

## Research Paper

# Experimental Study of Mobile Bed Influence on Density Current Behavior in Submarines

Marzieh Mohammadi<sup>1\*</sup>, Mehdi Ghomeshi<sup>2</sup>

1. Ph.D. of Water Structure, College of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2. Prof. of Hydraulic Structures, College of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 2020/07/19

Revised: 2020/09/22

Accepted: 2020/11/28

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2022.25483.2255

### Keywords:

Density Current, Mobile Bed, Relative of Radius of Curvature, Super Elevation, Velocity Profile

### Abstract

**Introduction:** Basically, dense flow is a two-phase flow that occurs due to the movement of a fluid in a different fluid of different densities. Laboratory research has been carried out on physical and hydraulic models of the Faculty of Engineering Sciences of Shahid Chamran University of Ahvaz.

**Methods:** Flume contains three successive bends with three different relative curvature radiuses:  $r/b=2$ , 4 and 6, 8.5 m length, 20cm width and 70cm height and a mobile bed type of Polyastailen cover the bed.

**Findings:** The results show, increasing the concentration of the inlet current, the flow velocity of the body flow increases on a mobile bed. The rate of increase in velocity depends on changes in the form of the bed the flow rate of the body will be reduced to about 19%. The velocity of the forehead has increased in the conditions of the mobile bed by forming the form of the bed. Also the elevation of the interface at the outer bank is in every case greater than the one at the inner bank. Due to increasing the relative curvature radius decreases elevation of the interface and transverse interfacial slopes. The maximum and minimum super elevations occur in  $r/b=2$  and 6, respectively. the transverse velocity decreases and the velocity increases in direct direction, which plays a significant role in reducing the slope of the water surface and the difference in height. Hence, the difference between the level of water in the third arc is very small.

**Citation:** Mohammadi, M., Ghomeshi M., Experimental Study of Mobile Bed Influence on Density Current Behavior in Submarines. Water Resources Engineering Journal. 2022; 14(49): 1- 12.

**\*Corresponding author:** Marzieh Mohammadi

**Address:** Dept. of Water Sciences Engineering College of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

**Tell:** +989132425227

**Email:** mohamadi\_200035@yahoo.com

## Extended Abstract

### Introduction

Basically, a turbidity or dense flow is a two-phase flow that occurs due to the movement of a fluid in a different fluid with a different density, occurring in many natural environments and engineering applications. The turbidity flow in mobile bed conditions consists of three regions: clear water of the perimeter, cloudy water and sediments (bed loads). The complex interaction of clouded flow with two other regions makes it difficult to analyze and analyze these flows. It can be noted that there are cases such as the effect of floating force, the interaction of particles with the current and the turbulences in the common surface of the environmental fluid with the currents flow. Since in reservoirs of dams, the roughness of the bed changes with the formation of a thick stream, therefore, and its effect on the flow characteristic is of great importance. In the context of a mobile bed, by increasing the velocity or power of the current in the surface area create different bed forms. On the other hand, in analyzing the flow profiles of a fluid in a mobile bed, it is important that the flow resistance consists of two parts: the first part of the roughness due to The particle size and the second part of the roughness are due to the shape of the bed.

### Materials and Methods

The experiments of this research have been carried out at the Laboratory of Physical and Hydraulic Models of the Faculty of water Sciences Engineering of Shahid Chamran University of Ahwaz. To conduct the experiments, this study has a flume length of 8.5m, depth of 70cm, width 20cm and slope of the 0.001 including three consecutive 90° curves with a curvature radius of 40, 80 and 120 cm. The experiments were carried out in the form of saline flow and at four concentrations of 0.7, 1, 1.5 and 2 liters per second at concentrations of 10, 15, 20 and 25 grams per liter. In order to provide a mobile bed in the flume floor, due to the special conditions of the currents (very low velocity in small laboratory flumes), in this study, comprehensive research has to be carried out on the material characteristics and their

use as corrosive substrate materials, as well as the Tests for this purpose are designed and implemented. Therefore, considering the facilities and limitations of suitable materials for the laboratory conditions above, the most important points in choosing these materials, type of materials, specific gravity, density, ease of use and their use for research purposes will be The most important feature for substrate sediments is density Particles, which make it very difficult to make because, due to the low velocities of the thick streams for the movement of these sediments, and especially the formation of bed forms, the need for particles with a specific density was low (in the study of Sequeiros, particles with density Specially for 1.53, and in the Rutlox research, particles with a specific density of 1.06) were used. Thus, after the above steps and attempts and errors with very different materials, deposits of polymer (expanded polystyrene), used.

### Findings

The results showed that at all concentrations in the first bend and cross section the maximum flow velocity was at the maximum in the inner wall. With the flow into the bend due to the sudden change in the curvature and the effect of centrifugal force along the internal wall, the pressure drop and along the outer wall increase the pressure. The shear stress variations were also based on changes in the profile of the transverse velocity, in other words, to the middle of the bend, the greatest tension occurred in the inner wall of the bend, and then it was drawn to the outer wall of the bend. In the context of mobile bed conditions, generally increasing concentrations and thus increasing the flow velocity, the flow power has also increased and the bed roughness has been changed. To the extent that, by washing the form of the substrate, the roughness and shear stress also begin to decrease. In concentrated stream, the secondary flow results in the maximum velocity approaching to the outer wall and the maximum velocity is transferred to the outer wall. This is seen in the transverse velocity profiles in the second and third bends.

## Discussion

In general, on the mobile bed, the velocity of the condensate flow increases as the concentration of the incoming flow increases. The important point in the flow rate profiles is that the rate of increase in speed depends on changes in the form of the bed, as the concentration increases. As the concentration of concentrated flow increases, the shear stress of the bed is also increased. In the context of the mobile bed conditions, the particles of the active agent act as a resistive force against the inflow current. With regard to the results in the context of mobile bed conditions, generally increased concentration due to increased flow velocity, and increased flow power has also been shown to change the bed roughness.

## Conclusion

Generally, with increasing concentrations, the shear stress of the substrate has also increased, as the bottom of the substrate, the roughness and shear stress begin to decrease as well. Increasing the speed and formation of bed forms increases the roughness and flow resistance of the substrate, so that the substrate particles act as a force against the inflow current. With regard to the results in the context of mobile bed conditions, generally increased concentration due to increased flow velocity, and increased flow power has also been shown to change the bed roughness. Generally, with increasing concentrations, the shear stress of the bed has also increased, as the bottom of the substrate, the roughness and shear stress begin to decrease as well. Illustrates the importance of forming a bed form for creating resistance to flow. Because at the beginning of the current flow, the bed form is not yet formed, and the agent of the resistivity and roughness of the bed is negligible, and as a result, there is no resistance and decrease effect against the forehead velocity. According to the results of experiments on the mobile bed, increasing the concentration of the incoming flow, the flow velocity of the fluid is also increased. The important point

in the flow rate profiles is that the rate of increase in velocity depends on changes in the form of the bed due to the increase in concentration. By increasing concentrations of turbidity flow, the shear stress of the bed is also increased. When the bed form is formed, as a result of it, the rate of velocity increase at 25g / l concentration by increasing shear stress, decreased (from 34% to 15%). Therefore, the rate of increase in velocity will occur by removing the bed forms and reducing the roughness and shear stress of the bed.

## Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

## Funding

Shahid Chamran Ahvaz university

## Authors' contributions

Design, Methodology, data analysis and final writing: Marzieh Mohammadi  
Supervision: Mehdi Ghomeshi.

## Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

آزمایشگاهی تاثیر بستر متحرک بر خصوصیات جریان غلیظ غیرباقی در  
پیچانودهامرضیه محمدی<sup>۱\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲. استاد سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

## چکیده

**مقدمه:** اصولاً جریان غلیظ یا چگال یک جریان دو فازی است که در اثر حرکت یک سیال درون سیال دیگر با چگالی متفاوت بوجود می‌آید. جریان‌های دو فازی با توجه به سرعت جریان می‌توانند به چهار نوع جریان همگن، شبه همگن، ناهمگن و لایه‌بندی شده تقسیم‌بندی شوند. در جریان‌های لایه‌بندی شده، جریان بصورت دو لایه کاملاً مشخص وجود دارد.

**روش:** آزمایشات این تحقیق بصورت جریان‌های لایه‌بندی شده در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهیدچمران اهواز انجام شده‌اند. برای انجام آزمایشات این تحقیق فلومی با بسترفرسایی از جنس پلی استیلن به طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتیمتر، عرض ۲۰ سانتیمتر و شیب کف ۰/۰۰۱ شامل سه قوس متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتیمتر ساخته شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد در پروفیل‌های سرعت بدنه جریان نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. در نتیجه باعث کاهش سرعت بدنه جریان تا حدود ۱۹ درصد خواهند شد. سرعت پیشانی افزایش یافته است و تا جایی این افزایش سرعت ادامه یافته است که تنش برشی ذرات بستر قادر به تشکیل فرم بستر باشد. در تمامی آزمایشات، ارتفاع جریان غلیظ در دیواره بیرونی بیشتر از دیواره داخلی قوس است و با افزایش شعاع قوس اختلاف ارتفاع کاهش می‌یابد. در این حالت سرعت عرضی کاهش و سرعت در راستای مستقیم افزایش پیدا می‌کند و این امر در کاهش شیب سطح آب و اختلاف ارتفاع نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند. از این رو اختلاف تراز سطح آب در قوس سوم بسیار ناچیز می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** در تمامی مقاطع ارتفاع جریان در قوس خارجی بیشتر از قوس داخلی می‌باشد. قوس اول با شعاع انحنا ۲ بیشترین اختلاف ارتفاع و قوس سوم با انحنا نسبی ۶ کمترین اختلاف ارتفاع را داراست. با توجه به رابطه ارائه شده برای محاسبه اختلاف تراز آب در جدار داخلی و بیرونی قوس بر روی بستر فرسایش‌پذیر مشخص می‌گردد که تأثیر زبری نسبی نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین اختلاف ارتفاع جداره بیرونی و جداره داخلی ایفا می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/wej.2022.25483.2255

## واژه‌های کلیدی:

اختلاف تراز آب، بستر فرسایشی، پروفیل سرعت، شعاع انحنا، جریان غلیظ.

\* نویسنده مسئول: مرضیه محمدی

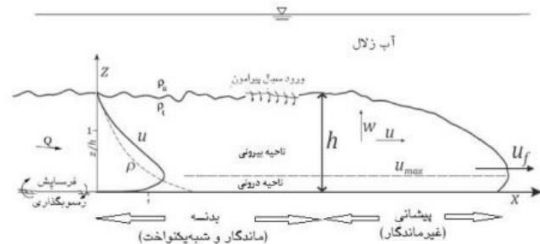
نشانی: گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تلفن: ۰۹۱۳۲۴۲۵۲۲۷

پست الکترونیکی: mohamadi\_200035@yahoo.com

مقدمه

زمانی که سیالی با جرم مخصوص  $(\rho \pm dp)$  به درون یک توده سیال با جرم مخصوص  $(\rho)$  جریان یابد، به علت تاثیر شتاب ثقل بر اختلاف جرم مخصوص دو سیال، جریان غلیظ به وجود می آید. اختلاف جرم مخصوص به تنهایی باعث ایجاد چنین جریانی نمی شود بلکه اختلاف در وزن مخصوص و یا به عبارتی دیگر اعمال نیروی ثقل روی اختلاف چگالی دو سیال باعث شکل گیری این نوع جریان ها می گردد، از این رو جریان غلیظ را جریان ثقلی نیز می نامند. جریان غلیظ دارای چهار ناحیه است: ۱- ناحیه قبل از ورود به مخزن ۲- ناحیه غوطه وری ۳- بدنه جریان غلیظ و ۴- راس جریان غلیظ شکل (۱) اجزای جریان غلیظ مشخص شده است.



شکل ۱- شماتیک اجزای یک جریان غلیظ

اختلاف دانسیته ممکن است ناشی از یک یا چند عامل به شرح زیر باشد: تفاوت دما، تفاوت در غلظت مواد محلول و تفاوت در غلظت ذرات معلق. تفاوت جریان غلیظ با جریان در مجاری رو باز در این است که سیال پیرامون تأثیر کاهنده ای روی نیروی ثقل دارد و ضریب کاهش به صورت  $(\Delta\rho/\rho_a)$  می باشد. از دیگر تفاوت های میان جریان غلیظ و جریان در کانال های روباز می توان به ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ، ایجاد جریان گردشی در سیال پیرامون و تفاوت در پروفیل های سرعت اشاره نمود. 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 می گردد:

$$g' = g \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \quad (1)$$

در این رابطه  $g'$ ، شتاب ثقل کاهش یافته،  $g$  شتاب ثقل زمین  $(9.81)$ ،  $\rho_a$ ،  $\rho_d$  به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ می باشد.

از آنجائی که عامل حرکت در جریان های غلیظ نیروی ثقل می باشد، همانند جریان در کانال های باز از عدد فرود جهت تشابه مدلی و بررسی رژیم جریان استفاده می گردد، با این تفاوت که در جریان غلیظ شتاب ثقل به دلیل اختلاف چگالی، کاهش یافته و به تبع آن عدد فرود نیز تغییر می نماید و آن را عدد فرود دنسیمیتریک می نامند، رابطه (۲):

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

که در آن  $Fr_d$  عدد فرود دنسیمیتریک،  $U$  سرعت متوسط،  $h$  عمق جریان و  $\theta$  زاویه بستر با افق می باشد.

حداقل مابین جریان کدر و سیال پیرامون معمولاً به آسانی قابل تشخیص نیست لذا برای بدست آوردن عمق و سرعت جریان نیاز به انتگرال گیری در عمق جریان  $(z)$  داریم. السون و ترنر [1] روابط زیر را برای بدست آوردن عمق  $h$  و سرعت متوسط  $U$  ارائه نمودند.

$$Uh = \int_0^\infty u dz \approx \int_0^{h_t} u dz \quad (3)$$

$$U^2 h = \int_0^\infty u^2 dz \approx \int_0^{h_t} u^2 dz \quad (4)$$

بنابراین با ترکیب روابط فوق می توان روابط (۵) و (۶) را استحصال نمود. در این روابط  $u$  سرعت نقطه ای جریان،  $h_t$  ارتفاعی است که در آن سرعت برابر با صفر می شود،  $\bar{U}$  سرعت متوسط جریان غلیظ،  $\bar{h}$  عمق متوسط جریان غلیظ می باشد.

$$\bar{h} = \frac{(\int_0^\infty u dz)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{(\int_0^{h_t} u dz)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \quad (5)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (6)$$

الگوی جریان در قوس

وجود انحنا در مسیر جریان بر پیچیدگی رفتار جریان می افزاید و بررسی آن مورد توجه است. قبل از ورود به خم، جریان موجود در رودخانه جریان طولی بوده و فاقد جریان عرضی می باشد. در این حالت پروفیل سرعت به گونه ای است که ماکزیم مقدار سرعت در محور مرکزی رودخانه می باشد. با ورود جریان به قوس رودخانه، جریان تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار گرفته و با افزایش قوس و کاهش شعاع انحنا، نیروی گریز از مرکز افزایش می یابد. نیروی گریز از مرکز بر ذرات آب اثر کرده و باعث می شود سطح آب در کنار جداره بیرونی بالا رفته و در مقابل، کاهش عمق در جداره داخلی اتفاق می افتد. در اثر این پدیده، اختلاف فشاری بین دو سمت قوس ایجاد می شود. به دلیل اختلاف هد (Head) موجود بین ساحل داخلی و ساحل بیرونی، جریان از پتانسیل بیشتر (قوس بیرونی) به سمت پتانسیل کمتر (قوس داخلی) حرکت می کند و نیروی فشاری بوجود می آورد. در قوس بیرونی نیروی گریز از مرکز نیز در عمق ثابت نیست و در لایه های نزدیک به سطح آب به دلیل سرعت بیشتر نیروی گریز از مرکز بیشتر خواهد بود [2]. روزفسکی (۱۹۵۷) با تحلیل جریان در خم ها در مختصات استوانه ای و بررسی جملات نسبی شتاب شعاعی نتیجه گیری کرد که شتاب گریز از مرکز توسط گرادیان فشار و تنش برشی شعاعی خنثی می شود [3]:

$$\frac{v^2}{r} = g S_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (7)$$

که در آن  $(v)$  سرعت جریان،  $(\tau_r)$  تنش برشی شعاعی و  $(S_r)$  شیب شعاعی سطح جریان است که با ارتفاع  $(z)$  و یا شعاع انحنا  $(r)$  تغییر می کند.

پروفیل سرعت در یک خم در صورت عدم وجود جریان های ثانویه تمایل به پروفیل گردابه آزاد دارد که در آن سرعت نسبت به شعاع تغییرات سرعت معکوس دارد:

$$v_z = \frac{c}{r} \quad (8)$$



رسوب از دریچه سد و عملکرد آن را ارزیابی کردند و اثر ترکیبی دبی خروجی و شیب بستر بر راندمان انتشار رسوب تخلیه بر اساس معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد شیب‌های تندتر بازده تخلیه بالاتری دارند. علاوه بر این، هنگام حرکت از بستر افقی به موقعیت‌های مایل، دبی خروجی بهینه که منجر به بیشترین بازده تخلیه با کمترین اتلاف آب می‌شود، افزایش می‌یابد. ویل و همکاران [9] در یک مطالعه آزمایشگاهی شرایط تشکیل کانال از طریق بررسی سیستماتیک شیب در اثر عبور جریان غلیظ نمکی در مقابل فضای فاز تخلیه را بررسی کردند. اندازه‌گیری‌های توپوگرافی بستر رسوب و مشخصات سرعت جریان گرانس به آنها اجازه داد تا تغییر فرم بستر کانال را مشخص کنیم. هنگامی که تنش برشی بستر از تنش برشی بحرانی رسوب فراتر رود، یک کانال در نزدیکی انتهای بالادست شیب شروع به تشکیل می‌کند و در حالی که به آرامی عمق می‌یابد، از پایین شیب منتشر می‌شود. پس از یک حالت گذرا حدوداً ۱-۲ ساعته، کانال به حالت پایدار می‌رسد. نتایج تجربی نشان داد که شیب سرعت فرسایش و سرعت برش کانال را کنترل می‌کند، در حالی که تخلیه آب نمک هندسه کانال را کنترل می‌کند. یک مدل مورفودینامیکی یک بعدی برای شبیه‌سازی کل فرایندهای تکامل جریان غلیظ، از شکل‌گیری و انتشار تا رکود برای جریان در کانال و جریان غلیظ در یک مخزن توسط وانگ و همکاران [10] ارائه گردید. این مدل برای جریان‌های کانال باز و جریان‌های غلیظ روی بستر متحرک با هندسه مقطع نامنظم قابل استفاده است. شرایط این حالت محاسبه منجر به پیش‌بینی‌های متوالی عوامل هیدرودینامیکی و مورفولوژیکی، از رسیدن جریان کانال باز به جریان غلیظ می‌شود. جریان غلیظ در دو آزمایش آزمایشگاهی با تنظیمات مختلف برای آزمایش قابلیت‌های مدل پیشنهادی استفاده شد، همچنین اثر شیب سطح آزاد نیز بررسی شد. و روش محاسبه ارتفاع محدود برای تخمین تخلیه خروجی پس از ورود جریان‌های غلیظ به جلوی سد اتخاذ شد. مکان‌های پیش‌بینی شده و زمان ورود در مقاطع مختلف با اندازه‌گیری‌ها مطابقت داشت. علاوه بر این، فرایندهای تکامل رابط محاسبه شده و نسبت رسوب رسوبی نیز به طور کلی با نتایج مشاهده شده موافقت داشت. بنابراین، مدل مورفودینامیکی یک بعدی ارائه شده به انتخاب ظرفیت طراحی خروجی‌ها و بهینه‌سازی روش انتشار رسوب در مخازن کمک کند. کولر و همکاران [11] ۲۹ آزمایش با دو نوع رسوب مختلف و سه اندازه دانه با هدف تمرکز در توسعه شکل بستر تولید شده توسط جریان‌های شور انجام دادند. نتایج نشان داده است پروفیل‌های سرعت و غلظت، با فرود دنیسمتریک بین ۰/۵ و ۲/۲ برای ۸ جریان بحرانی و ۲۱ جریان فوق بحرانی است. برخی همبستگی‌ها، مانند کاهش ارتفاع اوج سرعت و افزایش میانگین سرعت (با کاهش ضخامت جریان)، به دلیل افزایش غلظت و / یا شیب فلوام مشخص شد. وقوع فرم بستر برای تخلیه زیاد و میزان غلظت چگالی جریان، که مستقیماً بر فرود دنیسمتریک تأثیر می‌گذارد، بیشتر بود. موسوی حکمتی و نجفی [12] به بررسی رشد جانبی جریان غلیظ ناپایدار پرداختند. برای این منظور، قضیه باکینگهام II همراه با تجزیه و تحلیل ابعادی برای استخراج دو رابطه مناسب اجرا شده است، یکی از آنها عرض فعلی را به طول جریان مربوط می‌کند

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 تراز سطح آب در جدار داخلی و جدار بیرونی  $\Delta h$  بصورت زیر نشان داده می‌شود چاو (۱۹۵۹):

$$\Delta h = \frac{c^2}{2gr_0^2 r_i^2} (r_0^2 - r_i^2) \quad (9)$$

رابطه‌های زیادی برای تعیین اختلاف تراز سطح آب ارائه شده است اما دقت رابطه فوق از همه بیشتر است. با قرار دادن رابطه (۷) در معادله (۸) خواهیم داشت:

$$v_m = \frac{c}{r_m} \rightarrow \Delta h = \frac{v_m^2 r_m^2}{2gr_0^2 r_i^2} (r_0^2 - r_i^2) \quad (10)$$

که در آن  $r_m$  شعاع انحنا متوسط و  $v_m$  سرعت متوسط جریان می‌باشد [4].

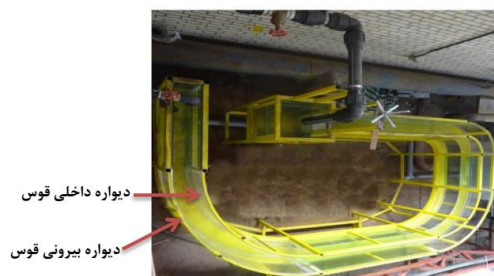
شریف نژاد و کاشفی‌پور [5] با تغییر شرایط هیدرولیکی جریان نظیر پارامترهای شیب بستر، غلظت و دبی جریان ورودی، مشخصه‌های جریان غلیظ نظیر پروفیل‌های سرعت بدنه و پیشانی جریان، ضریب شدت اختلاط و پروفیل غلظت با تحلیل فرم‌های بستر جریان و تنش برشی بستر متحرک بررسی و با نتایج بستر صلب مقایسه کرد. نتایج نشان داد، بستر متحرک و خصوصاً تشکیل فرم بستر، باعث کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ تا حدود ۳۰ درصد خواهد شد. در بستر متحرک با ورود رسوبات، باعث افزایش سرعت پیشانی جریان غلیظ و ضریب کنولگان تا حدود ۲۰ درصد شده است. نتایج نشان داد، تغییرات ضریب شدت اختلاط وابسته به تغییرات زبری بستر و نوع فرم‌های بستر تشکیل شده است تشکیل فرم‌های بستر بر توزیع غلظت جریان غلیظ در عمق نیز تأثیرگذار است. نیکلسون و فلن [6]، به بررسی جریان غلیظ دو فاز (با جریان دو لایه بالایی و پایینی و چگالی‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$ ) بر روی یک بستر با توپوگرافی ثابت سینوسی (با طول  $\lambda$  و ارتفاع  $\Delta$ ) پرداختند. هدف از این تحقیق را نقطه آغاز مطالعات آینده برای بررسی اثر پروفیل‌های مختلف بستر بر پیشرفت جریان غلیظ معرفی کردند. اثر لایه‌بندی جریان چگال، هندسه توپوگرافی و شرایط اولیه جریان مورد مطالعه قرار گرفت. بدین ترتیب نشان دادند که عدد فرود، تابع کاهشی از متغیرهای  $D/H$ ،  $d/H$  و  $S_0$  است. ژو و همکاران [7]، به بررسی شرایط هیدرولیکی و رسوبگذاری جریان غلیظ رسوبی در شرایط طبیعی در پایین‌دست دو جریان غلیظ رسوبی پرداختند. این تحقیق، بر دو جریان غلیظ اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۰۲ با تأکید بر رسوبات معلق از نمونه‌های جمع‌آوری شده از بدنه جریان غلیظ متمرکز شده است. در شرایط نرمال، تغییر در مشخصات جریان پایین‌دست، محدود به اثر تغییر جریان ورودی و ته‌نشینی و فرسایش رسوبات معلق است. شرایط نرمال در شرایط آزمایشگاهی با شیب کف ثابت و نرخ جریان ورودی کنترل می‌گردد. در این تحقیق برای نخستین بار، غلظت رسوب و اندازه‌ی ذرات رسوبی در بدنه جریان غلیظ صحرایی اندازه‌گیری شده است. چامون و همکاران [8] با استفاده از یک مدل تجربی، تخلیه

معکوس می‌باشد (به سمت ساحل بیرونی). ۲- رژیم متوسط با مقادیر متوسط عدد فرود دنسیمیتریک جهت جریان ثانویه نرمال (به سمت ساحل داخلی) بوده و جریان می‌تواند زیر بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. ۳- رژیم پایینی با عدد فرود دنسیمیتریک پایین که جریان زیر بحرانی بوده و جهت جریان ثانویه معکوس می‌باشد.

تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی زیادی روی جنبه‌های مختلف جریان‌های غلیظ در مسیر مستقیم صورت گرفته است در کانال‌های قوسی ورود جریان غلیظ به قوس‌ها موجب تغییر قابل توجهی در شکل جریان غلیظ و در نتیجه الگوی جریان غلیظ در قوس می‌شود. تنها تعداد کمی از این مطالعات بر روی بستر غیر ثابت (متحرک) انجام شده است. بطوریکه، وقتی شکل بستر توسعه پیدا کرده، اثر آن بر مشخصات جریان ورودی ارزیابی نشده است. در واقع، فرم بستر مکانیسم بازخوردی دارد و بر جریانی که آن را ایجاد کرده است، اثر خواهد گذاشت [14]. همچنین، طبق نظر زو [16]، یکی از مهمترین دلایل تفاوت نتایج داده‌های صحرایی با نتایج آزمایشگاهی، ایجاد فرم‌های بستر در شرایط طبیعی و بستر رسوبی است. همچنین، نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت و غلظت جریان، علاوه بر وابستگی به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی جریان، به دانه‌بندی بستر و تنش‌های برشی ناشی از آن نیز وابسته است [17]. بنابراین، نادیده گرفتن رسوبات بستر موجب می‌شود که اثر متحرک بودن رسوبات کف و یا تشکیل فرم‌های بستر نادیده گرفته شود و نتایج آزمایشگاهی با خطا همراه شود. بنابراین، با توجه به اهمیت نقش بستر رسوبی در تحلیل مشخصات جریان غلیظ، و نزدیک شدن به نتایج واقعی‌تر در طبیعت، اهداف این تحقیق به صورت زیر تعریف می‌گردد: تعیین مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ زیرگذر در بستر فرسایشی با جریان نمکی و تعیین اثر تبادلی جریان غلیظ نمکی بر بستر فرسایشی و بررسی تغییرات فرسایش و رسوبگذاری در خم‌ها.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این آزمایشات در فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتیمتر، عرض ۲۰ سانتیمتر و شیب کف ۰/۰۰۱، دارای سه خم متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ انجام شد (شکل ۲).



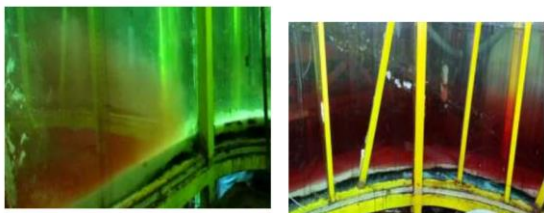
### شکل ۲- نمای فلوم مورد استفاده برای آزمایش از بالا

برای انجام این آزمایشات از نمک طعام و ماده رنگی حلال در آب برای ایجاد سیال غلیظ استفاده گردید. علت استفاده از ماده رنگی به همراه

و دیگری عرض فعلی را از نظر زمان بیان می‌کند. ضرایب این دو رابطه به صورت تجربی تعیین می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، سه رژیم مختلف یعنی، بدون گرانروی به عنوان رژیم اول، شناوری-گرانروی و گرانش-گرانروی به عنوان رژیم‌های دوم و سوم در داخل جریان متمایز می‌شوند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که سرعت رشد جانبی در رژیم اول کمتر از رژیم دوم است. بر اساس نتایج به دست آمده، رشد جانبی در برخی مناطق خاص مستقل از تغییرات شیب، غلظت و جریان حجمی است. سلین و همکاران [13] با استفاده از شبیه سازی‌های عددی مستقیم بسیار حل شده از یک مدل همگن، بدن جریان غلیظ را در شرایط جریانی عادی مطالعه کردند. آنها بر روی جریان‌های غلیظ تمرکز که مقدار خالص رسوب در آن ثابت بوده است و بر پنج عدد برشی ریچاردسون مختلف از ۵ تا ۸۰ تمرکز کردند. رسوب را به اندازه کافی ریز در نظر گرفته شد که از اثر ته نشینی آنها در نظر گرفته نشود و اثر سرعت ته نشینی را در نظر گرفتند. نتایج نشان داد خصوصیات جریان طبیعی جریان غلیظ را می‌توان باتوجه به عدد ریچاردسون و رینولدز کاملاً مشخص کرد. پروفیل‌های سرعت، غلظت و انرژی جنبشی متلاطم شبیه شرایط جریان نرمال است. جریان با ویژگی‌های فوق بحرانی برای محدوده ریچارسون کمتر از ۰/۴ و زیر بحرانی برای ریچارسون بیشتر از ۰/۷ مشاهده گردید و برای بین ۰/۴ و ۰/۷ جریان زیر بحرانی گزارش گردید. از بررسی اعداد ریچاردسون به نظر رسید که انتقال جریانی از حالت زیر بحرانی به فوق بحرانی شدید نیست. همچنین هماهنگی خوبی بین نتایج تجربی و شبیه سازی در هر دو رژیم مشاهده گردید. و یک مدل ساده برای ضریب درگ به عنوان تابعی از اعداد رینولدز و ریچاردسون ارائه شد.

سکویروس و همکاران [14]، به مطالعه جریان غلیظ رسوبی و نمکی در هر دو رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی پرداختند. در این تحقیق، ۷۴ آزمایش جریان غلیظ بر روی بستر متحرک با هدف تعیین اثر زبری بستر و فرم‌های بستر بر پروفیل قائم سرعت و همچنین، تغییرات چگالی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات قبلی جریان غلیظ بیشتر روی ساختار قائم جریان غلیظ بوده است و تنها تعداد محدودی از این تحقیقات بر روی بستر رسوبی انجام شده است. نتایج نشان داد، فرم بسترهای تشکیل شده اثر بازخوردی دارند و درواقع بر روی جریان تولیدی خود اثر می‌گذارند.

ابد و همکاران [15] جریان ثانویه ناشی از عبور جریان غلیظ نمکی از کانالی 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 دنسیمیتریک ( $Fr_d$ ) تغییر می‌کند. هنگامی که عدد  $Fr_d$  کاهش می‌یابد، ماکزیمم سرعت در رأس خم به سمت محل تلاقی جریان غلیظ با محیط پیرامون میل می‌کند و پروفیل اختلاف چگالی نسبی اضافی بجز در محل تلاقی یکنواخت تر می‌شود. هنگامی که  $Fr_d$  افزایش پیدا می‌کند، سرعت ماکزیمم مماس به سمت بستر متمایل می‌شود. ابد و همکاران [15] در آزمایشات خود به سه دامنه عدد فرود دنسیمیتریک دست یافتند که سه رژیم جریان را از هم متمایز می‌سازد. ۱- رژیم بالایی با عدد فرود دنسیمیتریک بالا که تقریباً همه‌ی اعداد در محدوده جریان فوق بحرانی و جهت جریان ثانویه



شکل ۴- حرکت جریان غلیظ در فلوم

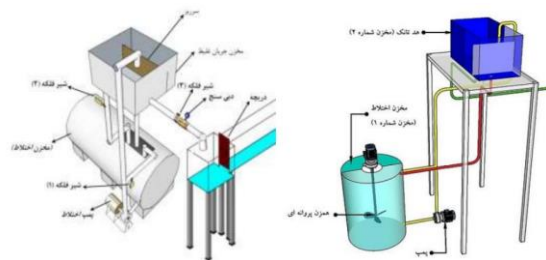
اندازه‌گیری دبی ورودی از طریق دبی‌سنج و تنظیم آن از طریق شیرفلکه مذکور صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دبی به محض آنکه سطح سیال غلیظ پشت دریچه فلوم برابر با سطح سیال پیرامون می‌گشت دریچه فلوم گشوده می‌شد. بدین شکل جریان غلیظ با دبی تنظیم شده وارد فلوم می‌گشت. حرکت جریان غلیظ زیر سیال محیطی آغاز و پس از رسیدن راس جریان غلیظ به انتهای فلوم شیر فلکه انتهای فلوم (شیر فلکه تخلیه) باز شده و راس جریان و تلاطم‌های آن تخلیه می‌گردد. در این حالت بخشی از سیال ساکن نیز از فلوم خارج می‌شود برای ثابت نگه داشتن سطح آب ساکن، شیرفلکه ورودی آب تمیز به فلوم باز و مقدار آب لازم به فلوم اضافه می‌شد تا مانع از افت تراز آب گردد. برای جلوگیری از بوجود آمدن تلاطم و گرداب‌های ناشی از تداخل آب تمیز به فلوم و جریان غلیظ خروجی در این ناحیه صفحه‌ای بعنوان آرام کننده جریان در انتهای فلوم نصب گردید. بعد از تخلیه کامل راس جریان و حصول اطمینان از یکنواخت بودن بدنه جریان در طول فلوم، ارتفاع جریان غلیظ در هر قوس در فاصله ۱۰ سانتی‌متری در طول فلوم در دو دیواره داخلی و خارجی قرائت و ثبت گردید. به منظور برداشت ارتفاع بدنه ارتفاع جریان غلیظ از اشل با دقت ۱ میلی‌متر استفاده گردید. در دیواره داخلی و خارجی هر سه قوس، خط‌کش‌های تلقی به فاصله ۱۰ سانتی‌متر نصب شده‌اند شکل (۵).



شکل ۵- اشل اندازه‌گیری عمق جریان غلیظ

برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک<sup>۱</sup> (ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است. این دستگاه می‌تواند نوسانات سرعت را در یک بازه زمانی مشخص در سه راستای عمود بر هم ثبت و به کمک نرم‌افزار 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. با استفاده از

محلول آب و نمک برای تشخیص سیال غلیظ (محلول آب و نمک) از سیال پیرامون (آب شهری) و قابل رویت بودن آن می‌باشد. آزمایشات به صورت جریان نمکی و در چهار دبی ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر در ثانیه و در غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر صورت پذیرفت. به دلیل کم بودن حجم مخزن‌های اختلاط به تنهایی (۲۰۰ لیتر) سیال غلیظ (محلول آب، نمک و ماده رنگی) تهیه شده در دو مخزن اختلاط آماده، و بطور جداگانه توسط پمپ از هر مخزن سیال غلیظ به یک هدتانک با ارتفاع ثابت بصورت پیوسته تا پایان آزمایشات منتقل می‌گردد شکل (۳).



شکل ۳- مخزن‌های اختلاط

با توجه به شرایط ویژه‌ی جریان‌های غلیظ (سرعت‌های بسیار کم در فلوم‌های کوچک آزمایشگاهی)، در این تحقیق نیاز بود تحقیقات جامعی در بخش مشخصات مواد و کاربری آنها به عنوان مصالح بستر فرسایشی انجام گیرد. لذا مهمترین نکات در انتخاب این مواد، جنس، دانه‌بندی، چگالی مخصوص، سهولت بکارگیری و کاربری آنها در راستای اهداف تحقیق بود. از مهمترین ویژگی برای رسوبات بستر، چگالی مخصوص ذرات است که تهیه آن را بسیار مشکل می‌سازد. زیرا با توجه به سرعت‌های پایین جریان‌های غلیظ برای حرکت این رسوبات و خصوصاً تشکیل فرم‌های بستر، نیاز به ذرات با چگالی مخصوص پایین می‌بود [14]، ذرات با چگالی مخصوص ۱/۵۳ و در تحقیق [18] ذرات با چگالی مخصوص ۱/۰۶ استفاده شده است. بدین ترتیب، پس از طی مراحل فوق و سعی و خطاهای بسیار با مواد متفاوت، رسوباتی از جنس پلیمر (پلی استایرن انبساطی) برای تهیه بستر متحرک در کف فلوم با چگالی ۱/۰۱۳ و قطر میانگین ۴۵۰ میکرومتر (d50) برای یکنواخت کردن و همتراز نمودن سطح فلوم و دریچه رسوبات را با ارتفاعی حدود ۸ سانتیمتر در کف فلوم و در فاصله یک متری از دریچه پس از یک سطح شیبدار ملایم که به عنوان آرام کننده جریان عمل می‌کند و از آشفتگی و تلاطم‌های ابتدایی موجود در جریان به دلیل نزدیکی دریچه تا بستر در تمامی دبی‌ها علی‌الخصوص دبی‌های ۱/۵ و ۲ لیتر برثانیه می‌گاهد قرار گرفته است.

پیش از ورود جریان غلیظ فلوم بطور کامل آبیگری شده و شیرفلکه ورود سیال غلیظ به محوطه پشت دریچه فلوم باز می‌شد. (در انتهای ۵۰ سانتی‌متری ابتدایی 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 شکل (۴)).

<sup>1</sup> Acoustic Doppler Velocity meter

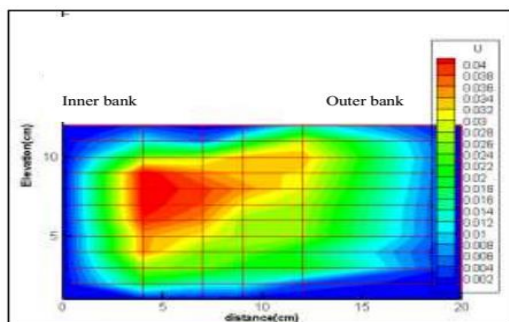


ذخیره مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای در هر نقطه ۲۰ تا ۳۰ ثانیه به طول می انجامید با توجه به اینکه فرکانس اندازه‌گیری در دستگاه (ADV) مورد استفاده ۲۵Hz و برای حداکثر سرعت جریان ۲/۵(m/s) بود است؛ لذا این مدت زمان برای پوشش مشخصات جریان کافی بوده است؛ مدت زمان لازم برای برداشت تمامی ۴۸ نقطه (۴ نقطه در عرض و ۱۲ نقطه در عمق) در هر مقطع عرضی به طور متوسط ۶ ساعت بوده است که توسط ۲ مخزن با حجم ۲۰۰۰ لیتر، جریان غلیظ مورد نیاز بطور پیوسته وارد فلوم آزمایشگاهی می‌گردد. داده برداری دستگاه ADV در راستای ارتفاع از بالا به پایین صورت گرفت سپس دستگاه به سمت نقطه ی بعدی جابه جا شده و این عمل تا برداشت همه نقاط ادامه می‌یافت. داده‌های ثبت شده توسط نرم افزار Vectrino+ در محیط این نرم افزار با پسوند .vno ذخیره می‌شوند. بعد از جمع آوری داده‌ها به منظور تبدیل پسوند .vno به .dat سپس داده‌های ذخیره شده با فرمت .dat به محیط نرم افزار Excel انتقال و برنامه ای تنظیم شد تا بتواند با میانگین‌گیری از بین اعدادی با  $correlation > 70$  و  $SNR > 15$  متوسط هر یک از مؤلفه‌های سرعت را برآورد نماید. برای هر نقطه به طور متوسط ۳۰۰۰ داده توسط نرم افزار ثبت شده است. در جدول (۱) متوسط جریان همه دبی ها و غلظت ها ارائه شده است.

جدول ۱- سرعت متوسط جریان به ازای دبی های ۰/۷ تا ۲ لیتر در ثانیه و در غلظت های مورد نظر

q(L/s)	C(g/L)			
	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
	$\bar{U}$ (cm/s)			
۰/۷	۲/۱۶	۲/۷	۲/۸۶	۲/۸۷
۱	۲/۵۴	۲/۷۴	۳/۰۵	۳/۴۹
۱/۵	۲/۶۸	۲/۸۲	۳/۴	۳/۵۲
۲	۳/۵	۳/۷۸	۴/۳۷	۴/۴

جدول (۲) مقادیر سرعت نقطه‌ای (u) در اعماق ۱ تا ۱۲ سانتیمتر از روی بستر فرسایشی روی محور کانال اندازه‌گیری شده است. جدول (۳) چگونگی محاسبه سرعت متوسط در ناحیه ۲ شکل (۶) (مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتیمتری) و به‌ازای دبی ۰/۷ لیتر در ثانیه و غلظت ۲۵ گرم در لیتر نشان داده شده است.



شکل ۶- دبی ۰/۷ لیتر در ثانیه و غلظت ۲۵ گرم در لیتر

داده های سرعت و مشخصات فیزیکی کانال آزمایشگاهی چگونگی حرکت میدان جریان در هر سه قوس در نرم‌افزار tecplot مدل گردید. به منظور تخمین اختلاف تراز آب در جداره داخلی و جداره بیرونی تغییرات پارامترهای مؤثر روی ضخامت جریان غلیظ بر روی بستر فرسایشی مورد بررسی قرارگرفت. متغیرهای موجود برای آنالیز ابعادی اختلاف ارتفاع در دو جداره در بدنه جریان غلیظ در خم مطابق معادله (۱۱) می‌باشد:

$$f(S_0, b, r_m, \theta, \Delta h, g, \rho_d, \rho_a, U, h, D_s) = 0 \quad (11)$$

در این معادله  $\Delta h$  اختلاف ارتفاع سیال غلیظ در جداره داخلی و بیرونی خم می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی به روش باکینگهام اعداد بدون بعد زیر حاصل می‌شود، پارامترهای بدون بعد را به صورت رابطه (۱۲) می‌توان نوشت:

$$\left( S_0, \frac{r_m}{b}, \theta, \frac{g\Delta h}{U^2}, \frac{gh}{U^2}, \frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a}, \frac{D_s}{b} \right) = 0 \quad (12)$$

همانگونه که قبلاً عنوان شد شتاب ثقل مؤثر بر جریان 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  $\rho_d, \rho_a, g$  در تعریف شتاب ثقل مؤثر بکار رفته که می‌توان با وارد کردن  $g'$  در رابطه (۱۳) اعداد بدون فوق را به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\left( S_0, \frac{r_m}{b}, \theta, \frac{g'\Delta h}{U^2}, \frac{D_s}{b}, Fr_d \right) = 0 \quad (13)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی و با توجه به ثابت بودن شیب کف کانال، زاویه مرکزی خم و قطر ذرات بستر به منظور تخمین اختلاف تراز آب در جداره داخلی و جداره بیرونی خم معادله ای مطابق معادله (۱۴) بدست آمد:

$$f\left(\frac{g'\Delta h}{U^2}, \frac{r_m}{b}, Fr_d\right) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{g'\Delta h}{U^2} = \left( Fr_d, \frac{k_s}{b}, \frac{r_m}{b} \right) \quad (15)$$

## بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک (ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است. تکنیک‌های اندازه‌گیری جدید همچون سرعت‌سنج سه بعدی صوتی امکان بررسی خصوصیات آشفتگی جریان را برای کاربر ایجاد می‌کند. Vectrino+ مؤلفه‌های سرعت را در راستای گیرنده‌ها و یا محورهای X، Y و Z اندازه‌گیری می‌کند. به منظور انجام آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت جریان در این مورد نیز پس از یکنواخت شدن بدنه جریان سرعت‌های نقطه‌ای لحظه‌ای در ۹ مقطع (در ابتدا، وسط و انتهای هر قوس) توسط سرعت سنج ثبت می‌گردید. در این تحقیق با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) مؤلفه‌های سرعت (u، v، w) در ۴۸ نقطه در هر مقطع عرضی اندازه‌گیری و ذخیره شد. مدت زمان

جدول ۲- سرعت نقطه‌ای اندازه‌گیری شده در اعماق مختلف به‌ازای دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۰ گرم در لیتر

h(cm)	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
u(m/s)	۰	۰/۰۱۷	۰/۰۲	۰/۰۲۰۲	۰/۰۲۱۵	۰/۰۲۲۹	۰/۰۲۴۳	۰/۰۲۵	۰/۰۲۳۷	۰/۰۲۳۶	۰/۰۱۹	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱

جدول ۳- محاسبه سرعت متوسط جریان به‌ازای غلظت ۱۰ گرم در لیتر برای دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه

q(L/s)	u ave i	$\Delta Z$	u ave * $\Delta Z$	u ave <sup>2</sup> $\Delta Z$	$\bar{U}$
q=۰/۷	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۸۶	۷/۴۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲/۱۶
	۰/۰۱۸۵	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱۸	۳/۴۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲	۴/۰۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۰۹۲	۰/۰۱	۰/۰۰۲۰۹	۴/۳۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۴۲	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲۴	۵/۸۹×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۶۶	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲۶	۷/۱۰۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲۵۷	۶/۶۱۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۴۳۹	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲۴۳	۵/۹۴۹×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۳۶۵	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲۳۶	۵/۵۹×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۲۱۳۶	۰/۰۱	۰/۰۰۰۲۱۳	۴/۵۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۱۵۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱۵۳	۲/۳۵۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	
	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۶۰	۴/۰۱۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	
	۰/۰۰۰۵۵	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۰۵	۳/۰۹×۱۰ <sup>-۹</sup>	
.	۰/۰۱	.	.		

$$i_y = \frac{dz}{dy} \approx \frac{U^2}{rg} \quad (۱۶)$$

که در این رابطه  $i_y$  شیب سطح آب در جهت y (در اینجا عرض کانال می‌باشد)، U سرعت متوسط جریان در جهت x و r شعاع انحنای خم می‌باشد [4].

پروفیل سرعت در یک خم در صورت عدم تأثیر جریان‌های ثانویه تمایل به پروفیل ورتکس آزاد (غیر چرخشی) دارد که در آن سرعت نسبت به شعاع تغییرات سرعت، نسبت معکوس دارد و به صورت معادله (۱۷) بیان می‌شود [19].

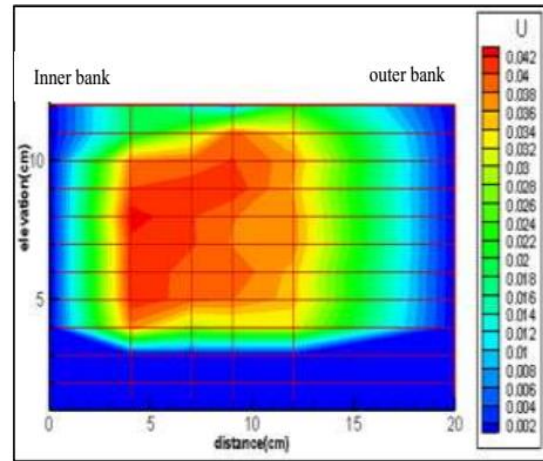
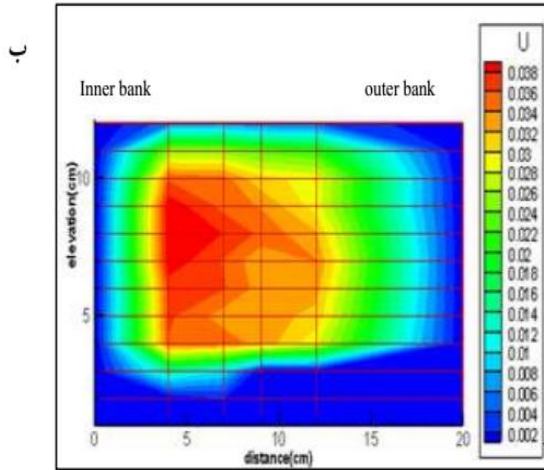
$$V_z = \frac{C}{r} \quad (۱۷)$$

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 ورتکس آزاد نامیده می‌شود.

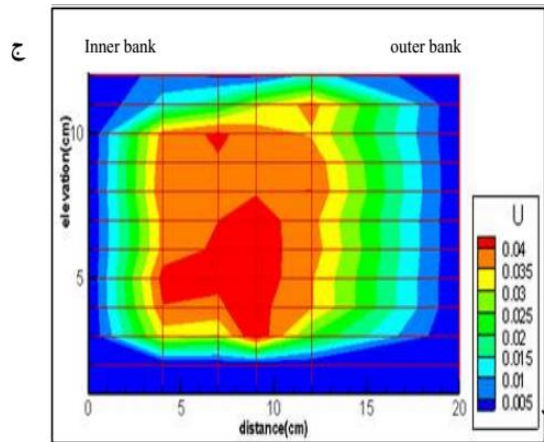
نتایج آزمایشات نشان داد در ابتدای قوس اول جریان پروفیل عرضی خود در مسیر مستقیم را حفظ نکرده و تغییر نشان می‌دهد. برداشت داده‌های سرعت در خم با شعاع انحنای ۴۰ سانتیمتر با توجه به کوتاه بودن طول خم در فاصله ۵ سانتیمتری از ابتدای خم و در خم‌های با شعاع انحنای ۸۰ و ۱۲۰ سانتیمتر در فاصله ۱۰ سانتیمتری از ابتدای خم انجام گرفته است. با نزدیک شدن جریان به ابتدای خم، حداکثر سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود (شکل ۷).

جریان در رودخانه‌ها و مجاری باز در مسیر حرکت خود علاوه بر عبور از مسیرهای مستقیم ناچار به گذر از مسیرهایی با انحنای متفاوت است. وجود انحنا در مسیر جریان بر پیچیدگی رفتار جریان می‌افزاید و بررسی آن مورد توجه است قبل از ورود به خم، جریان موجود در رودخانه جریان طولی بوده و فاقد جریان عرضی می‌باشد. در این حالت پروفیل سرعت در راستای عرض رودخانه به گونه‌ای است که ماکزیمم مقدار سرعت در محور مرکزی رودخانه می‌باشد.

در راستای قائم نیز سرعت آب در نزدیکی کف بستر به دلیل مقاومت در مقابل جریان کمتر از سرعت در سطح آب می‌باشد. با ورود جریان به قوس رودخانه، ذراتی که در حال حرکت در خم هستند، علاوه بر نیروی ثقل تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز قرار گرفته که می‌خواهند آن‌ها را از مسیر مستقیم منحرف نماید. از آنجائی که توزیع سرعت در مقطع نامتقارن است، نیروی گریز از مرکز در عمق ثابت نبوده 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 برهم خوردن تعادل دینامیک در مقطع جریان می‌شود. جهت برقراری تعادل شیبی در سطح آب بوجود می‌آید که ناشی از عکس العمل نیروی گریز از مرکز می‌باشد. این نیرو بر ذرات آب اثر کرده و موجب می‌شود سطح آب در کنار جداره بیرونی بالا رفته و در مقابل، کاهش عمق در جداره داخلی اتفاق می‌افتد. شیب سطح آب را می‌توان با صرفنظر نمودن از مقاومت کف بستر و از طریق معادله تعادل نیروها به صورت رابطه (۱۶) می‌توان نوشت:

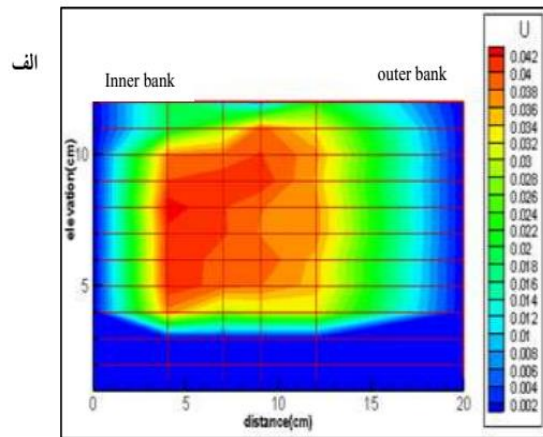


شکل ۷ پروفیل عرضی سرعت در ابتدای قوس اول

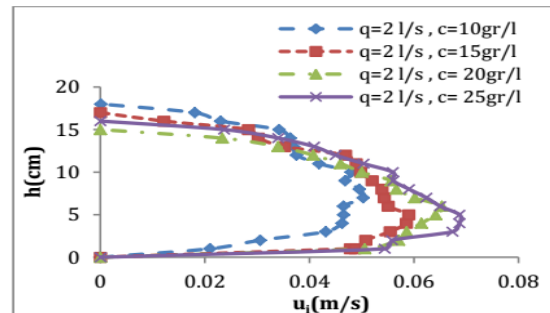
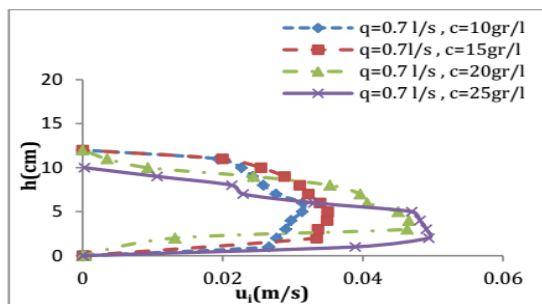


شکل ۸- پروفیل عرضی سرعت الف: در ابتدا، ب: در میانه و ج: در انتها قوس اول با دبی  $0.7/1$  لیتر بر ثانیه و غلظت  $15$  گرم بر لیتر

براساس نتایج بدست آمده در خم اول و مقطع عرضی دوم (میانه خم) حداکثر سرعت به سمت دیواره داخلی است. با ورود جریان به خم به علت تغییر ناگهانی انحنا و اثر نیروی گریز از مرکز در امتداد جداره داخلی کاهش فشار و در امتداد جداره بیرونی افزایش فشار روی می‌دهد. آزمایشات نشان داد که با حرکت جریان در طول خم، عمق جریان در امتداد دیواره داخلی کاهش و در امتداد دیواره بیرونی افزایش می‌یابد. در نزدیکی دیواره داخلی گرادیان فشار طولی منفی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات می‌گردد. در مقابل در نزدیکی دیواره بیرونی گرادیان فشار طولی مثبت بوده و فشار در امتداد جریان افزایش می‌یابد (شکل ۸). در تمامی شکل‌ها سرعت برحسب (m/s) می‌باشد و محور افقی فاصله نقاط از دیواره داخلی فلو (Distance(cm)) و محور قائم ارتفاع (Elevation(cm)) را نشان می‌دهد.



در یک دبی ثابت با افزایش غلظت، سرعت متوسط جریان در مسیر مستقیم و نیز سرعت در میانه‌ی خم‌ها افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به افزایش مؤلفه وزن سیال در اثر افزایش غلظت نسبت داد. همچنین در یک دبی ثابت با افزایش غلظت سرعت در میانه‌ی خم‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۹) در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در رأس خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد.



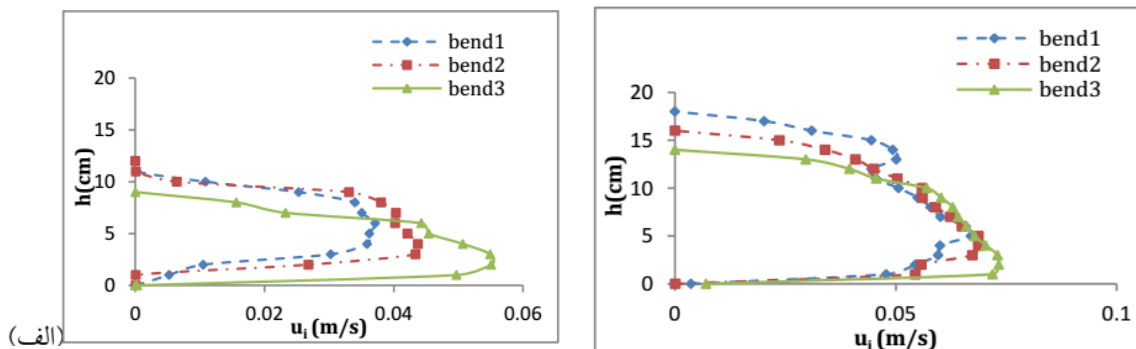
شکل ۹- پروفیل سرعت به ازاء افزایش غلظت در دبی  $0.7/1$  و  $2/1$  لیتر در ثانیه در میانه خم با نسبت شعاع انحنای  $14$

مقادیر سرعت متوسط جریان و عدد فرود دنسیمتریک جریان به به ازاء دبی‌های مختلف و غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر در جدول (۴) محاسبه گردیده است.

**جدول ۴- عدد فرود دنسیمتریک جریان به ازای دبی ۰/۷ در غلظت‌های مورد نظر**

شماره آزمایش در هر خم															
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
دبی جریان غلیظ (L/s)															
۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۱	۱	۱	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۲	۲	۲	۲
غلظت جریان غلیظ (g/L)															
۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
عدد فرود دنسیمتریک قوس اول (F <sub>d</sub> Bend1)															
۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۴
عدد فرود دنسیمتریک قوس دوم (F <sub>d</sub> Bend2)															
۰/۳	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۴	۰/۴	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۳۶
عدد فرود دنسیمتریک قوس سوم (F <sub>d</sub> Bend3)															
۰/۳۹	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۴۲

در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در میانه خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).



**شکل ۱۰- پروفیل طولی سرعت با  $R/B=2$ ،  $R/B=4$ ،  $R/B=6$  به ازای الف) دبی ۰/۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ۲۵ گرم بر لیتر ب) دبی ۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۲۵ گرم بر لیتر**

دبی ورودی جریان غلیظ، ابتدا فرم بستر شکل گرفته و سپس فرم بستری شروع به شسته شدن می‌کنند و زبری فرم بستر و تنش برشی آن کاهش می‌یابد. در این صورت نرخ افزایش سرعت از حدود ۲۲ درصد، در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه در قوس اول با شعاع انحنا ۲، به حدود ۳۴ درصد، در قوس دوم با شعاع انحنا ۴ و حدود ۷۲ درصد در قوس سوم با شعاع انحنا ۶ افزایش یافته است. نرخ افزایش سرعت در غلظت ۲۵ گرم بر لیتر نسبت به غلظت ۲۰ گرم بر لیتر با افزایش تنش برشی کاهش یافته است (از حدود ۳۴ درصد به ۱۵ درصد رسید است). بنابراین، بیشترین نرخ افزایش سرعت با حذف فرم‌های بستر و کاهش زبری و تنش برشی بستر رخ خواهد داد. بدین ترتیب افزایش غلظت سبب افزایش قدرت جریان می‌گردد، به طوری که در ابتدا، زبری و تنش

همچنین در خم سوم با نسبت شعاع انحنا ۶ به دلیل فاصله کم این خم تا محل تخلیه، جریان تحت تأثیر خروجی قرار می‌گیرد؛ در نتیجه افت تدریجی تراز آب و افزایش سرعت ناشی از آن را خواهیم داشت که این امر افزایش سرعت ناشی از کاهش نیروی گریز از مرکز را تشدید می‌کند. براساس نتایج به دست آمده سرعت در انتهای خم دوم نسبت به میانه خم اول به طور متوسط ۲۸ درصد و در میانه خم سوم نسبت به انتهای خم اول به طور متوسط ۴۴ درصد افزایش نشان می‌دهد.

بر روی بستر متحرک، افزایش دبی ورودی جریان غلیظ نیز باعث افزایش سرعت بدنه جریان می‌شود. با توجه به نتایج تغییرات ناشی از زبری فرم بستر با افزایش دبی جریان غلیظ ورودی بر نرخ افزایش سرعت مؤثر است. به عنوان مثال در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر با افزایش

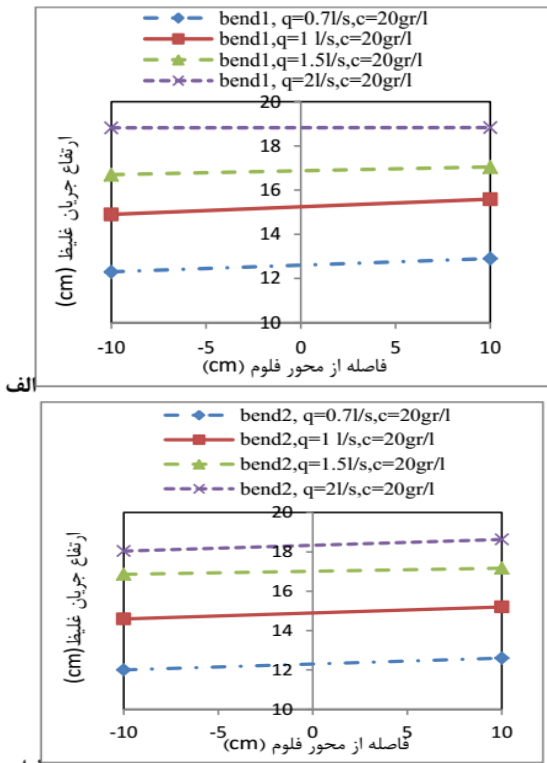
$$\Delta h = \frac{U^2}{g'} \left( 10.9531 - 1.64Fr_d - 0.449 \ln \left( \frac{r_m}{b} \right) - 8.8 \ln \left( \frac{k_s}{b} \right) \right) \quad (18)$$

به منظور تعیین میزان اهمیت هر یک از متغیرهای وابسته موجود در رابطه استخراج شده از رابطه (۱۹) جهت آنالیز حساسیت استفاده شد. این روش تاثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده‌های ورودی مورد بررسی قرار می‌دهد.

$$S_a = \frac{100 \sum_{i=1}^N \frac{(X_{ni} - X_{ci})}{X_{ci}}}{\Delta} \quad (19)$$

در رابطه فوق، N تعداد نمونه‌ها،  $X_{ni}$  مقدار جدید پارامتر خروجی نقطه نام با تغییر در پارامتر ورودی،  $X_{ci}$  مقدار پارامتر خروجی نقطه نام به-عنوان کنترل در شبیه سازی (مشاهده‌ای)،  $\Delta$  مقدار قدر مطلق تغییر در پارامتر ورودی که بر حسب درصد بیان می‌شود و  $S_a$  شاخص حساسیت بر حسب درصد می‌باشد.

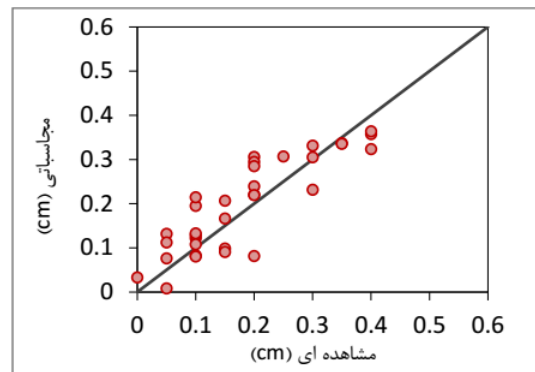
نتایج نشان داد به ازای کاهش ۵۰ درصد زبری نسبی و افزایش ۵۰ درصد شعاع انحنا نسبی، اختلاف ارتفاع جداره بیرونی و جداره داخلی بترتیب ۱/۴۷ درصد افزایش و ۰/۳۷ درصد کاهش می‌یابد. ۵۰ درصد کاهش و افزایش فروددندسیمتریک تاثیر حدود ۰/۴ درصد در میزان اختلاف ارتفاع جداره بیرونی و جداره داخلی را نشان می‌دهد. در تمامی آزمایشات، ارتفاع جریان غلیظ در دیواره بیرونی بیشتر از دیواره داخلی قوس است این موضوع در قوس دوم و سوم نیز صادق است؛ اگرچه با افزایش شعاع قوس اختلاف ارتفاع کاهش می‌یابد شکل (۱۲).



برشی بستر افزایش یافته و در ادامه مجدداً با حذف فرم‌های بستر کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج نشان داده شده در تمامی مسیرها با افزایش دبی، سرعت جریان غلیظ افزایش می‌یابد اما موقعیت سرعت ماکزیمم در جریان غلیظ با بستر فرسایشی بدلیل تنش برشی ایجاد شده بین بستر و بدنه جریان غلیظ، به سمت بالا حرکت کرده به عبارت دیگر سرعت ماکزیمم جریان غلیظ در فاصله بیشتری از بستر رخ می‌دهد.

با افزایش دبی، ارتفاع جریان غلیظ در دیواره بیرونی و دیواره داخلی افزایش می‌یابد. با افزایش شعاع انحنا قوس شیب اختلاف ارتفاع تراز جریان در دیواره بیرونی و داخلی روند کاهشی را نشان می‌دهد. در قوس سوم با شعاع انحنا نسبی ۶ تراز آب تقریباً به حالت افقی درمی‌آید؛ بطوریکه اختلاف ارتفاع در دبی‌های ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر در ثانیه نزدیک به صفر می‌باشد. 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 شیب هیدرولیکی ناحیه خروجی منجر به افزایش سرعت طولی شده و این امر در کاهش شیب سطح آب و اختلاف ارتفاع نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند. در شکل (۱۱) مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی برای هر قوس با شعاع انحنا نسبی ۲، ۴ و ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر پیش بینی شده و مقادیر مشاهده‌ای اختلاف تراز آب در جداره داخلی و بیرونی خم

قوس اول با خطای متوسط ۷/۵ درصد کمترین خطا و قوس سوم با خطای متوسط ۶۰ 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 خم سوم شده است. با استفاده از ۹۰ درصد داده‌ها و با کمک نرم افزار SPSS بهترین رابطه با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره بدست آمد. رابطه لگاریتمی با ضریب همبستگی ۶۷٪ رابطه مناسبی برای تخمین اختلاف ارتفاع دیواره بیرونی و داخلی خم می‌باشد.



محاسبه اختلاف ارتفاع با استفاده از رابطه (۲۰) حدوداً ۳۸ صد می‌باشد.

### پیشنهادها

نتایج نشان داد تاثیر زبری بستر نقش بسزایی در تعیین پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ در قوس‌های دارد لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی پارامتر زبری نیز به عنوان یک متغییر لحاظ گردد.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط دانشگاه شهید چمران اهواز تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

طراحی، ایده‌پردازی، روش‌شناسی، تحلیل داده‌ها و نگارش نهایی: مرضیه محمدی؛

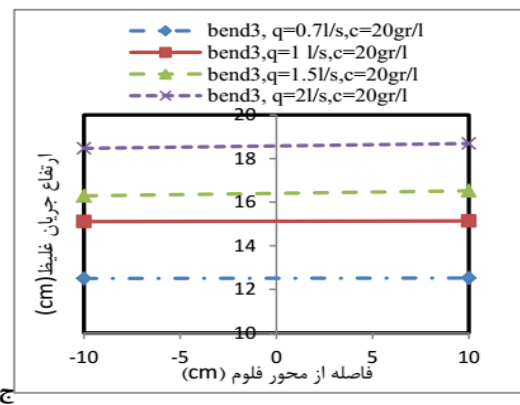
نظارت: دکتر مهدی قمشی.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### References

1. Ellison, T.H. and J.S. Turner, 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 6(3): 423–448.
2. Mohammad hossein Omid, A.R.H., 1387. *Fluvial Processes*. Tehran University. [In Persian].
3. Julien, P.Y. and J. Tuzson, 2003. *River Mechanics*. *Appl. Mech. Rev.*, 56(2): B30–B31.
4. Beirami, M.K., 1382. *Water Conveyance Structures*. Isfahan University of Technology. [In Persian].
5. Sharifnezhad, a., S.M. Kashefipour and M. GHOMESHI, 2019. Experimental Analysis on the Water Entrainment of Turbidity Current over a Mobile Bed. *Journal of Water and Soil Science*, 23(1): 279–291.
6. Nicholson, M. and M.R. Flynn, 2015. Gravity current flow over sinusoidal topography in a two-layer ambient. *Physics of Fluids*, 27(9): 096603.
7. Xu, J.P., O.E. Sequeiros and M.A. Noble, 2014. Sediment concentrations, flow conditions, and downstream evolution of



شکل ۱۲- اختلاف تراز آب بین دیواره داخلی و بیرونی بازای غلظت ۲۰ گرم در لیتر در دبی‌های مختلف الف) در قوس اول ب) - در قوس دوم ج) - در قوس سوم

به منظور ارزیابی دقت رابطه استخراج شده از معادله آماری زیر استفاده شده است. شایان ذکر است هرچه مقدار  $R^2$  به ۱ و مقادیر محاسبه شده برای  $\%E$ ،  $SSE$  و  $RMSE$  به صفر نزدیکتر باشد، دقت روابط در پیش بینی پارامتر مورد نظر بالاتر می‌باشد.

$$\%E = \frac{\sum_{i=1}^N |X_{mi} - X_{pi}|}{\sum_{i=1}^N X_{mi}} \times 100 \quad (20)$$

در رابطه فوق  $X_p$ ، مقادیر برآورد شده توسط رابطه و  $X_m$ ، مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه و  $N$ ، تعداد داده‌ها می‌باشد. متوسط خطای

two turbidity currents, Monterey Canyon, USA. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 89: 11–34.

8. Chamoun, S., G. De Cesare and A.J. Schleiss, 2017. Management of turbidity current venting in reservoirs under different bed slopes. *Journal of Environmental Management*, 204: 519–530.
9. Weill, P., E. Lajeunesse, O. Devauchelle, F. Métiver, A. Limare, B. Chauveau and D. Mouazé, 2014. Experimental investigation on self-channelized erosive gravity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 84(6): 487–498.
10. Wang, Z., J. Xia, S. Deng, J. Zhang and T. Li, 2017. One-dimensional morphodynamic model coupling open-channel flow and turbidity current in reservoir. 68–79.
11. Koller, D., R. Manica, A. De Oliveira Borges and J. Fedele, 2019. Experimental bedforms by saline density currents. *Brazilian Journal of Geology*, 49(2).
12. Moossavi-Hekmati, M.R. and M. Najafi,

2018. Lateral growth of three-dimensional turbidity current for supercritical initial conditions. *Tehnicki Vjesnik*, 25(3): 727–737.
13. Salinas, J.S., M.I. Cantero, M. Shringarpure and S. Balachandar, 2019. Properties of the Body of a Turbidity Current at Near-Normal Conditions: 1. Effect of Bed Slope. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11): 7989–8016.
  14. Sequeiros, O.E., B. Spinewine, R.T. Beaubouef, T. Sun, M.H. García and G. Parker, 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.
  15. Abad, J.D., O.E. Sequeiros, B. Spinewine, C. Pirmez, M.H. Garcia and G. Parker, 2011. Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory. *Journal of Sedimentary Research*, 81(11–12): 787–813.
  16. Xu, J.P., 2010. Normalized velocity profiles of field-measured turbidity currents. *Geology*, 38(6): 563–566.
  17. Sequeiros, O.E., 2012. Estimating turbidity current conditions from channel morphology: A Froude number approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C4):.
  18. Rastello, M., C. Ancey, F. Ousset, R. Magnard and E.J. Hopfinger, 2002. An experimental study of particle-driven gravity currents on steep slopes with entrainment of particles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(3/4): 181–185.
  19. Chow, ven te, 1959. open-channel hydraulics. McGraw-Hill New York.

