

Research Paper

Experimental Investigation of the Cubic, Cylindrical, and Pile-shaped Obstacles on the Motion and Control of the Body of Saline Density Current

Mohammad Reza Mansoujian¹, Mehdi Ghomeshi*², Houshang Hasounizadeh³, Seyed Abbas Hosseini⁴

1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Professor, Ph.D., Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz Golestan Blvd, Ahvaz, Iran

3. Ph.D. CE, Water Management Adviser of KWPA, Ahvaz, Iran

4. Assistance professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2021/08/22

Revised: 2021/09/23

Accepted: 2022/01/09

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2023.5842

Keywords:

Density current, Body of density current, Cubic obstacles, Cylindrical obstacles, Saline density current.

Abstract

Introduction: The use of obstacles in dam reservoirs is considered an effective method for directing sedimentation toward the middle of the reservoir (instead of sedimentation next to the dam wall where the facilities are located). In the present study, to control the saline density current, the effect of cylindrical, cubic, and pile-shaped obstacles on the characteristics and motion of the body of the density is experimentally investigated.

Methods: In this regard, 323 cylindrical obstacles with a diameter of 1 cm and a height of 30 cm, were placed on the bed of a Plexiglas in a channel with a length of 12.5 m, a width of 30 cm, and a height of 40 cm in a zigzag form along with the same number of cubic obstacles with dimensions of 1.1 cm and a height of 30 cm in the next step. The experiments were performed with three flow rates (0.27, 0.55, and 0.83 liters per second), three slopes (0.2, 0.5, and 1%), and constant concentration (15 g/l).

Findings: The results showed that the use of obstacles reduces the height of the body of density current along the channel. The height of the body in cubic obstacles is more than cylindrical obstacles. The use of obstacles affects the velocity profiles and reduces the velocity of the body of the density current. The flow rate of the body of density current in a bed without obstacles has an increasing trend while it has a decreasing trend in the bed with obstacles. Therefore, the reduction of flow rate in cubic obstacles was 1.5 to 2 times compared to the cylindrical obstacles. As a result, flow rate control in cubic obstacles was greater. Also, by moving along the channel, the reduction of the concentration of body of the density current in cubic and cylindrical obstacles was 49% and 41%, respectively, compared to the bed without obstacle.

Citation: Mansoujian MR, Ghomeshi M, Hasounizadeh H, Hosseini SA. Experimental Investigation of the Cubic, Cylindrical, and Pile-shaped Obstacles on the Motion and Control of the Body of Saline Density Current. Water Resources Engineering Journal. 2023; 16(56): 31-52.

*Corresponding author: Mehdi Ghomeshi

Address: Dept. of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz. Golestan Blvd, Ahvaz, Iran

Tell: +989166166372

Email: ghomeshi@scu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The moving density current, which is mostly generated during floodwater, submerges beneath the reservoir water due to producing erosion in the bed section at the point that the river meets the dam reservoir, and after drawing close to the dam's body creates sedimentation in this region. The use of obstacle can be employed as an effective method to control the sedimentation at the reservoir, especially in the middle of the reservoir, and to inhibit sediments from reaching and precipitating at the dam's key points. This phenomenon has attracted researchers' attention in recent years. Regarding the importance of the density current phenomenon in the motion of sediments in reservoirs, the present research experimentally investigated the effect of degree and the effect of mechanism of cylindrical and cubic-shaped obstacles on the characteristics and motion of the body of the density current in reservoirs of dams.

Materials and Methods

In this regard, 323 cylindrical obstacles with a diameter of 1 cm and a height of 30 cm were placed on the bed of a Plexiglas in a channel with a length of 12.5 m, a wide of 30 cm, and a height of 40 cm in a zigzag form, along with the same number of cubic obstacles with dimensions of 1.1 cm and a height of 30 cm in the next step. The experiments were conducted with three flow rates (0.27, 0.55, and 0.83 liters per second), three slopes (0.2, 0.5, and 1%), and a constant concentration (15 g/l). Three siphons were used to measure the concentration of different sections of density current along the channel. The siphons were designed and selected in a way that, along with 14 tubes to collect samples from density fluid, covered the entire height of the head and the body of the current. The longitudinal and transverse distance of obstacles from each other was selected as dimensionless, being 3 times higher than that of the dimension (3D) of the obstacles, and 3 cm.

To measure the velocity profile of the body of density current, the electromagnetic flow

meter device was used at two stations 2.85 and 4.25 m away from the inlet valve and at the central line of the channel.

Findings

Compared to the bed without obstacle, the results showed that the height of the body of density current along the channel pass-way remained slightly constant. The installation of both obstacles resulted in a decreasing trend in the height of body. Increasing the slope parameter of the channel reduced the height of the body, and increased the velocity of the body of the density current either with or without obstacles. The results of the present research also revealed that the use of obstacles was effective on velocity profiles, and caused a decrease in the velocity of the body of the density current. The measurements showed that the presence of obstacles increased the height of the maximum velocity location, in comparison to the channel bottom. The height of the maximum velocity location in cubic-shaped obstacles was higher than that in cylindrical-shaped obstacles. A reduction in the concentration of body caused by the motion of the density current along the channel in cubic-shaped obstacles was higher (around 9%) than that in cylindrical-shaped obstacles with the same concentration, slope of bed, and inlet discharge rate of the density current. For all beds either with or without obstacles, the reduction rate of the body concentration and the reduction percentage amount of the passing discharge rate of the body of the density current along flume were reduced following an increase in the slope of the channel bed.

Discussion

According to the findings of this research, the height of the body of the saline density current in all experiments was higher than that in cylindrical-shaped obstacles in the bed with cubic-shaped obstacles.

Owing to larger characteristics of the area of wake behind cubic-shaped obstacles, the measured velocities were always higher than those behind cylindrical-shaped obstacles. In the bed without obstacles, the total passing discharge rate of the body of

the density current was increased approximately 5% to 7%, in comparison to the regulated outlet discharge rate from the pump. But, at the bed with obstacle, it was in contrary, and the total discharge rate of body had decreasing trend between two sections, as at the bed with cylindrical shaped obstacles, the decreasing area was between 5% to 16%, whereas with cubic shaped obstacles being more effective, and the decreasing area was shown to be between 11% to 30%. The results of controlling the concentration of the body of current showed that the concentration of the body of the density current along bed had a decreasing trend either with or without obstacles. The presence of obstacles caused a decrease in velocity, when compared to the bed without obstacles. This decrease was accompanied by an increase in the Richardson number, and Ri in cubic-shaped obstacles was always lower than that in cylindrical-shaped obstacles. For all experiments, the results of the Froude number indicated a subcritical current.

Conclusion

Reduction in the total passing discharge rate of body from cubic shaped obstacles, compared to cylindrical shaped obstacles with the same concentration, slope of bed, and inlet discharge rate of density current, at the installation place of obstacles was around 1.5 to 2 times, and consequently, the achieved control of discharge rate of body of density current at cubic shaped obstacles was higher than cylindrical ones. Decreasing changes in the body concentration in the bed with obstacles was higher than those in the bed without obstacles. This reduction in the bed without obstacles was approximately 6.5%, while it was 49 and 41% in the bed with cubic- and cylindrical-shaped obstacles, respectively. The results indicated that the presence of obstacles caused a reduction in velocity, compared to the bed without obstacles. This reduction was accompanied by an increase in the Richardson number, and Ri in cubic-shaped obstacles was always lower than that in cylindrical-shaped obstacles. For all experiments, the results of

the Froude number indicated a subcritical current.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

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

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Mohammad Reza Mansoujian, Mehdi Ghomeshi.

Methodology and data analysis: Mohammad Reza Mansoujian, Mehdi Ghomeshi, Houshang Hasounizadeh, Seyed Abbas Hosseini.

Supervision and final writing: Mohammad Reza Mansoujian, Mehdi Ghomeshi.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع مکعبی و استوانه ای میله ای شکل بر حرکت و کنترل بدنه جریان غلیظ نمکی

محمد رضا منسوجیان^۱، مهدی قمشی^{۲*}، هوشنگ حسونی زاده^۳، سید عباس حسینی^۴

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

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

۳. استادیار دانشکده عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر، اهواز، ایران

۴. استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

مقدمه: استفاده از مانع در مخازن سدها بعنوان یک روش مؤثر در هدایت رسوب گذاری در میانه مخزن (بجای رسوبگذاری در کنار دیواره‌ی سد که تأسیسات در آن مکان قرار دارند) مطرح می‌باشد. در این تحقیق بمنظور کنترل جریان غلیظ نمکی، تأثیر موانع استوانه ای و مکعبی میله‌ای شکل بر مشخصات و حرکت بدنه جریان بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش: تعداد ۳۲۳ مانع استوانه ای شکل به قطر یک سانتیمتر و ارتفاع سی سانتیمتر و در مرحله بعد همین تعداد مانع مکعبی شکل با ابعاد ۱×۱ سانتیمتر و ارتفاع سی سانتیمتر با آرایش زیگزاگی بر روی بستر پلکسی در کانالی به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر قرار داده شد. آزمایشها با سه دبی (۰/۲۷، ۰/۵۵ و ۰/۸۳ لیتر در ثانیه) و سه شیب (۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد) و غلظت ثابت (۱۵ گرم در لیتر)، انجام شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل نشان داد که به کار بردن موانع باعث کاهش ارتفاع بدنه جریان غلیظ در طول کانال می‌شود. ارتفاع بدنه در موانع مکعبی بیش از استوانه ای می‌باشد. بکارگیری موانع بر پروفیل‌های سرعت تأثیرگذار بوده و باعث کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ شده اند. دبی عبوری بدنه جریان غلیظ در بستر بدون مانع دارای روند افزایشی و در بسترهای با مانع دارای روند کاهشی می‌باشد. به نحوی که درصد کاهش دبی در موانع مکعبی ۱/۵ تا ۲ برابر نسبت به موانع استوانه‌ای است.

نتیجه‌گیری: با حرکت در طول کانال میزان کاهش غلظت بدنه جریان غلیظ برای موانع مکعبی و استوانه ای به ترتیب ۴۹٪ و ۴۱٪ نسبت به بستر بدون مانع حاصل شد. همچنین در موانع مکعبی میزان کنترل دبی بیشتر از موانع استوانه ای، بوده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

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



DOI:

10.30495/wej.2023.5842

واژه‌های کلیدی:

جریان غلیظ، بدنه جریان غلیظ، موانع مکعبی شکل، موانع استوانه‌ای شکل، جریان غلیظ نمکی.

* نویسنده مسئول: مهدی قمشی

نشانی: گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۶۶۱۶۶۳۷۲

پست الکترونیکی: ghomeshi@scu.ac.ir

مقدمه

رسوبی در بیش از نود درصد خروجی‌ها مشابه هم بوده و جریان‌های رسوبی دارای دامنه کاربرد بسیار خاص و محدود و همچنین بعثت تفاوت در اندازه و ضریب شکل و وزن مخصوص و جنس و ذرات، از تنوع زیاد برخوردار بوده که بعثت رسوبگذاری یا آبستتگی در مسیر غیر پایستار نیز می‌شوند، لذا همانند اکثر محققینی که بر جریان‌های غلیظ تمرکز کرده اند و اغلب با جریان‌های غلیظ نمکی تحقیقات را انجام داده اند تا کارها قابل مقایسه باشند، در تحقیق حاضر نیز از جریان غلیظ نمکی استفاده گردیده است. نتایج کار با جریان نمکی و گرفتن نتایج کاهش غلظت و یا کاهش شدید سرعت در عمل و طبیعت واقعی ما را به منطقه رسوبگذار جریان رسوبی هدایت می‌کند.

با توجه به اینکه جریانهای غلیظ به سه صورت روگذر و زیرگذر و میان جریان ممکن است وجود داشته باشند، اگر جرم مخصوص سیال ورودی بیشتر از جرم مخصوص توده سیال ساکن در مخزن باشد، جریان‌های غلیظ تحتانی (زیرگذر) به وجود می‌آیند (شکل ۱). در این تحقیق جریان غلیظ نمکی و از نوع زیرگذر مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲). مطابق شکل (۱) بعد از رأس^۱ جریان غلیظ ناحیه بدنه^۲ قرار دارد که نیروی محرک آن، نیروی ثقل مؤثر بر سیال سنگین تر می‌باشد.

سرعت متوسط بدنه جریان همیشه بزرگتر از سرعت رأس است و این اختلاف با افزایش شیب کف، بزرگتر می‌شود (۱۲). جریان در بدنه جریان غلیظ به صورت یک لایه جریان در کف و یک لایه مختلط در بالای آن می‌باشد که در اثر ورود آب شفاف در آن رقیق تر گردیده است (شکل ۲). ایجاد مانع می‌تواند بعنوان یک روش مؤثر کنترل رسوبگذاری در مخزن، بخصوص در میانه مخزن و جلوگیری از رسیدن و ته نشین شدن رسوبات در نقاط کلیدی سدها باشد و در سالهای اخیر این پدیده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۱۳) (۱۴).

در مواقعی که مانعی در مسیر جریان آب قرار می‌گیرد با رسیدن ذره سیال به لبه ابتدایی مانع، فشار ذره سیال از فشار اولیه تا حد فشار دینامیک در نقطه سکون افزایش می‌یابد. لایه مرزی در طرفین جسم در اثر فشار بالای سیال در مجاورت لبه‌های جسم تشکیل و رشد می‌یابد. سپس پدیده جدایی خطوط جریان^۳ در پایین دست موانع رخ داده که باعث ایجاد دنباله^۴ و گردابه^۵ می‌شوند (شکل‌های ۳ و ۴). (۱۵). اوهمی (۲۰۰۳) توسط آزمایش‌های فیزیکی و شبیه سازی عددی تأثیر موانع بر جریان غلیظ بمنظور کنترل رسوبگذاری در مخازن را مدل نمود و در مطالعه موردی، امکان تأثیر بر جریان کدر با سدهای مستغرق را با مدل‌های عددی مورد تحقیق قرار داد. نتایج نشان داد که در نتیجه تأثیر بلوک سد، رسوب‌ها به طور ناحیه ای نگهداری و ته نشین می‌شوند و بدین طریق تخلیه کننده و آبگیر محافظت می‌شوند و همچنین نتیجه گرفتند که احداث مانع در جریان زیر بحرانی برای کنترل جریان مفید می‌باشد (۱۶).

با توجه به مقادیر قابل ملاحظه رسوبگذاری در مخازن سدها و کاهش حجم مفید مخزن و آسیب رسانی به سازه‌های جانبی از جمله آبگیرها، توربین‌ها و دریچه‌ها و کاهش کیفیت آب و نهایتاً کاهش عمر مفید سدها، مطالعه در خصوص عوامل مؤثر در پدیده رسوبگذاری و کاهش و یا کنترل عوامل دخیل در این پدیده امری اجتناب ناپذیر می‌باشد (۱). (۲). پدیده رسوبگذاری در مخازن سدها، به طور معمول یک درصد از حجم ذخیره آنها را در سال کاهش می‌دهد (۳).

جریان غلیظ که غالباً در هنگام سیلاب بوجود می‌آید در حین حرکت با ایجاد فرسایش در بخش بستر در محل برخورد رودخانه به مخزن سد به زیر آب مخزن فرو رفته و پس از رسیدن به نزدیکی بدنه سد باعث ایجاد رسوب در این منطقه می‌شود. (۴) چنانچه شیب کف زیاد باشد (بالتر از ۰/۰۱) و یا عرض آن کم باشد به حرکت خود ادامه می‌دهد (۵). به طور کلی می‌توان جریان‌های غلیظ ناشی از ورود یک سیال با چگالی معین در یک توده سیال نسبتاً ساکن با دانسیته متفاوت را، ناشی از تأثیر شتاب ثقل بر روی تفاوت جرم مخصوص بیان نمود (۶). در این حالت نیروی ثقل به نسبت $\Delta\rho/\rho_a$ کاهش می‌یابد. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \quad (1)$$

که ρ_a : دانسیته سیال پیرامون، ρ_t : دانسیته سیال غلیظ و ρ_w : دانسیته آب است (۶). تفاوت در چگالی ممکن است ناشی از مواد معلق، مواد محلول، دما و یا ترکیبی از آنها باشد (۷). در این حالت سیال وارد شونده به درون سیال دیگر را سیال غلیظ (Dense Fluid) و سیال پذیرنده را سیال پیرامون (Ambient Fluid) می‌نامند (۸).

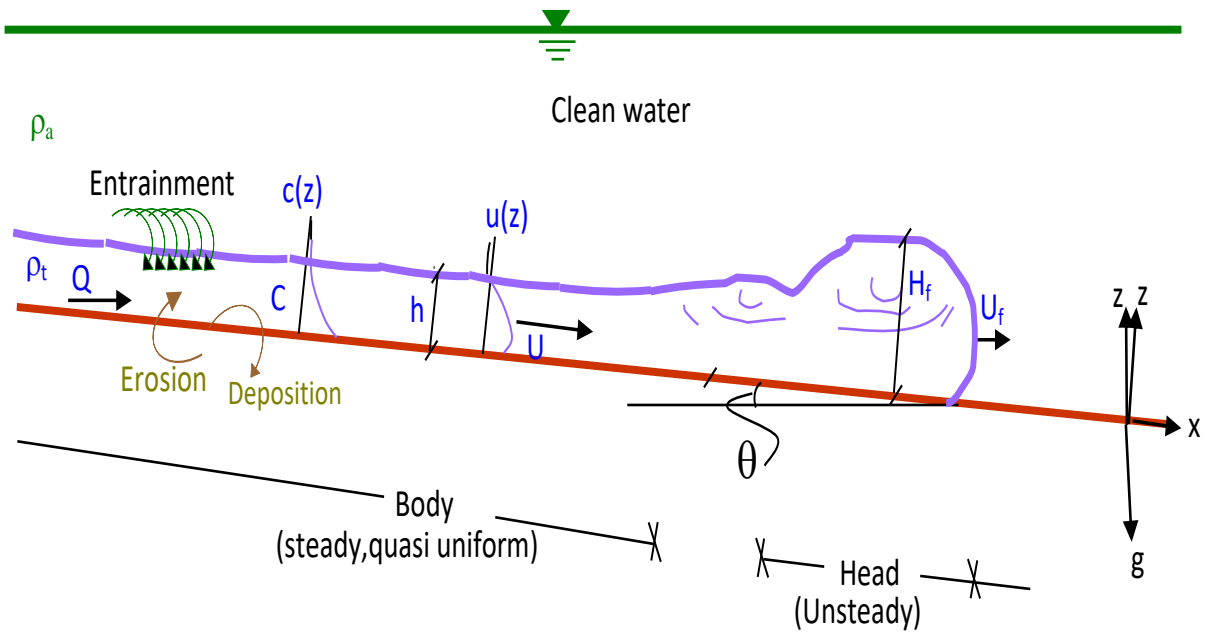
نمونه‌های طبیعی ناشی از جریان غلیظ به وفور یافت می‌شوند. از جمله حرکات بزرگ مقیاس هوای سرد، حرکت و پیشروی جبهه مه آلود، سقوط بهمین، ابرهای رولی و حرکت جریان مذاب ناشی از فعالیت آتش فشان در زیر آب دریا را می‌توان از نمونه‌های جریان غلیظ طبیعی دانست (۹).

جریان‌های غلیظ مصنوعی که در نتیجه فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شوند همانند پخش مواد نفتی در دریاها، انتشار فاضلاب در یک کانال، حرکت و پخش گازهای تولید شده از واحدهای صنعتی و حرکت گازهای سمی در معادن از این دسته می‌باشند (۱۰).

جریان‌های غلیظ به دو دسته جریان‌های غلیظ پایدار (مانند جریان غلیظ نمکی) و جریان‌های غلیظ ناپایدار (مانند جریان غلیظ رسوبی) نیز تقسیم بندی می‌شوند (۱۱). با توجه به اینکه جریان‌های غلیظ نمکی و

4Wake
5Vortex

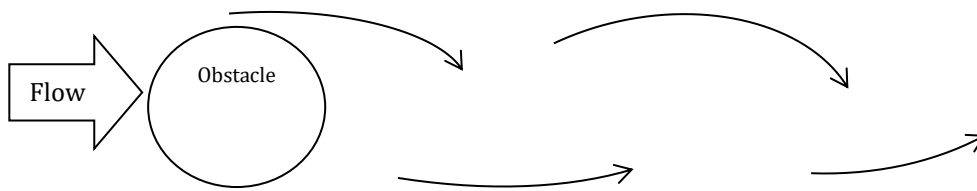
1Head
2Body
3Separation



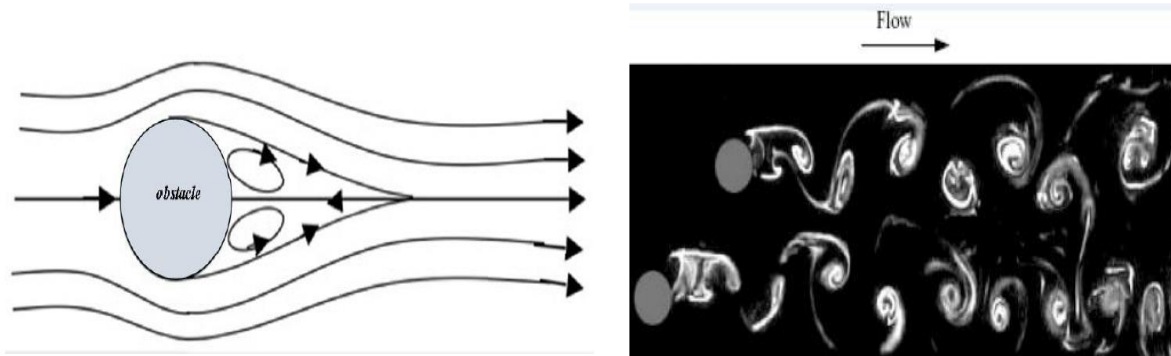
شکل ۱- شماتیکی از جریان غلیظ و حرکت آن (۱۷)



شکل ۲- شرایط قرار گیری لایه‌های با غلظت متفاوت در بدنه و جزئیات آن



شکل ۳- شماتیک شکل گردابه در یک سمت موانع



شکل ۴- ناحیه گردابه (Wake) و آشفته‌گی‌های حاصل از آن

می‌باشد. همچنین با افزایش ارتفاع موانع شار رسوب عبوری کاهش یافته و بنابراین باعث رسوبگذاری بیشتر در ناحیه بالادست موانع می‌شود (۲۱). درخشان نیا و همکاران (۲۰۲۱) بصورت آزمایشگاهی به مطالعه اثر موانع نفوذپذیر بر شار هد جریان غلیظ نمکی پرداختند. در این تحقیق از مانعی متخلخل به شکل دوزنقه ای که با ذرات شن پر شده بود استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با تغییر در دبی ورودی و شیب فلوم و ارتفاع موانع، رفتار جریان غلیظ تغییر خواهد نمود بطوریکه افزایش شیب و دبی ورودی باعث افزایش سرعت رأس و در نتیجه کاهش کارایی موانع بکار رفته شده است (۲۲).

در بررسی مطالعات صورت گرفته در خصوص تأثیر مانع بر مشخصات هیدرولیکی جریان غلیظ، غالباً محدود به تک مانع با عرضی معادل تمام عرض کانال بوده اند و تحقیقات منسجمی در خصوص بررسی اثر موانع در کاهش عبور جریان غلیظ (راندمان موانع) میله‌ای مکعبی و استوانه‌ای شکل که در طول کانال بصورت کاملاً مستغرق، با تعداد زیاد و ارتفاعی بیش از ارتفاع جریان غلیظ قرار داده شده باشند، خصوصاً در قسمت بدنه جریان غلیظ مشاهده نگردید. بنابراین با توجه به اهمیت پدیده جریان غلیظ در حرکت رسوبات در مخازن سدها، در تحقیق حاضر به بررسی میزان اثر و نحوه تأثیر موانع میله‌ای شکل بر مشخصات بدنه جریان غلیظ در مخازن سدها (همانند شمع کوبی در مخزن و تخلیه رسوبات با روشهایی مثل پمپاژ در محدوده کارگذاری شده)، پرداخته شده است. در جریانهای غلیظ بدلیل اهمیت اثر نیروی ثقل به نیروی اینرسی عدد ریچاردسون و همچنین عدد فرود که عکس عدد ریچاردسون می‌باشد، به صورت زیر بیان می‌شوند:

همچنین مطالعات اوهی و اشلایس (۲۰۰۷) درخصوص بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع مشبک و غیرمشبک نشان داد که راندمان تله اندازی در موانع غیرمشبک قابل ملاحظه بوده و پروفیل‌های غلظت و سرعت در حین عبور از این موانع تغییر می‌یابد. همچنین در این نوع موانع ارتفاع بهینه، ارتفاعی است که بیشترین ظرفیت را در بالادست ایجاد کند (۱۸). سکیوریس و همکاران (۲۰۱۰) آزمایشهایی با دو نوع جریان غلیظ نمکی، رسوبی و همچنین ترکیبی آنها بر روی بسترهای متحرک با چند نوع دانه بندی انجام دادند. نتایج آزمایشها نشان داد که با توجه به نوع رژیم جریان، شکل بستر تشکیل شده تأثیر زیادی بر پروفیل‌های سرعت داشته و می‌تواند سبب بالا رفتن محل تشکیل ماکزیمم سرعت شود (۱۹). اصغری پری و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر تک مانع با ارتفاع متغییر را بمنظور کنترل جریانهای غلیظ زیر بحرانی و فوق بحرانی، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که برای مهار کامل جریان غلیظ به ازاء هر شیب احتیاج به یک ارتفاع مانع مشخص می‌باشد (۱۲).

نیکخواه و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی نحوه تأثیر کارگذاری مانع‌های متوالی یکپارچه بر روی مشخصات و کنترل بدنه جریان غلیظ بصورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج نشان داد که به کارگیری این نوع از موانع متوالی بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت دارای تأثیر بوده و در کنترل دبی بدنه جریان غلیظ تحت شرایط ورود متفاوت می‌تواند اثرگذار باشد (۲۰). فرزین و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر اثرات ارتفاع مانع و غلظت رسوب ورودی بر رفتار جریانهای غلیظ را بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشها نشان داد که در غلظت‌های ورودی کم شار رسوبات در طول کانال تقریباً صفر بوده و از ارتفاع مانع مستقل

و تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است. جهت تأمین آب مورد نیاز آزمایش‌ها از سیستم آب شهری و لوله کشی‌های آزمایشگاه و نصب دو پمپ جهت تسریع فرآیند آگیری فلوم استفاده شد. جهت ایجاد سیال غلیظ از محلول آب و نمک استفاده گردید.

آب و نمک در چهار مخزن متصل به فلوم مخلوط شده سپس برای آنکه حرکت آن در آب شفاف مشخص باشد، مقداری ماده رنگی به مخلوط اضافه می‌شد. سیال غلیظ توسط پمپ اصلی فلوم با استفاده از خط لوله ای به مخزن پشت دریچه‌ی جدا کننده ماده غلیظ و آب شفاف پیرامونی، با دبی ثابت، منتقل گشته و پس از هم‌تراز شدن سطح سیال غلیظ پشت دریچه و آب شفاف درون فلوم، دریچه کشویی به صورت ناگهانی باز می‌شد.

ارتفاع بازشدگی دریچه با توجه به رسیدن به یک جریان بدون تلاطم و موج، ۵ سانتی‌متر انتخاب شده و تا آخر آزمایش ثابت باقی می‌ماند. با باز شدن ناگهانی دریچه، جریان غلیظ به درون آب شفاف حرکت می‌کرد. برای جلوگیری از تلاطم‌های ناشی از ورود جریان غلیظ، در ابتدای فلوم از یک صفحه نگهداری جریان استفاده شد.

مجموعاً ۲۷ آزمایش با سه شیب ۱٪، ۵٪، ۲٪ و سه دبی ۰/۸۳، ۰/۵۵، ۰/۲۷ لیتر بر ثانیه و غلظت ثابت ۱۵ گرم در لیتر، انجام شد. در یک شیب و غلظت مشخص سه آزمایش با دبی‌های متفاوت بدون حضور موانع (آزمایش‌های شاهد)، سه آزمایش با همین مشخصات با حضور موانع استوانه‌ای و سه آزمایش دیگر با همین مشخصات با حضور موانع مکعبی شکل، انجام پذیرفت. سپس شیب فلوم تغییر داده شده و آزمایش‌های فوق تکرار گردیده است. انتخاب شیب با توجه به عدد فرود دنسی‌متریک (رابطه ۳) به نحوی بوده است که جریان غلیظ در حالت زیربحرانی قرار داشته باشد. برای تنظیم دبی جریان غلیظ ورودی از دبی سنج الکترومغناطیس استفاده شد. مطابق شکل (۵) بمنظور جلوگیری از تأثیر تلاطم ناشی از ورود جریان در نزدیکی دریچه و توسعه و شکل گرفتن کامل جریان غلیظ موانع از فاصله ۲/۵ متری از دریچه شروع و تا فاصله ۴/۷۰ متری از دریچه ادامه پیدا کردند. از سه سیفون جهت اندازه گیری غلظت بخش‌های مختلف جریان غلیظ در طول کانال استفاده گردید. سیفون‌ها مطابق شکل شماره (۸) طوری انتخاب گردیدند که با تعداد ۱۴ لوله جهت نمونه گیری از سیال غلیظ تمام ارتفاع هد و بدنه جریان را پوشش می‌دهند. فواصل بین سیفون‌ها و مقاطع اندازه گیری حدود ۱/۱۰ متر انتخاب گردید بطوریکه سیفون اول دقیقاً در ابتدای موانع و سیفون سوم دقیقاً بعد از موانع مستقر گردید.

در تحقیق حاضر برای ساخت بستر مانع دار از تعداد ۳۲۳ مانع استوانه ای شکل به قطر یک سانتیمتر و ارتفاع سی سانتیمتر (جهت پوشش دادن کامل ارتفاع جریان غلیظ) و در مرحله بعد همین تعداد مانع مکعبی شکل، به بعد ۱×۱ سانتیمتر و ارتفاع سی سانتیمتر، استفاده شده است. جنس موانع چوبی و با آرایش یک در میان و زیگزگی بر روی بستر پلکسی سوراخ دار کف فلوم، قرار داده شدند.

$$R_i = \frac{g'h \cos \theta}{U^2} = \frac{1}{Fr_d^2} \quad (2)$$

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad (3)$$

که به این عدد (Fr_d)، عدد فرود دنسی‌متریک گفته می‌شود. که در آن h = ارتفاع جریان غلیظ، g' = شتاب ثقل کاهش یافته (reduced gravity acceleration)، θ = زاویه کف کانال، U = سرعت جریان غلیظ، Fr_d = عدد فرود دنسی‌متریک (densimetric Froude number). با توجه به اینکه حداقل بین جریان غلیظ و سیال پیرامون معمولاً به آسانی قابل تشخیص نبوده و شناسایی آن کار دشواری می‌باشد، برای تخمین عمق و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ از روابط (۴) و (۵) جهت انتگرال گیری در عمق جریان استفاده می‌شود: (۲۳)

$$U_{ave} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \quad (4)$$

$$h_{ave} = \frac{\left(\int_0^\infty u dz\right)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{\left(\int_0^{h_t} u dz\right)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \quad (5)$$

که در این روابط U_{ave} سرعت متوسط جریان غلیظ و h_{ave} عمق متوسط جریان غلیظ، u : سرعت بدنه در ارتفاع Z از کف، h_t : ارتفاعی که در آن سرعت برابر با صفر می‌شود، Z : ارتفاع از کف. دبی در واحد عرض بدنه جریان غلیظ با انتگرال گیری بر روی سطح مقطع عبور جریان در سرعت متوسط بدست آمده در تمام ارتفاع جریان غلیظ بدست آمد.

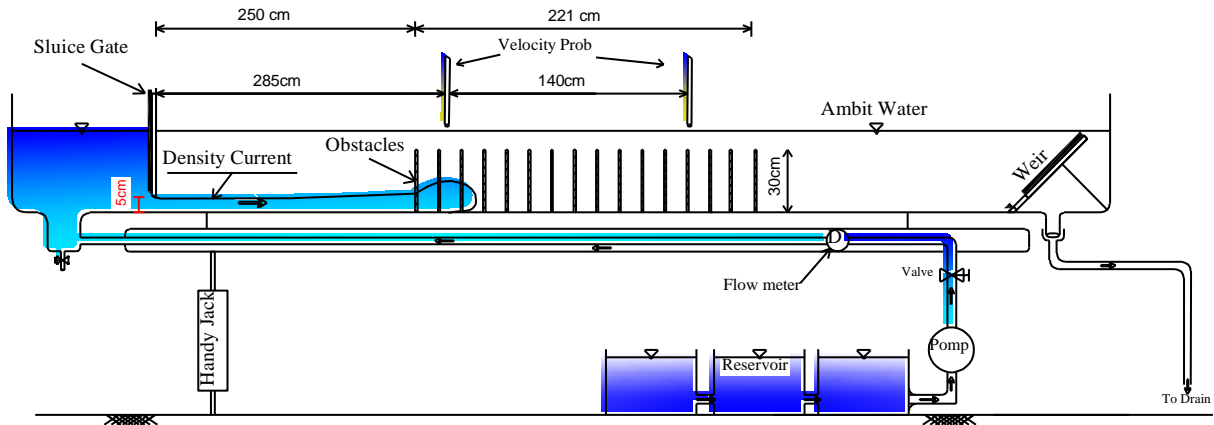
$$Q = U \cdot b \cdot h \quad (6)$$

که در آن U : سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ (m/s) و b : عرض کف فلوم برابر ۰/۳۰ متر و h : ارتفاع بدنه جریان غلیظ در محلی که پروفیل سرعت برداشت شده است. (m) جهت یافتن درصد کاهش دبی بدنه جریان غلیظ و نتیجتاً کنترل دبی بین دو مقطع از رابطه (۶) استفاده گردید:

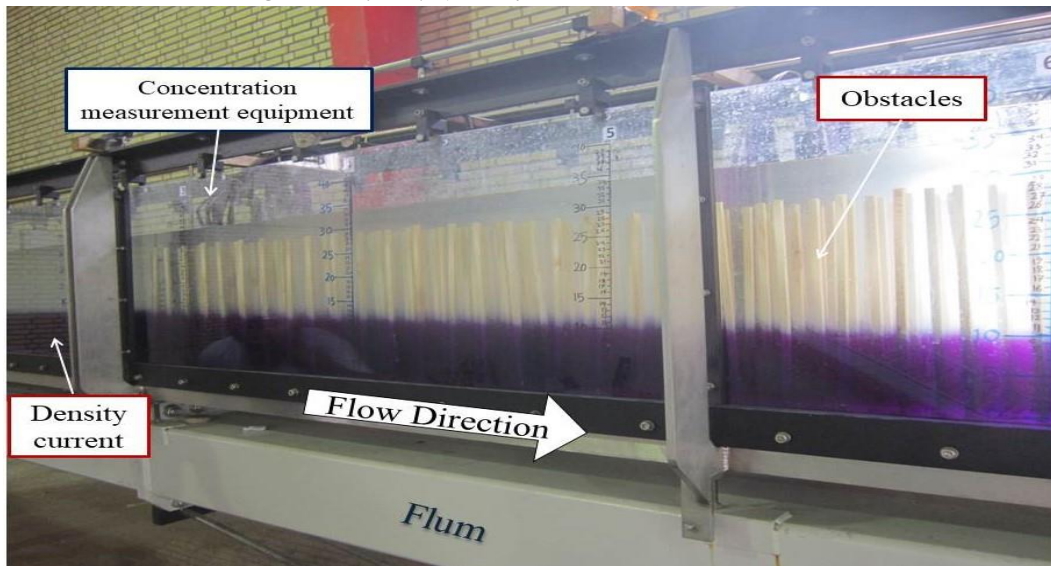
$$\Delta Q = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \quad (7)$$

مواد و روش‌ها

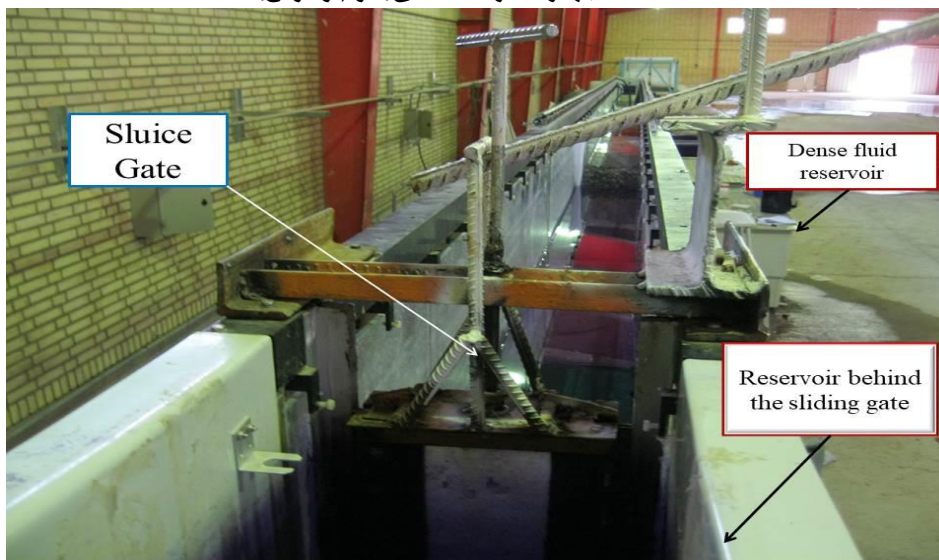
آزمایش‌های تحقیق حاضر در محل آزمایشگاه مرکز رسوب سازمان آب و برق خوزستان در شهر اهواز در فلومی به طول ۱۲/۵ متر، عرض ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر با قابلیت تغییر شیب مثبت و منفی انجام شد. در شکل (۵) نقشه شماتیک و در شکل‌های (۶) و (۷) مجموعه فلوم



شکل ۵- نقشه شماتیک مجموعه تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۶- تجهیزات آزمایشگاهی (فلوم و موانع)



شکل ۷- مخازن جریان غلیظ و دریچه ورودی

می‌باشد. این امر به دلیل آشفتگی بیشتر جریان غلیظ در لحظه برخورد با موانع مکعبی و در نتیجه اختلاط بیشتر نسبت به موانع استوانه‌ای می‌باشد.

سرعت بدنه جریان غلیظ

همانطور که قبلاً عنوان شد یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر دو نوع مانع استوانه‌ای و مکعبی بر روی شکل عمومی پروفیل سرعت می‌باشد. در دو مقطع نشان داده شده، مطابق شکل (۵) پروفیل‌های سرعت بدنه جریان غلیظ برای بستر بدون مانع و بستر دارای موانع استوانه‌ای و مکعبی اندازه‌گیری گردید. در شکل (۱۲) پروفیل سرعت برای غلظت $15(g/l)$ و شیب 0.2% و دبی $0.83(Lit/s)$ ارائه شده است. همانطور که در نمودار شکل (۱۲) مشاهده می‌شود حضور موانع و برخورد جریان با آنها باعث کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ نسبت به حالت بدون مانع می‌شوند.

جدایی جریان و منطقه گردابی که در اثر اختلاف فشار پشت هر دو نوع مانع ایجاد می‌شود (ناحیه دنباله یا همان Wake)، در کشش سیال پیرامون به داخل جریان غلیظ بسیار مؤثر بوده و باعث رقیقتر شدن سیال غلیظ و همچنین استهلاک ناشی از برخورد و افت اصطکاک ناشی از موانع سبب کاهش سرعت و در نتیجه کاهش مومنوم می‌شود. در تمامی آزمایش‌ها و نتایج آنها مقدار سرعت نقطه‌ای بدنه جریان غلیظ در بین موانع مکعبی بیشتر از موانع استوانه‌ای می‌باشد. دلیل این امر را نیز می‌توان در تفاوت شکل ناحیه دنباله این دو نوع مانع دانست. همانطور که در شکل (۱۳) بصورت شماتیک و تقریبی مشاهده می‌گردد ناحیه دنباله بزرگتر در پشت موانع مکعبی نسبت به موانع استوانه‌ای باعث کوچکتر شدن عرض مقطع مفید عبوری جریان غلیظ نسبت به موانع استوانه‌ای می‌شود.

این ناحیه بر اساس کارهای دیگران و همچنین با بکاربردن ماده رنگی پرمنگنات که باعث آشکارسازی می‌شود، دیده شده است که در بخش مقدمه مطابق شکل‌های ۳ و ۴ نیز نشان داده شده است. با توجه به این مطلب که در کلیه آزمایش‌های این تحقیق اندازه‌گیری میزان سرعت بدنه در این فضای عبور جریان غلیظ صورت گرفته است (مطابق شکل ۱۳)، لذا با توجه به اینکه سرعت در وکها تقریباً صفر بوده و در بستر دارای موانع مکعبی، بیشتر مقطع توسط وکها پوشانده شده و عرض مقطع مفید عبور جریان غلیظ بیشتر کاهش یافته، باعث افزایش سرعت نقطه‌ای اندازه‌گیری شده در این موانع نسبت به موانع استوانه‌ای گردیده است.

فاصله طولی و عرضی موانع از یکدیگر بصورت بی بعد و در این آزمایش‌ها ۳ برابر بعد موانع (3D) و به مقدار ۳ سانتیمتر انتخاب گردید. ابعاد هندسی موانع و بستر مانع دار به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده‌اند. ارتفاع بدنه جریان غلیظ با قرائت اشل‌های نصب شده بر روی بدنه فلوم و کنترل با فیلم‌های ضبط شده اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که در آزمایش‌های با بستر صاف در چهار مقطع با فواصل ۹۰ سانتیمتری و در آزمایش‌های با موانع در هفت مقطع با فواصل ۴۵ سانتیمتری مطابق شکل (۸)، قرائت‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. برای محاسبه پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ از دستگاه سرعت سنج الکترومغناطیس که عمل اندازه‌گیری نقطه‌ای سرعت را بصورت یک بعدی انجام می‌دهد، استفاده شد.

با فرض یک بعدی بودن جریان غلیظ، در دستگاه سرعت سنج نیز فقط مولفه افقی سرعت اندازه‌گیری شده است. پس از عبور کامل هد جریان غلیظ و تخلیه آن از انتهای فلوم و ثابت شدن بدنه جریان غلیظ و پایداری جریان^۶، پروفیل‌های سرعت در دو ایستگاه $2/85$ و $4/25$ متری از دریچه ورودی و در خط مرکزی کانال، ثبت می‌گردید. (شکل ۵). در انتهای هر آزمایش شیر ورود سیال غلیظ بسته و فلوم برای آزمایش بعدی توسط دریچه انتهایی آن تخلیه و تمام وسایل با دقت کامل بازدید، تمظیف و تنظیم می‌گردیدند.

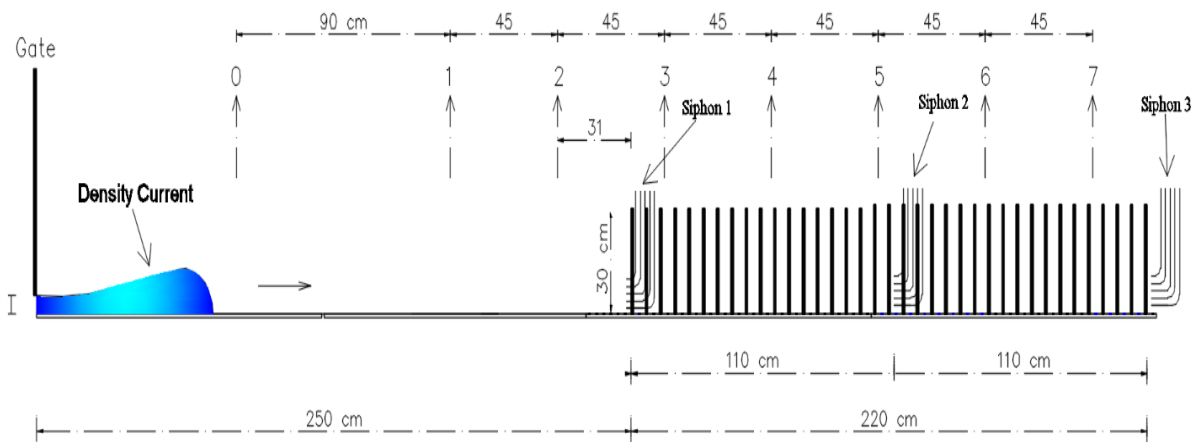
نتایج

ارتفاع بدنه جریان غلیظ

با توجه به اهمیت بررسی تأثیر موانع بر ارتفاع بدنه جریان غلیظ مطابق نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۱) نتایج ارتفاع بدنه برای سه شیب متغییر با غلظت و دبی ثابت، برای بسترهای بدون مانع^۷ و با موانع استوانه‌ای^۸ و مکعبی^۹ نمایش داده شده است. همانطور که در نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بازاء یک شیب و غلظت مشخص، ارتفاع بدنه جریان در طول مسیر درون کانال با بستر بدون مانع (بستر صاف) روند صعودی بسیار ناچیزی بوده که تقریباً می‌توان ثابت فرض شود. دلیل این امر اختلاط جزئی بدنه جریان غلیظ با سیال ساکن محیطی، در لایه حد فاصل اختلاط (مطابق شکل ۲) می‌باشد. کارگذاری موانع تأثیر زیادی بر روی ارتفاع بدنه جریان غلیظ دارد. در بسترهای دارای موانع استوانه‌ای و مکعبی ارتفاع بدنه روندی نزولی دارد. این امر به دلیل حضور موانع و کاهش حجم سیال غلیظ عبوری از موانع می‌باشد. همچنین مطابق نمودارهای شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که ارتفاع بدنه جریان غلیظ در تمام موارد در بستر با موانع مکعبی بیش از ارتفاع آن در بستر با موانع استوانه‌ای

⁸Cylindrical
⁹Cubic

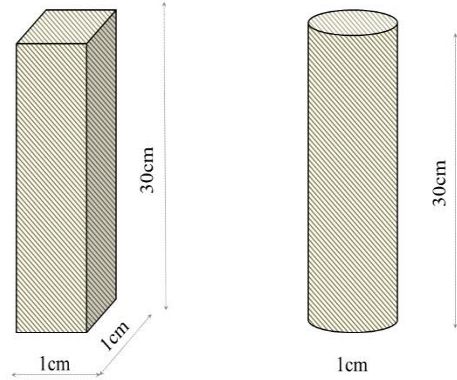
⁶ Steady condition
⁷No Obstacle



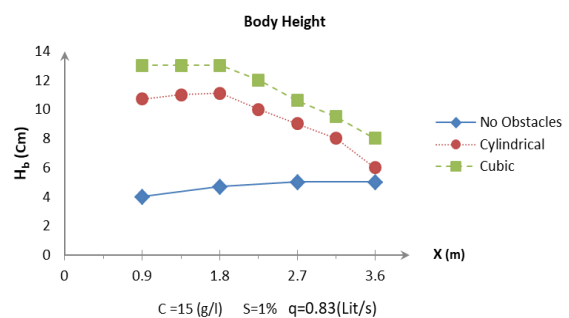
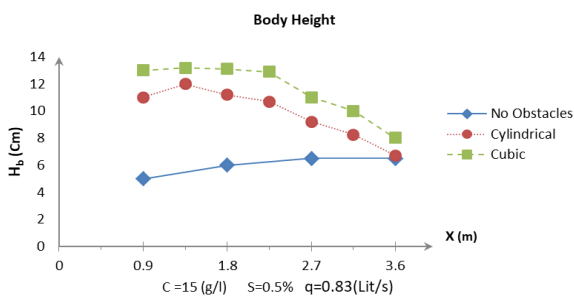
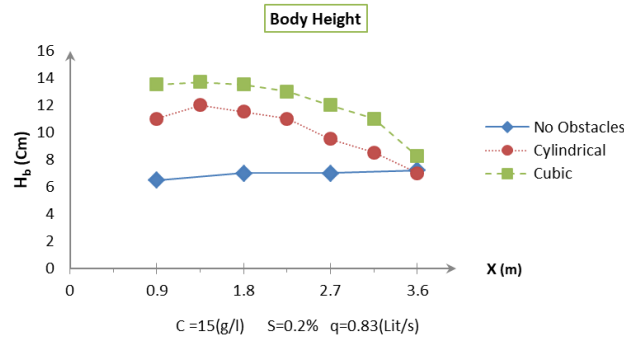
شکل ۸- نقشه بستر مانع دار و مقاطع نمونه برداری در فلوم



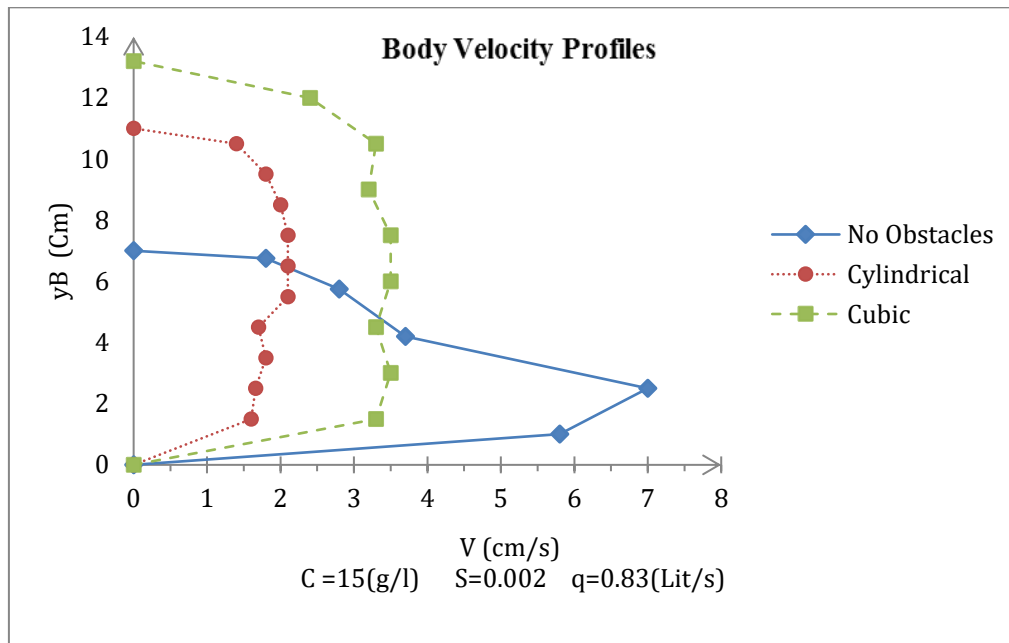
شکل ۱۰- بستر مانع دار



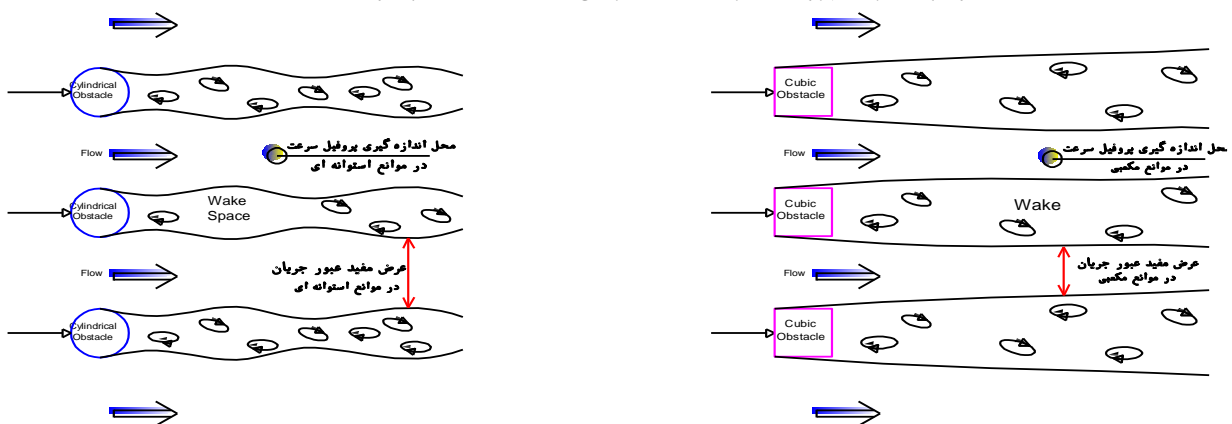
شکل ۹- ابعاد هندسی موانع استوانه ای و مکعبی



شکل ۱۱- نمودار تغییرات ارتفاع بدنه جریان غلیظ با فاصله در طول کانال با سه شیب متغییر و غلظت (g/l) ۱۵ و دبی (Lit/s) ۰.۸۳.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ با فاصله در طول کانال با سه شیب

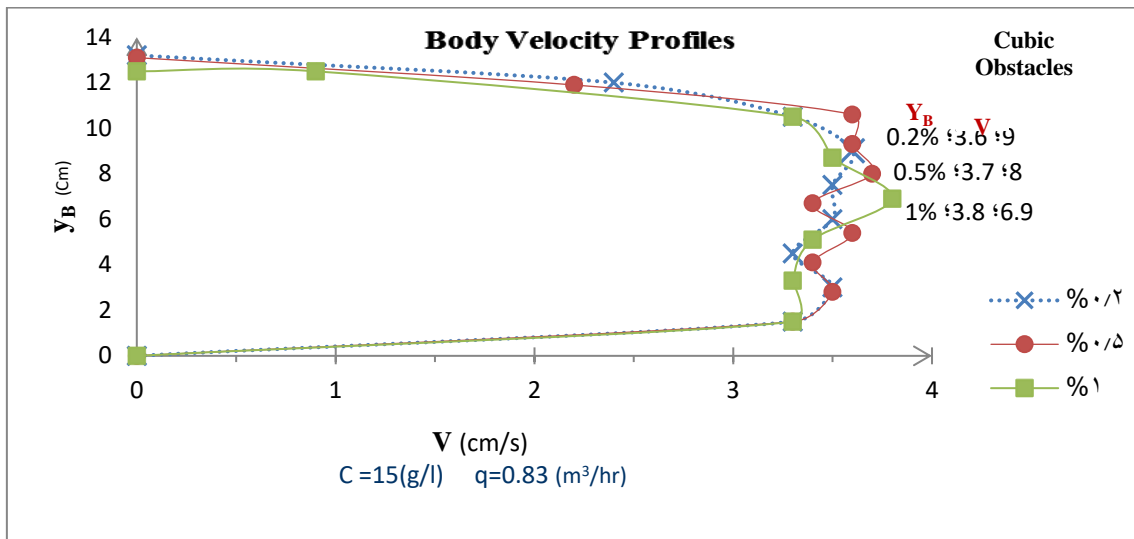


شکل ۱۳- ناحیه دنباله (Wake) دو نوع مانع استوانه‌ای و مکعبی و نحوه عبور جریان غلیظ و محل اندازه‌گیری سرعت بدنه

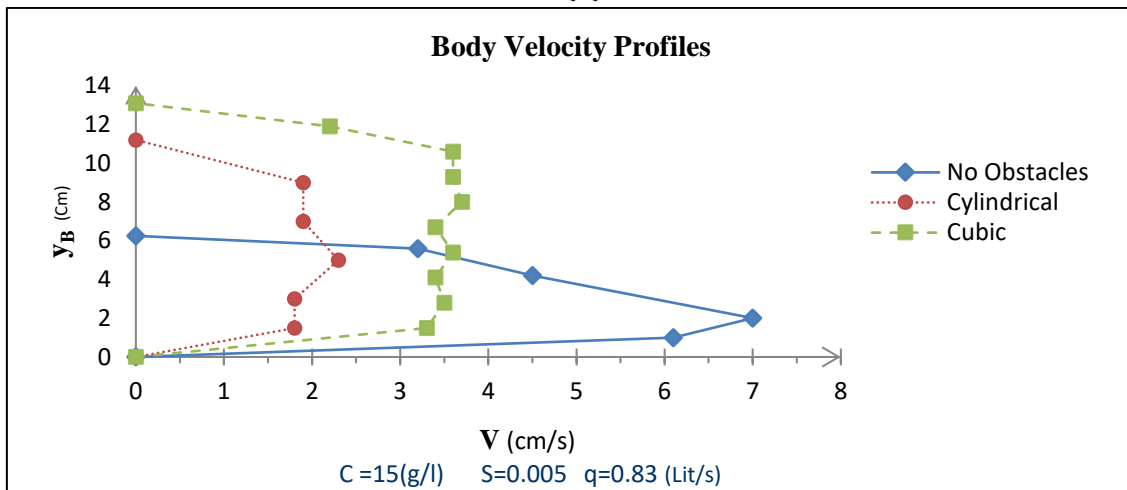
سریع تر به سرعت بیشینه خود خواهد رسید. همچنین با دقت در نمودارهای نمونه ارائه شده در شکل‌های (۱۲) و (۱۵)، می‌توان دریافت که حضور موانع نسبت به بستر بدون مانع باعث بالاتر بردن سرعت حداکثر نسبت به کف کانال می‌شود این امر بدلیل حرکت سیال غلیظ در طول کانال و ورود مایع پیرامونی به درون بدنه جریان و رقیقتر شدن و در نتیجه سبکتر شدن آن می‌باشد. نیکخواه و همکاران (۱۳۹۷) نیز در مطالعه ای که بر روی کارگذاری مانع‌های متوالی بمنظور کنترل بدنه جریان غلیظ و بررسی پروفیل‌های سرعت در آنها پرداختند، به نتایج مشابهی در خصوص ارتفاع سرعت ماکزیمم رسیدند با این تفاوت که اثر یک نوع مانع با عرضی معادل عرض کانال را بررسی نمودند و در این تحقیق اثر دو نوع مانع بصورت میله ای شکل و با ارتفاعی بیش از بدنه جریان مورد بررسی قرار گرفت. (۲۰).

تأثیر شیب کف کانال

در نمودارهای شکل (۱۴) پروفیل‌های بدنه جریان غلیظ تحت سه شیب مختلف کانال و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و دبی ثابت ۰/۸۳ لیتر در ثانیه برای بستر دارای موانع مکعبی، برای نمونه و بررسی رسم شده اند. با توجه به پروفیل‌های رسم شده در شکل (۱۴)، افزایش شیب کانال باعث افزایش سرعت بدنه (V) جریان غلیظ می‌شود، زیرا افزایش شیب کانال جزء مؤثر نیروی وزن $(g' \sin\theta)$ را افزایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب سرعت حداکثر افزایش یافته و ارتفاع محل سرعت حداکثر (Y_B) کاهش می‌یابد. یعنی افزایش شیب در غالب موارد باعث شده سرعت بدنه جریان غلیظ در ارتفاع پایین‌تری به مقدار بیشینه خود برسد. به عبارت دیگر جریان غلیظ



شکل ۱۴- پروفیل اندازه گیری شده سرعت بدنه جریان غلیظ با سه شیب متفاوت و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و دبی ۰/۸۳ لیتر در ثانیه



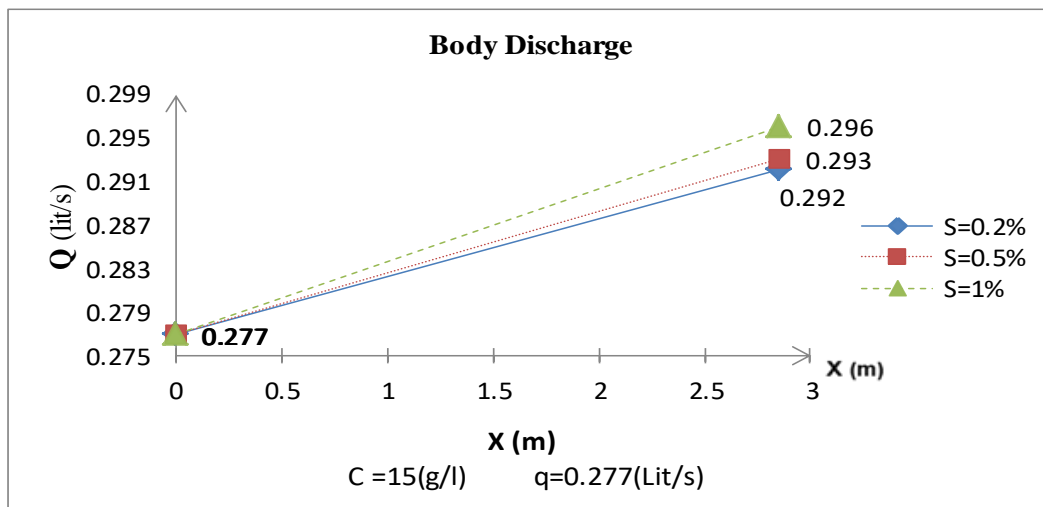
شکل ۱۵- پروفیل اندازه گیری شده سرعت بدنه جریان غلیظ با غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و شیب ۰/۵ درصد و دبی ۰/۸۳ لیتر در ثانیه برای سه نوع بستر

دبی عبوری بدنه جریان غلیظ در فواصل مختلف، میزان دبی نسبی بدنه جریان در شرایط مختلف همچنین با تغییرات در شیب بستر، برای هر دو نوع بستر بدون مانع نمودارهای شکل (۱۶) و با موانع استوانه‌ای نمودارهای شکل (۱۷) و مکعبی در نمودارهای شکل (۱۸)، نشان داده شده است. روند نشان داده شده در نمودارهای شکل (۱۶) در مجموع بیانگر این موضوع می‌باشد که در بستر بدون مانع در طول فلوم دبی عبوری بدنه جریان غلیظ افزایش می‌یابد. و این افزایش دبی با افزایش شیب نیز دارای رابطه مستقیم می‌باشد. این میزان افزایش دبی در دو مقطع (یکی ابتدای کانال و یکی در فاصله ۲۸۵ سانتی متر نسبت به ابتدای کانال) اندازه گیری شده است که نسبت به دبی تنظیم شده خروجی از پمپ حدود ۵٪ تا ۷٪ در فاصله ۲۸۵ سانتی متر از دریچه

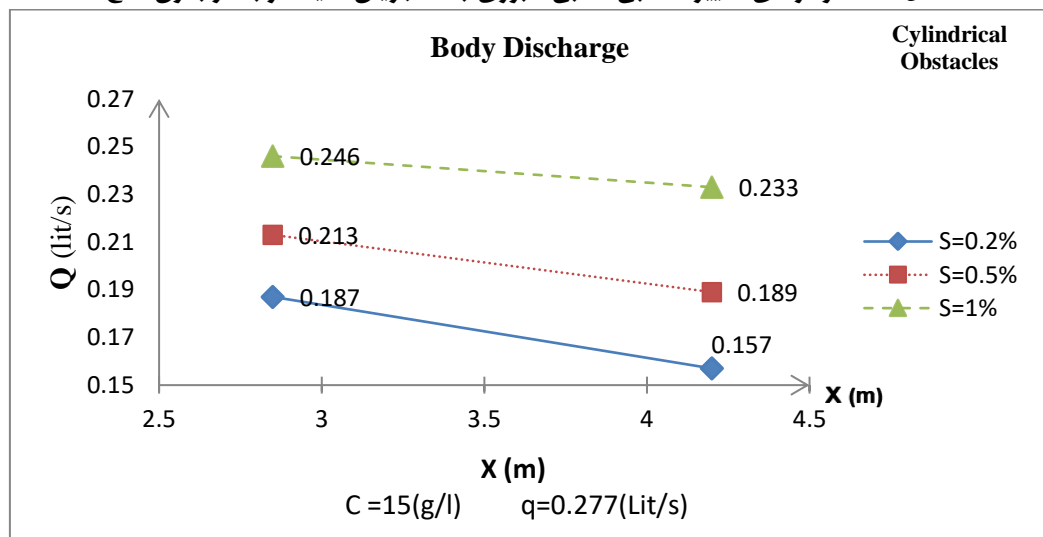
همچنین مطابق شکل (۱۵) در موانع مکعبی ارتفاع محل حداکثر سرعت، نسبت به موانع استوانه‌ای، بالاتر می‌باشد. به عبارت دیگر موانع مکعبی ارتفاع سرعت بیشینه را افزایش می‌دهند و جریان غلیظ تمایل دارد در برخورد با موانع مکعبی از بستر فاصله بیشتری نسبت به موانع استوانه‌ای بگیرد. البته دلیل این امر را نیز می‌توان در شدت اختلاط بیشتری جریان غلیظ و افزایش ضخامت آن در برخورد با موانع مکعبی نسبت به موانع استوانه‌ای و ارتفاع بزرگتر در مقایسه با موانع استوانه‌ای شکل، دانست.

میزان کاهش و کنترل دبی بدنه جریان

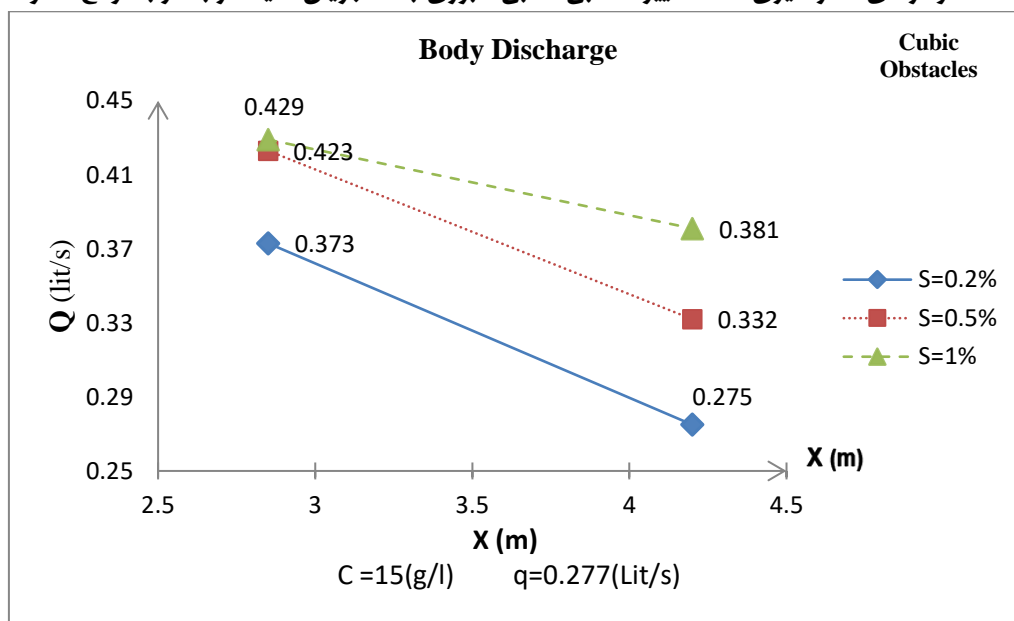
به منظور بررسی و کنترل جریان غلیظ در شرایط مختلف و میزان



شکل ۱۶- نمودارهای تغییرات دبی نسبی عبوری بدنه جریان غلیظ در بستر بدون مانع



شکل ۱۷- نمودارهای اندازه‌گیری شده تغییرات دبی نسبی عبوری بدنه جریان غلیظ در بستر با موانع استوانه ای



شکل ۱۸- نمودارهای اندازه‌گیری شده تغییرات دبی نسبی عبوری بدنه جریان غلیظ در بستر با موانع مکعبی

این روند افزایش دبی نسبی بدنه جریان غلیظ، به دلیل وجود اختلاط در مرز سیال تمیز (آب ساکن) و سیال غلیظ در بستر بدون مانع می‌باشد یعنی اینکه با حرکت جریان در طول فلوم دبی آن زیاد شده و این مورد نشان دهنده ورود مقداری از سیال تمیز به درون سیال غلیظ می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت بدنه جریان غلیظ برای بستر دارای موانع استوانه‌ای و مکعبی در دو مقطع اندازه‌گیری شده است به تبع آن دبی عبوری نیز در دو مقطع اندازه‌گیری شده اند، لذا دو دبی برای هر دو مقطع بدست آمده، که در نمودارهای شکل (۱۷) و (۱۸) بعنوان نمونه برای غلظت ۱۵ گرم در لیتر و دبی ۰/۲۷۷ لیتر در ثانیه و تحت سه شیب مختلف نشان داده شده اند.

همانطور که در نمودارهای نمونه شکل (۱۷) مشاهده می‌گردد در بسترهای مانع دار برعکس بستر بدون مانع دبی بدنه سیر نزولی را در طول کانال طی می‌کند. به دلیل اینکه در بستر مانع دار برخورد خطوط جریان با موانع منجر به افزایش افت اصطکاک و فشاری و غیرماندگار شدن جریان شده و در نتیجه باعث کاهش دبی بدنه می‌شود. از آنجائیکه در این تحقیق جریان غلیظ نمکی در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته و لذا در آزمایش‌ها مواد نمکی یا رسوبی از جریان خارج نشده است، افزایش افت اصطکاک و فشاری با کاهش مومنتم مترادف است. با مقایسه دبی عبوری برای بستر دارای موانع استوانه‌ای در دو مقطع، درصد کاهش دبی در شیب‌ها و دبی‌های مختلف بدست آمده است که دارای محدوده کاهشی دبی بین ۵٪ تا ۱۶٪ می‌باشد. (شکل ۱۷ و جدول ۱). مطابق نمودارهای شکل (۱۸) در بستر دارای موانع مکعبی نیز کاهش دبی عبوری بدنه جریان غلیظ در طول کانال مشاهده می‌گردد. البته در بستر با موانع مکعبی این میزان کاهش دبی بدنه بین دو مقطع ذکر شده در طول فلوم در مقایسه با نمونه‌های نظیر موانع استوانه ای همیشه دارای مقادیر بالاتر بوده است و در کل آزمایش‌ها محدوده کاهشی دبی بین ۱۱٪ تا ۳۰٪ را نشان می‌دهد. با دقت در داده‌های نمودارهای شکل‌های (۱۷) و (۱۸) و جدول شماره ۱، در خصوص میزان اثر موانع بر روی دبی کل عبوری جریان غلیظ در بازه قرارگیری موانع

جدول ۱- درصد کاهش دبی کل عبوری بین دو مقطع تحت غلظت ثابت (gr/l) ۱۵ و دبی ثابت (Lit/s) ۰/۲۷ و تحت سه

شیب متغییر

Slope (%)	Cylindrical			Cubic		
	Q 1 (Discharge) (Lit/s)	Q 2 (Discharge) (Lit/s)	Percentage decrease in Discharge	Q 1 (Discharge) (Lit/s)	Q 2 (Discharge) (Lit/s)	Percentage decrease in Discharge
۰/۲	۰/۱۸۷	۰/۱۵۷	٪۱۶	۰/۳۷۳	۰/۲۷۵	٪۲۶
۰/۵	۰/۲۱۳	۰/۱۸۹	٪۱۱	۰/۴۲۳	۰/۳۳۲	٪۲۲
۱	۰/۲۴۶	۰/۲۳۳	٪۵	۰/۴۲۹	۰/۳۸۱	٪۱۱

بدنه در هر مقطع اندازه گیری به غلظت بدنه در مقطع و سیفون شماره یک، جهت قابل مقایسه شدن بهتر تغییرات غلظت در طول فلوم برای بستر بدون مانع و با مانع می‌باشد. بررسی نتایج جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد که روند کاهش غلظت بدنه در بستر بدون مانع و بستر دارای موانع استوانه ای و مکعبی وجود دارد و با حرکت جریان غلیظ در طول کانال غلظت بدنه آن کاسته می‌شود. در بسترهای مختلف این شدت کاهش غلظت متفاوت می‌باشد. برای بررسی بهتر و مقایسه این تغییرات نمودارهای شکل (۱۹) رسم شده است. این نمودارها تغییرات غلظت نسبی بدنه را در بسترهای متفاوت با سه شیب متفاوت نشان می‌دهند. نمودارهای شکل (۱۹) و همچنین جداول (۳) و (۲) حاکی از آن است که در بستر بدون مانع با حرکت در طول کانال، غلظت بدنه جریان غلیظ کاسته می‌شود. این میزان کاهش دارای مقداری بین ۱/۵ تا ۱۴٪، با میانگین کاهش برای کل آزمایش‌ها حدود ۶/۵٪ می‌باشد. در بستر دارای موانع استوانه ای مشاهده می‌شود که روند کاهش غلظت بدنه نیز همانند بستر بدون مانع وجود دارد و با حرکت در طول کانال از غلظت جریان غلیظ کاسته می‌شود. اما این میزان کاهش نسبت به بستر بدون مانع بسیار بیشتر بوده است و حدود ۴۱٪ محاسبه گردیده است. (کاهش مقادیر غلظت در کل آزمایش‌ها بین ۳۳٪ تا ۴۷٪). همچنین در بستر دارای موانع مکعبی این روند کاهش غلظت بدنه نیز با مقادیر بیشتری مشاهده می‌گردد. بطوریکه میانگین کاهش برای کل آزمایش‌های دارای موانع مکعبی نسبت به بستر بدون مانع حدود ۴۹٪ محاسبه گردید. (کاهش مقادیر غلظت برای کل آزمایش‌ها بین ۴۳٪ تا ۵۵٪).

لذا می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش شیب از تأثیر موانع بر روی کاهش میزان دبی عبوری بدنه کاسته است. این امر بدلیل افزایش سرعت و کاهش ارتفاع بدنه جریان غلیظ بوده است که باعث کاهش سطح تماس سیال غلیظ با موانع و در نتیجه کاهش افت انرژی ناشی از موانع حاصل شده است. درخشان نیا و همکاران در تحقیقی در خصوص میزان کارایی یک نوع مانع بر روی رأس جریان غلیظ نیز نتیجه گرفته اند که افزایش شیب کانال، باعث کاهش کارایی موانع نفوذپذیر در میزان کنترل دبی رأس جریان شده است و چون رأس جریان دائما توسط بدنه تغذیه می‌شود در تحقیق حاضر برای دو نوع مانع، نتایج برای دبی عبوری بدنه جریان غلیظ مورد پژوهش قرار گرفته است (۲۲). باید توجه داشت دبی در واحد عرض استخراج شده در کل نمودارها با استفاده از سرعت‌های اندازه گیری شده در بین موانع نتیجه گیری گردیده است و به عنوان دبی کل عبوری از کانال قابل استفاده نمی‌باشد. از آنجاییکه حضور موانع علاوه بر کاهش دبی عبوری، بر غلظت سیال نیز تأثیر گذار می‌باشد، یافتن تغییرات غلظت برای هر دو نوع بستر بدون مانع و بستر دارای موانع استوانه ای و مکعبی جهت یافتن اثر بکارگیری موانع در کاهش دبی جرمی جریان غلیظ عبوری (راندمان موانع) لازم می‌باشد. لذا در بخش بعدی به بررسی و مقایسه تغییرات نسبی غلظت بدنه جریان غلیظ در طول کانال برای بستر دارای موانع با بستر صاف می‌پردازیم.

غلظت بدنه جریان غلیظ

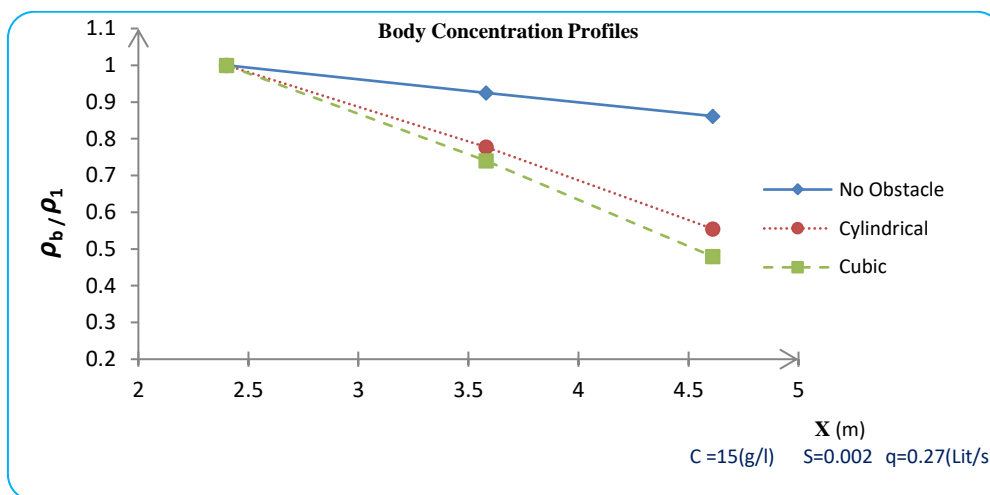
نتایج حاصل از اندازه گیری غلظت بدنه جریان غلیظ در سه مقطع با فواصل حدود ۱/۱۰ متری نسبت به یکدیگر، جهت حصول اطمینان از صحت نتایج در پروفیل‌های غلظت، برای هر دو نوع بستر بدون مانع و مانع دار در سه شیب مختلف کانال و با سه دبی متفاوت ورودی جریان، بدست آمد. این نتایج برای غلظت ۱۵ گرم در لیتر و شیب‌های ۰/۲٪، ۰/۵٪ و ۱٪ و سه دبی ۰/۲۷، ۰/۵۵ و ۰/۸۳ لیتر در ثانیه، برای بستر بدون مانع در جدول شماره (۲) و برای بستر دارای موانع استوانه‌ای و مکعبی در جدول شماره (۳) به تفکیک ارائه گردیده‌اند. لازم به ذکر است پارامتر غلظت نسبی بدنه ($\frac{\rho_b}{\rho_1}$) در ستون آخر جداول و نمودارها، بصورت پارامتری بی‌بعد ارائه گردیده که بیانگر نسبت تغییرات غلظت

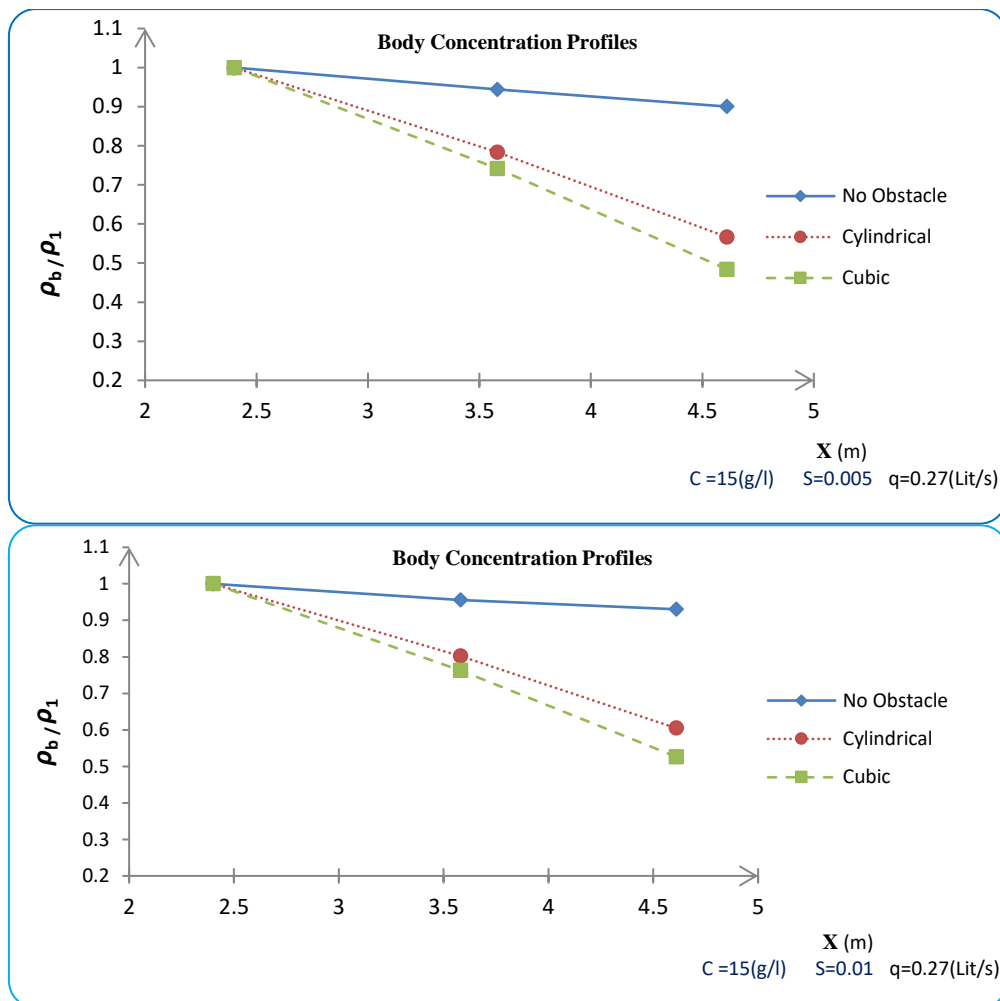
جدول ۲- تغییرات غلظت نسبی بدنه جریان غلیظ در بستر بدون مانع (صاف)

Exp. no.	Obstacle	Slope (%)	Q (Discharge) (Lit/s)	Dist. 240 cm	Dist. 358 cm	Dist. 461 cm
				ρ_b / ρ_1	ρ_b / ρ_1	ρ_b / ρ_1
۱	No Obstacle	۰/۲	۰/۲۷	۱	۰/۹۲۴	۰/۸۶۱
۲			۰/۵۵	۱	۰/۹۳۹	۰/۷۸۹
۳			۰/۸۳	۱	۰/۹۵۳	۰/۸۶۱
۴		۰/۵	۰/۲۷	۱	۰/۹۴۴	۰/۹۰۰
۵			۰/۵۵	۱	۰/۹۵۷	۰/۹۱۵
۶			۰/۸۳	۱	۰/۹۳۰	۰/۸۶۱
۷		۱	۰/۲۷	۱	۰/۹۵۵	۰/۹۳۰
۸			۰/۵۵	۱	۰/۹۶۵	۰/۹۱۸
۹			۰/۸۳	۱	۰/۹۶۸	۰/۹۴۰

جدول ۳- تغییرات غلظت نسبی بدنه جریان غلیظ در بستر دارای موانع استوانه ای و مکعبی

Exp. no.	Obstacle	Slope (%)	Q (Discharge) (Lit/s)	Dist. 240 cm	Dist. 358 cm	Dist. 461 cm
				ρ_b / ρ_1	ρ_b / ρ_1	ρ_b / ρ_1
۱۰	Cylindrical	۰/۲	-/۲۷	۱	-/۷۷۷	-/۵۵۵
۱۱			-/۵۵	۱	-/۷۸۲	-/۵۶۵
۱۲			-/۸۳	۱	-/۷۶۲	-/۵۲۵
۱۳		۰/۵	-/۲۷	۱	-/۷۸۳	-/۵۶۶
۱۴			-/۵۵	۱	-/۷۸۳	-/۵۶۵
۱۵			-/۸۳	۱	-/۷۸۵	-/۵۷۰
۱۶		۱	-/۲۷	۱	-/۸۰۲	-/۶۰۴
۱۷			-/۵۵	۱	-/۷۹۳	-/۵۸۶
۱۸			-/۸۳	۱	-/۷۹۷	-/۵۹۵
۱۹	Cubic	۰/۲	-/۲۷	۱	-/۷۳۹	-/۴۷۹
۲۰			-/۵۵	۱	-/۷۴۸	-/۴۹۶
۲۱			-/۸۳	۱	-/۷۲۵	-/۴۵۰
۲۲		۰/۵	-/۲۷	۱	-/۷۴۲	-/۴۸۴
۲۳			-/۵۵	۱	-/۷۴۹	-/۴۹۸
۲۴			-/۸۳	۱	-/۷۵۰	-/۵۰۱
۲۵		۱	-/۲۷	۱	-/۷۶۳	-/۵۲۶
۲۶			-/۵۵	۱	-/۷۵۴	-/۵۰۹
۲۷			-/۸۳	۱	-/۷۵۴	-/۵۰۸





شکل ۱۹- تغییرات غلظت نسبی بدنه جریان غلیظ در بستر بدون مانع و با موانع استوانه ای و مکعب

می‌دهد که حضور موانع باعث بیشتر شدن مقدار این عدد نسبت به بستر بدون مانع می‌شود. دلیل این امر کاهش سرعت در بسترهای مانع دار بوده که باعث افزایش Ri می‌گردد. همچنین مقادیر عدد ریچاردسون در شرایط برابر، در موانع مکعبی همواره کمتر از مقادیر آن در موانع استوانه ای بوده است. دلیل این امر همانطور که در بخش نتایج سرعت بدنه جریان غلیظ ذکر گردید مربوط به ناحیه وک موانع مکعبی و سرعت بالاتر اندازه گیری شده بدنه در آنها و نتیجتاً کاهش مقادیر Ri در موانع مکعبی نسبت به موانع استوانه‌ای می‌باشد.

با مقایسه اعداد ریچاردسون در دو نوع مانع استوانه ای و مکعبی نتیجه دیگری از تحقیق حاضر حاصل می‌شود و آن تأثیر شکل مانع در اعداد ریچاردسون بوده به این نحو که شکل مانع در اعداد ریچاردسون بالا مشهودتر است. همچنین مطابق رابطه (۲) حضور موانع باعث افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ شده که این افزایش، با افزایش عدد ریچاردسون همراه می‌باشد.

جهت مقایسه این نتایج با سایر تحقیقات صورت گرفته، داودی پنی و همکاران (۲۰۱۸) (۲۴) به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای جریان غلیظ نمکی بر روی بستر با زبری‌های مکعبی پرداختند. آنها دریافتند که افزایش ارتفاع زبری باعث کاهش سرعت و در نتیجه افزایش عدد

در تمام آزمایش‌های این تحقیق کاهش غلظت بدنه ناشی از حرکت جریان غلیظ در طول کانال در موانع مکعبی نسبت به موانع نظیر استوانه ای با همان شرایط غلظت و شیب بستر و دبی ورودی جریان غلیظ، مقداری بیشتر می‌باشد. (حدود ۹٪).

در خصوص اثر شیب کانال بر روند کاهش غلظت‌های اندازه گیری شده بدنه جریان، در تمام آزمایش‌ها و برای کلیه بسترهای بدون مانع و دارای موانع، با افزایش شیب بستر کانال، غلظت نسبی بدنه در طول فلووم افزایش داشته یا به عبارت دیگر شدت کاهش غلظت بدنه در طول فلووم، کاهش می‌یابد. این روند را می‌توان با دقت در داده‌های جداول (۳ و ۲)، همچنین نمودارهای شکل (۱۹) که کاهش غلظت بدنه جریان را با حرکت در طول کانال و برای سه شیب متغییر نشان می‌دهد، مشاهده نمود.

بررسی تأثیر شکل و نوع موانع بر پارامترهای عدد ریچاردسون و عدد فرود

با استفاده از روابط (۲) و (۳) مقادیر عدد ریچاردسون و عدد فرود برای تمامی آزمایش‌های این تحقیق بدست آمد و نتایج آن در جدول (۴) ارائه گردید. بررسی نتایج مقادیر عدد ریچاردسون مطابق جدول ۴ نشان

اثر پس زدن جریان توسط موانع از کاهش‌های ایجاد شده، بدلیل کاهش مقادیر سرعت و یا افزایش ارتفاع بدنه جریان و در نتیجه افزایش عدد ریچاردسون، همواره بیشتر است و کارکرد اصلی موانع مربوط به دو اثر مهم فوق الذکر است.

در ارتباط با نتایج عدد فرود نیز پس از یافتن مقادیر این پارامتر مطابق رابطه (۳) و بررسی نتایج بدست آمده طبق جدول شماره (۴)، تمام اعداد فرود زیر مقدار یک می‌باشند و این موضوع مؤید جریان زیر بحرانی در تمامی آزمایش‌های این تحقیق می‌باشد.

ریچاردسون در آزمایش‌های مشابه می‌گردد. وجه تمایز و برتری کار تحقیق حاضر در استفاده از دو نوع مانع با ارتفاعی که تمام هد و بدنه جریان غلیظ را دربر گرفته به منظور کنترل جریان غلیظ بوده است. نکته قابل توجه در نتایج تحقیق حاضر این موضوع می‌باشد که تأثیر اصلی موانع بر روی جریان غلیظ به دو کارکرد مهم آنها برمی‌گردد.

این دو کارکرد که یکی ایجاد تلاطم بیشتر در جریان و دیگری اثر پس زدن جریان غلیظ می‌باشند در یافتن راندمان کلی موانع دخالت دارند. و مطابق این نتایج و تحقیقات مشابه (۲۵) تأثیر تلاطم ایجاد شده و

جدول ۴- مقادیر عدد ریچاردسون و عدد فرود

No Obstacle			Cylindrical			Cubic		
Test no.	R_i	F_r	Test no.	R_i	F_r	Test no.	R_i	F_r
۱	۵۰/۰۲۵۴۶	۰/۲۵۷۹۸	۲۸	۲۶/۲۳۰۵۷	۰/۱۹۵۲۵	۶۱	۲۳/۸۲۷۷۸	۰/۲۰۴۸۶
۲	۱۴/۷۷۳۵۷	۰/۲۶۰۱۷	۲۹	۲۱/۰۵۱۵۰	۰/۲۱۷۹۵	۶۲	۱۸/۹۶۳۶۷	۰/۲۲۹۶۴
۳	۱۳/۷۵۷۸۸	۰/۲۶۹۶۰	۳۰	۲۰/۰۸۳۶۴	۰/۲۲۳۱۴	۶۳	۱۷/۳۲۴۱۸	۰/۲۴۰۲۶
۴	۱۶/۴۲۴۷۱	۰/۲۴۶۵۷	۳۱	۴۳/۳۱۹۳۲	۰/۱۵۱۹۴	۵۸	۳۳/۹۰۴۱۵	۰/۱۷۱۷۴
۵	۱۰/۲۵۲۱۱	۰/۳۱۲۳۲	۳۲	۳۲/۷۸۵۶۳	۰/۱۷۴۶۵	۵۹	۲۸/۷۱۵۳۵	۰/۱۸۶۶۱
۶	۷/۵۵۹۹۳	۰/۳۶۳۷۰	۳۳	۲۷/۳۹۲۸۳	۰/۱۹۱۰۷	۶۰	۳۳/۰۳۳۲۶	۰/۲۰۸۳۶
۷	۱۹/۰۹۹۸۴	۰/۲۲۸۸۲	۳۴	۴۵/۶۹۲۰۶	۰/۱۴۷۹۴	۵۵	۴۲/۷۷۵۹۲	۰/۱۵۲۹۰
۸	۱۱/۵۱۵۳۵	۰/۲۹۴۶۹	۳۵	۳۹/۱۴۱۲۶	۰/۱۵۹۸۴	۵۶	۳۵/۶۵۸۰۴	۰/۱۶۷۴۶
۹	۸/۶۵۵۰۶	۰/۳۳۹۹۱	۳۶	۳۴/۳۵۱۲۳	۰/۱۷۰۶۲	۵۷	۳۲/۷۸۴۴۴	۰/۱۷۴۶۵

بسترهای مانع دار برعکس، دبی کل بدنه دارای سیر نزولی بین دو مقطع بوده، بنحویکه در بستر دارای موانع استوانه‌ای محدوده کاهش بین ۵٪ تا ۱۶٪ و در موانع مکعبی دارای تأثیر بیشتر و محدوده کاهش دبی بین ۱۱٪ تا ۳۰٪ را نشان می‌دهد.

کاهش دبی بدنه کل عبوری از موانع مکعبی نسبت به موانع نظیر استوانه ای با همان شرایط غلظت و شیب بستر و دبی ورودی جریان غلیظ در بازه قرارگیری موانع، حدود ۱/۵ تا ۲ برابر بوده و نتیجتاً میزان کنترل دبی بدنه جریان غلیظ در موانع مکعبی بیشتر از استوانه‌ای می‌باشد.

روند تغییرات غلظت بدنه جریان غلیظ در طول بستر با مانع و بدون مانع، نزولی بوده است. به نحوی که در بستر دارای موانع نسبت به بدون مانع نیز، بسیار بیشتر بوده است. این مقدار کاهش در بستر صاف حدود ۶/۵٪ و در بستر دارای موانع مکعبی حدود ۴۹٪ و موانع استوانه ای حدود ۴۱٪ می‌باشد.

کاهش غلظت بدنه ناشی از حرکت جریان غلیظ در طول کانال در موانع مکعبی نسبت به موانع نظیر استوانه ای با همان شرایط غلظت و شیب بستر و دبی ورودی جریان غلیظ، مقداری بیشتر می‌باشد. (حدود ۹٪).

برای کلیه بسترهای بدون مانع و دارای موانع، با افزایش شیب بستر کانال، شدت کاهش غلظت بدنه و میزان در صد کاهش دبی عبوری بدنه جریان غلیظ در طول فلوم، کاهش می‌یابد.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله اثر موانع استوانه ای و مکعبی میله ای شکل بر مشخصات و کنترل دبی و غلظت بدنه جریان غلیظ نمکی تحت تأثیر پارامترهای متغیری از قبیل دبی ورودی، شیب کانال و نوع مانع مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

در بستر بدون مانع (بستر صاف)، ارتفاع بدنه جریان غلیظ در طول مسیر کانال تقریباً ثابت بوده است. کارگذاری هر دو نوع مانع باعث ایجاد روند نزولی در ارتفاع بدنه می‌شود. به نحوی که در تمام موارد در بستر با موانع مکعبی ارتفاع بدنه جریان غلیظ بیش از ارتفاع آن در بستر با موانع استوانه ای می‌باشد.

افزایش پارامتر شیب کانال نیز باعث کاهش ضخامت بدنه و افزایش سرعت بدنه جریان غلیظ در هر دو حالت با مانع و بدون مانع می‌شود. بکارگیری موانع باعث کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ نسبت به حالت بدون مانع می‌شوند. بدلیل خصوصیات ناحیه دنباله بزرگتر در پشت موانع مکعبی مقادیر سرعت اندازه گیری شده، در موانع مکعبی همواره بیش از موانع استوانه‌ای می‌باشد.

حضور موانع باعث افزایش ارتفاع محل حداکثر سرعت نسبت به کف کانال می‌شود. همچنین در موانع مکعبی ارتفاع محل حداکثر سرعت، نسبت به موانع استوانه ای، بالاتر می‌باشد.

در بستر بدون مانع دبی کل عبوری بدنه جریان غلیظ نسبت به دبی تنظیم شده خروجی از پمپ حدود ۵٪ تا ۷٪ افزایش می‌یابد. اما در

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 نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: محمد رضا منسوجیان، مهدی قمشی؛ روش-شناسی و تحلیل داده‌ها: محمد رضا منسوجیان، مهدی قمشی، هوشنگ حسونی زاده، سید عباس حسینی؛ نظارت و نگارش نهایی: محمد رضا منسوجیان، مهدی قمشی.

تعارض منافع

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

References

- 1 Thapa, B.S., O.G. Dahlhaug, and B. Thapa. 2015. Sediment erosion in hydro turbines and its effect on the flow around guide vanes of Francis turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 1100-1113.
- 2 Vreeburg, J., D. Schippers, J. Verberk, and J. Van Dijk. 2008. Impact of particles on sediment accumulation in a drinking water distribution system. *Water research*, 42(16): 4233-4242.
- 3 Toniolo, H. and G. Parker. 2003. 1D numerical modeling of reservoir sedimentation. in *IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Barcelona, Spain.
- 4 Toniolo, H. and J. Schultz. 2005. Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 10(1): 13-24.
- 5 Keshtkar, S., S. Ayyoubzadeh, and B. Firoozabadi. 2011. Experimental Studies on Thickness and Vertical Velocity Distribution of Turbidity Current.
- 6 Graf, W.H. and M.S. Altinakar. 1988. *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry*.
- 7 Danial, G., S.L. Kaveh, K. Ehsan, and A. Soroush. 2020. Large eddy simulation of turbidity currents in a narrow channel with different obstacle configurations. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*, 10(1).
- 8 Graf, W.H. and G. WH. 1983. *The hydraulics of reservoir sedimentation*.
- 9 Andrews, B.J. and M. Manga. 2012. Experimental study of turbulence, sedimentation, and coignimbrite mass partitioning in dilute pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 225: 30-44.
- 10 Simpson, J.E. 1999. *Gravity Currents: in the Environment and the Laboratory*. Cambridge university press.
- 11 Bombardelli, F.A., M.I. Cantero, M.H. Garcia, and G.C. Buscaglia. 2009. Numerical aspects of the simulation of discontinuous saline underflows: the

حضور موانع باعث کاهش مقادیر سرعت نسبت به بستر صاف شده‌اند که این کاهش با افزایش عدد ریچاردسون همراه می‌باشد و مقدار Ri در موانع مکعبی همواره کمتر از موانع استوانه‌ای می‌باشد. نتایج حاصل از عدد فرود نیز بیانگر جریان زیربحرانی برای تمامی آزمایش‌ها می‌باشد.

پیشنهاده‌ها

مطابق با بررسی‌هایی که در زمینه بررسی اثر موانع جهت کنترل جریان غلیظ در این تحقیق ارائه شد، موارد زیر برای تحقیق در آینده پیشنهاد می‌شود:

بررسی اثر قطر و بُعد موانع بر کنترل جریان غلیظ. بدست آوردن بهترین فاصله طولی و عرضی موانع نسبت به یکدیگر و نحوه بهینه چیدمان آنها با انجام آزمایش‌های متعدد جهت اعمال بیشترین تأثیر بر کنترل جریان غلیظ.

استفاده از سایر اشکال موانع شمع مانند، در بستر جریان غلیظ، همانند موانع مخروطی و منشوری البته با ارتفاعی بیشتر از ارتفاع راس و بدنه جریان غلیظ.

با توجه به اینکه کل آزمایش‌های این تحقیق برای جریان‌های غلیظ نمکی انجام شده است، انجام این آزمایش‌ها برای همین نوع از بسترها و شرایط ورود سیال غلیظ، برای جریان‌های غلیظ رسوبی نیز توصیه می‌گردد.

- lock-exchange problem. Journal of Hydraulic Research, 47(6): 777-789.
- 12 Asghari Pari, S.A., S.M. Kashefipour, and M. Ghomeshi. 2017. An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 21(9): 1080-1092.
- 13 Mansoujian, M.R., M. Ghomeshi, H. Hasounizadeh, and S.A. Hosseini. 2021. Utjecaj valjkastih i kockastih pilota na gradijentne struje. Građevinar, 73(05.): 499-507.
- 14 Alexander, J. and S. Morris. 1994. Observations on experimental, nonchannelized, high-concentration turbidity currents and variations in deposits around obstacles. Journal of Sedimentary Research, 64(4a): 899-909.
- 15 Poustizadeh, N. and M. Ghomeshi. 2015. Effect of Obstacles Transversal Distances on Suspended Sediment Transport in The Case of Transverse Wave Occur. Irrigation Sciences and Engineering, 38(1): 11-20.
- 16 Oehy, C. and A. Schleiss. 2003. *Physical and numerical modelling of a turbidity current flowing through a permeable screen*. in *Proceedings of the XXX IAHR Congress*. IAHR.
- 17 Altinakar, S., W.H. Graf, and E. Hopfinger. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. Journal of Hydraulic Research, 28(1): 55-80.
- 18 Oehy, C.D. and A.J. Schleiss. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. Journal of Hydraulic Engineering, 133(6): 637-648.
- 19 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.
- 20 Nikkhab, S.Z., S.M. Kashefipour, and M. Daryae. 2018. Investigation of Installation Consecutive Obstacles on the Characteristics and Controlling of Density Current Body. Journal of Civil and Environmental Engineering, 48(92): 87-95.
- 21 Farizan, A., S. Yaghoubi, B. Firoozabadi, and H. Afshin. 2019. Effect of an obstacle on the depositional behaviour of turbidity currents. Journal of Hydraulic Research, 57(1): 75-89.
- 22 Derakhshannia, M., M. Ghomeshi, S.S. Eslamian, and S.M. Kashefipour. 2021. Investigation of the Effect of Permeable Obstacle on the Head Flux of Salt Density Current. Water and Irrigation Management, 11(1): 1-14.
- 23 Ellison, T. and J. Turner. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. Journal of Fluid Mechanics, 6(3): 423-448.
- 24 Beni, H.D., S. Kashefipour, and M. Ghomeshi. 2018. Experimental Investigation of Water Entrainment of Salty Density Current Over the Bed with Cubic Roughness.
- 25 Daryae, M., S.M. Kashefipour, And M. Ghomshi. 2016. Experimental Study of the Effect of Roughness on the Velocity and Concentration Profiles of Sedimentary Density Current Body. Irrigation Sciences and Engineering, 37(3): 21-31.

