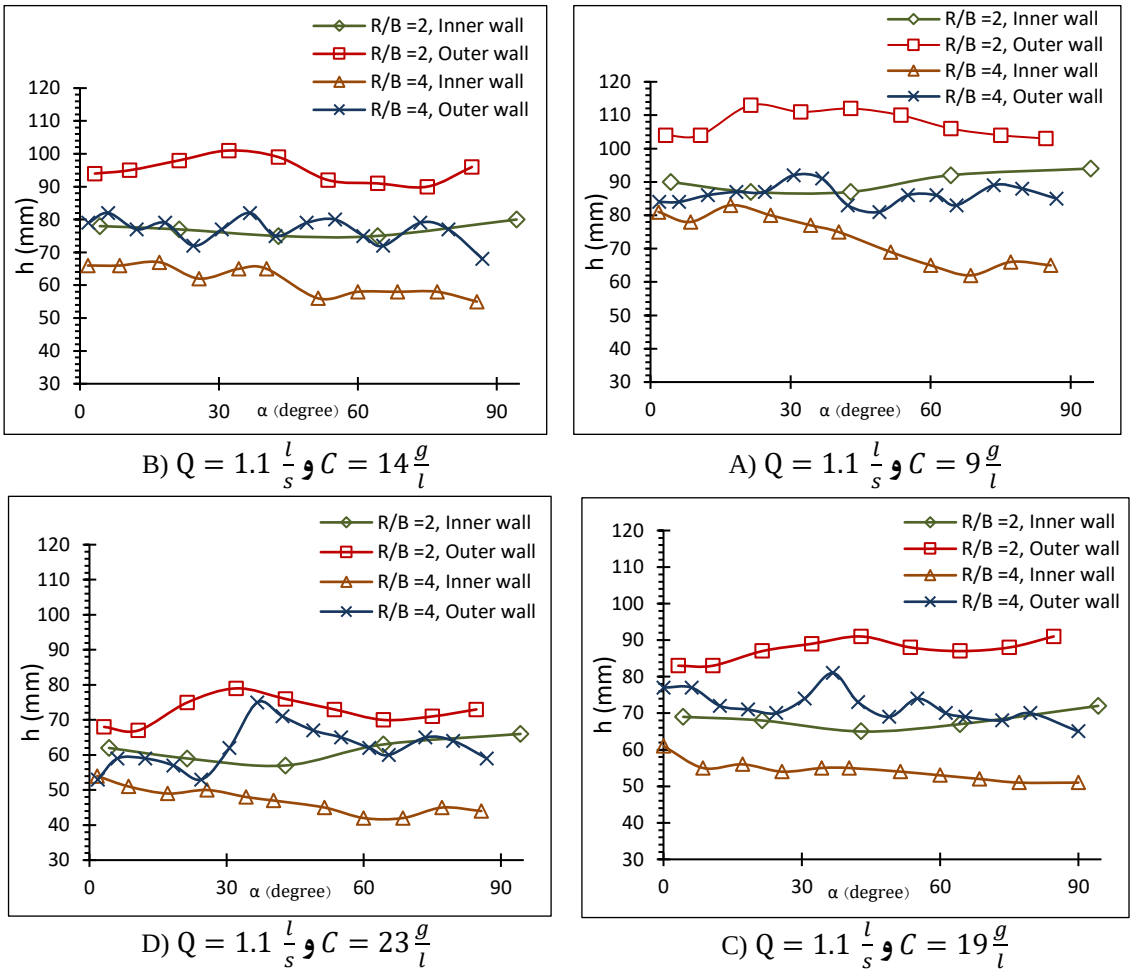


Fig. 8- Thickness of the density current body along the inner and outer walls of the bend versus the angular position from the bend entrance for different bends.

شکل ۸- ضخامت بدنه‌ی جریان غلیظ در جداره‌ی داخلی و خارجی قوس در مقابل زاویه از ابتدای قوس در خم‌های مختلف

DOI: 10.22055/jise.2018.19003.1374

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.

٤-۱- 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 (نه 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 Sheikh Eslami و Ghomshi (2015) افزایش غلظت، کاهش اختلاف ارتفاع را موجب شده است.

٤-۲- 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.

٤-۳-اثر شعاع خم بر شیب عرضی

در مقایسه‌ی اختلاف ارتفاع بدنه‌ی جریان غلیظ در دیواره‌ی داخلی و خارجی قوس‌ها با دو شعاع انحنای نسبی دو و چهار، و دبی ورودی جریان غلیظ یکسان ۱/۱ لیتر بر ثانیه، مشخص شد که در قوس با شعاع انحنای نسبی دو (قوس تند)، شیب عرضی سطح جریان کدر نسبت به قوس با شعاع انحنای نسبی چهار (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 دو و چهار، 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 Sheikh Eslami وGhomshi (2015) مشاهده شده است.

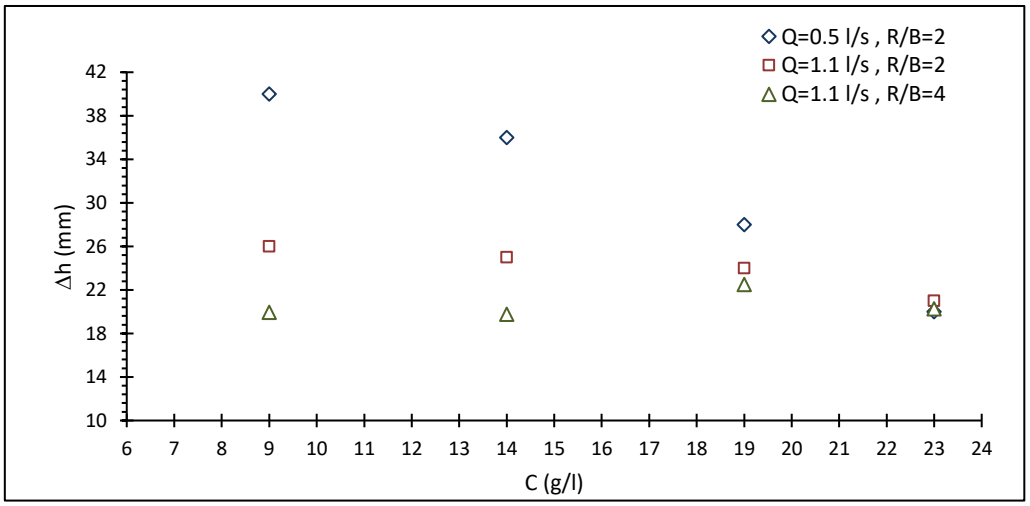


Fig. 9- Difference in the height of the density current body between the inner and outer bends versus concentration at different flow rates and relative radii of curvature.

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

نتیجه‌گیری

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 دو و چهار 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.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH 1397.86 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نسرین محمودیه، انجام آزمایش‌ها، تجزیه تحلیل داده‌ها.

نویسنده دوم: دکتر مهدی قمشی، بررسی نتایج، بررسی اصلاحات.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1- Adema, P.H., Eggenhuisen, J.T., Bleeker, J., Jacinto, R.S. and Miramontes, E., 2025. Turbidity current flow structure and its modulation by contour currents: Insights from 3D flume experiments. *Marine Geology*, 480, 107469. Doi: 10.1016/j.margeo.2024.107469.

2- Altinakar, S., Graf, W.H. and Hopfinger, E.J., 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic Research*, *28*(1), pp. 55–80. Doi: 10.1080/00221689009499147.

3- Beshavard, H., Ghomshi, M. and Mansouri Hafshejani, M., 2012. Investigation of parameters affecting the sediment transport coefficient in the body of sediment-laden density currents under concentrations below transport capacity. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, *35*(2), pp. 33–40. (In Persian).

4- Corney, R.K.T., Peakall, J., Parsons, D.R., Elliott, L., Amos, K.J., Best, J.L., Keevil, G.M. and Ingham, D.B., 2006. The orientation of helical flow in curved channels. *Sedimentology*, *53*(2), pp. 249–257. Doi: 10.1111/j.1365-3091.2006.00771.x.

5- 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. Doi: 10.1029/2010GL044296.

6- Daryaei, M., Kashefi Pour, S.M. and Ghomshi, M., 2013. Experimental investigation of the effects of bed slope and roughness on the front and body velocities of sediment-laden density currents. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, *37*(3), pp. 21–31. (In Persian).

7- Ellison, T.H. and Turner, J.S., 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, *6*(3), pp. 423–448. Doi: 10.1017/S0022112059000738.

8- Firouzabadi, B., Mousavi Hekmati, S.M. and Rad, M., 2004. Experimental investigation of three-dimensional density currents using ADV. In *9th Conference on Fluid Dynamics*, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Persian).

9- Islam, M.A. and Imran, J., 2008. Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *113*(C7), C07041. Doi: 10.1029/2007JC004292.

10- 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. Doi: 10.1029/2008GL034995.

11- 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*, *229*(3–4), pp. 241–257. Doi: 10.1016/j.margeo.2006.03.010.

12- Keshtkar, Sh., Ayoubzadeh, S.A. and Firouzabadi, B., 2010. Experimental investigation of thickness and velocity profiles of turbidity currents. *Journal of Water and Soil*, *24*(6), pp. 1073–1082. (In Persian).

13- Kouti, F., Kashefi Pour, S.M. and Ghomshi, M., 2012. Analysis of velocity profiles in density currents. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources: Water and Soil Sciences*, *16*(59), pp. 15–29. (In Persian).

14- Moradi, A., Ghomshi, M. and Sarvarinejad, B., 2011. Experimental investigation of body variations and mixing intensity of density currents in converging sections. In *1st International and 3rd National Conference on Dams and Hydropower Plants*, Tehran, Iran. (In Persian).

15- Mousavi Hekmati, S.M.R., Firouzabadi, B. and Rad, M., 2005. Lateral spreading of three-dimensional turbulent density currents. In *5th Iranian Hydraulic Conference*, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. (In Persian).

16- Oehy, C.D., De Cesare, G. and Schleiss, A.J., 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. *Journal of Hydraulic Research*, *48*(1), pp. 81–90. Doi: 10.1080/00221680903566042.

17- Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin, H.M., 1986. Self-accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, *171*, pp. 145–181. Doi: 10.1017/S0022112086001404.

18- Raeisi, N., Ghomeshi, M., Kamaei, K. and Abolfathi, S., 2026. Interflow dynamics of sediment-laden gravity currents in salinity-stratified reservoirs. *Advances in Water Resources*, Article 105538. Doi: 10.1016/j.advwatres.2026.105538.

19- Shafai Bajestan, M., 2009. *Theoretical and Practical Fundamentals of Sediment Transport Hydraulics*. Ahvaz: Shahid Chamran University Press, 549 pp. (In Persian).

20- Shahni Karamzadeh, N., Mahmoudian Shoushtari, M. and Ghomshi, M., 2006. Experimental study of velocity variations in density currents. In *17th International Congress on Civil Engineering*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian).

21- Sheikh Eslami, M. and Ghomshi, M., 2015. Investigation of density current behavior in a 90-degree bend. In *10th International Seminar on River Engineering*, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Persian).

22- Straub, K.M., 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*(3), pp. 744–760. Doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.05.014.

23- Straub, K.M., Mohrig, D., McElroy, B., Buttles, J. and Pirmez, C., 2008. Interactions between turbidity currents and topography in aggrading sinuous submarine channels: A laboratory study. *Geological Society of America Bulletin*, *120*(3–4), pp. 368–385. Doi: 10.1130/B25983.1.

24- 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), pp. 898–913. Doi: 10.1002/2013JC009008.

25- Wen, X., Han, Y., Zhu, R., Liu, E., Lin, X., Zhang, Y., Zhao, Y., Zhang, Y., Feng, J. and Tian, D., 2026. Curvature and slope control on turbidity currents and sedimentation in submarine channels: A numerical study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(12), 1084. Doi: 10.3390/jmse14121084.