



Velocity structure in interflow density currents

Mohadeseh Sadeghi Askari¹, Mehdi Ghomeshi^{2,*}

¹Ph.D, Shahid Chamran University, Department of Hydraulic structures, Ahwaz, Iran.

² Professor, Shahid Chamran University, Department of Hydraulic structures, Ahwaz, Iran.

ABSTRACT: Gravity currents, also known as density currents, or turbidity currents, are happened by the density difference between the flow and its ambient fluid. The density difference can be due to suspended particles, chemicals, soluble materials, and temperature differences. In dams reservoir ambient fluid, usually has a vertical stratification. When the gravity current arrived to ambient fluid, in the position that density of both gravity current and ambient fluid is equal the gravity current abandon the bed and flows in ambient fluid horizontally. Therefore the density current into this reservoir maybe intrude such as interflow density current.

This study investigates the inter flow density current in a stratification ambient. For achieve to the objectives of this study, experiments were carried out at a flumes with 9 meters long by 4 discharge 1, 1.5, 2 and 2.5 l/s, and 4 concentration 5, 10, 15 and 20 mg/l, that created density 1003.2, 1006.3, 1009.4 and 1012.5 respectively. Stratification was made by mixture water and salt with vertical gradient.

The investigation of velocity profiles showed that the flow is self-similar and velocity fluctuations Continues maximum up to 2.5 times greater than current thickness in the lower layer. The front velocity of currents in stratified environments increases at first then sizeable decreases. It shows that stratified can limited the flow movement. In each three slope, increasing of discharge and concentration increase velocity head of density current in stratified environment. As the slope increases, the current velocity increases at the underflow stage, and in the interflow stage, the slope does not have much effect on the current velocity. Interflow Travel Time decrease in increasing of discharge and concentration. Density current in weaker stratified can travel more distance in the slope and separate latter from the bed.

Review History:

Received: 2019-03-09

Revised: 2019-09-11

Accepted: 2019-09-12

Available Online: 2019-09-14

Keywords:

Concentration Gradient

Density Current

Interflow

Stratification

1. INTRODUCTION

Gravity currents, also known as density currents, or buoyancy currents, are happened by the density difference between the flow and its ambient fluid. Gravity currents are one of the most active atmospheric and oceanic currents that are a subset of stratified currents. Those currents which two fluids are in contact with each other trough an intersection are named stratified currents. In such flows the intersection can be considered a surface whose fluid characters such as density are different on other sides. Due to the difference in interflow density with the reservoir, the current can move below, above, or through the ambience fluid, which is called the underflow, overflow and interflow, respectively.

The complex dynamics of density currents have attracted many researchers for many years. Imberger et al. (1976), Lowe et al. (2002), Ahlfeld et al. (2003), Sutherland et al. (2004) are the researchers who have investigated the interflow in their experiments.

The deformation of underflow to interflow may cause initial mixing and entrainment. Therefore, the density

*Corresponding author's email: m.ghomeshi@yahoo.com

of interflow and underflow may be the same. Wells and Nadarajah (2009) and Sangdo and Julien (2014) examined the entrainment of density current.

Zhang et al. (2015) investigated the effect of thermal stratification of the reservoir on the transient time of interflow.

He et al. (2016) investigated the effect of linear stratification of the ambience flow and bed slope on the hydrodynamics of interflow.

2. METHODOLOGY

The experiments are performed in a 9 meter long flume, 66 cm high and 35 cm wide. At different levels and in the floor at the end of the flume, the pipes were installed for discharge. A gate was installed at 80 cm from the beginning of the flume. To provide ambient fluid, first, the salt water tank was filled up of water and then salt added to the reservoir. Its density was measured after complete mixing. Flume was filled of ambient fluid in several times. After measure the density of ambient fluid gravity current was flow to ambient fluid. In this station the concentration and velocity profile was measured.



For record the velocity profile was used a DOP2000 velocity meter.

3. PARAMETERS

To investigate velocity profiles, because the intersection between the density flow and ambient flow is not easily recognizable, average velocity (\bar{U}) and height (\bar{H}) values have been used [8]. Using of the momentum equation in the condensed flow:

$$\bar{U} = \frac{\int_0^{\infty} u(z) dz}{\int_0^{\infty} u(z)^2 dz} \quad (1)$$

$$\bar{H} = \frac{\int_0^{\infty} u(z) dz^2}{\int_0^{\infty} u(z)^2 dz} \quad (2)$$

Where velocity profile $u(z)$ record by velocity meter and dz is height difference between points which $u(z)$ is been recorded at them.

The distance of probe from inlet gate has been shown in Table 1.

Table 1. Probe's distance from inlet gate (cm)

Probe number	1	2	3	4	5	6	7
Distance	95	185	275	385	480	550	620

Table 2. Comparison between maximum and average value

Experimental condition	Case	h_{max}/h	u_{max}/U	
Unstratified environment under flow	Altinakar et al. (1996)[9]	0.3	1.3	
	Garsia (1994)[10]	0.3	1.3	
	Hosseini et al. (2006)[11]	0.384	1.3	
	Khavasi (2012)[12]	0.268	1.28	
Stratified environment under flow	The present study	Probe1	0.33	1.31
Stratified environment interflow		Probe4	0.94	1.29
		Probe7	1.45	1.32

4. RESULTS AND DISCUSSION

Dimensionless velocity profile are compared with each other. The relationship between maximum value and average one in comparison with other researchers has been bring in Table 2. Moreover relationships for dimensionless velocity profile are fund through these experiments. The formation of equation is same as Altinakar equation for jet and wall region in underflow density current.

In addition, the head velocity of flow in the layered ambience and interflow differs from head velocity in the uniform flow and underflow mode. In underflow, density current moves much faster and the head velocity reaches its peak then decreases slowly. In the layered fluid, the head velocity first increases and then decreases substantially, meaning that the layering can limit the movement of the flow.

Since the passing time of density flow in the layered ambient is especially important in predicting the process of contamination or turbulent flow into the reservoir, using SPSS software and the dimensionless parameters for time prediction of flow passing is developed.

5. CONCLUSIONS

In this study, the velocity structure of the density current with 48 experiments was investigated. Examination of the dimensional profiles velocity showed that these profiles overlapped, so it can be concluded that the flow is self-similar.

Also, the maximum velocity value in the dimensionless velocity profiles at each cross section showed that this value is about 1.3 times the average velocity in all currents. Comparing this value with the work of other researchers shows considerable similarity

The shape of the dimensionless velocity profiles showed that for the underflow in the layered ambient, the equation of velocity profile in the wall region is the same as the underflow flow in the uniform ambience with $n = 5$.

As the discharge increases and the concentration increases, the passing time decreases. Increasing the concentration also reduces the layering parameter (R). Density flow at a weaker stratification (smaller R) can slip further and separate later from the bed.

6. REFERENCES

- [1] J. Imberger, R. Thompson, C. Fandry, Selective withdrawal from a finite rectangular tank, *Journal of fluid mechanics*, 78(3) (1976) 489-512.
- [2] R.J. Lowe, P. Linden, J.W. Rottman, A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current, *Journal of Fluid Mechanics*, 456 (2002) 33-48.
- [3] D. Ahlfeld, A. Joaquin, J. Tobiason, D. Mas, Case study: Impact of reservoir stratification on interflow travel time, *Journal of hydraulic engineering*, 129(12) (2003) 966-975.
- [4] B.R. Sutherland, P.J. Kyba, M.R. Flynn, Intrusive gravity currents in two-layer fluids, *Journal of Fluid Mechanics*, 514 (2004) 327-353.
- [5] M. Wells, P. Nadarajah, The intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies, *Journal of Physical Oceanography*, 39(8) (2009) 1935-1947.
- [6] X.-f. Zhang, S. Ren, J.-q. Lu, X.-h. Lu, Effect of thermal

- stratification on interflow travel time in stratified reservoir, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 16(4) (2015) 265-278.
- [7] Z. He, L. Zhao, T. Lin, P. Hu, Y. Lv, H.-C. Ho, Y.-T. Lin, Hydrodynamics of gravity currents down a ramp in linearly stratified environments, *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(3) (2016) 04016085.
- [8] T. Ellison, J. Turner, Turbulent entrainment in stratified flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 6(3) (1959) 423-448
- [9] M. Altinakar, W. Graf, E. Hopfinger, Flow structure in turbidity currents, *Journal of Hydraulic Research*, 34(5) (1996) 713-718.
- [10] M. Garcia, G. Parker, Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C3) (1993) 4793-4807.
- [11] S. Hosseini, A. Shamsai, B. Ataie-Ashtiani, Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter, *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(1) (2006) 59-68.
- [12] E. Khavasi, H. Afshin, B. Firoozabadi, Effect of selected parameters on the depositional behaviour of turbidity currents, *Journal of Hydraulic Research*, 50(1) (2012) 60-69.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Sadeghi Askari, M. Ghomeshi. *Velocity structure in interflow density currents*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 637-640.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15923.6084](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15923.6084)





ساختار سرعت در جریان چگال میان گذر

محدثه صادقی عسکری^۱، مهدی قمشی^{۲*}

^۱ فارغ‌التحصیل دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
^۲ استاد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۱۸
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۶-۲۰
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۲۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۲۳

کلمات کلیدی:

جریان چگال
جریان میان گذر
گرادیان غلظت
لایه بندی

خلاصه: جریان های ثقلی که به آنها جریان های چگال یا جریان های غلیظ گفته می شود به دلیل اختلاف چگالی بین جریان و سیال پیرامون به وجود می آیند. اختلاف چگالی می تواند ناشی از ذرات معلق، مواد شیمیایی، مواد محلول و اختلاف درجه حرارت باشد. در مخازن سدها سیال پیرامون ممکن است دارای لایه بندی عمودی باشد. وقتی یک جریان چگال در یک سیال لایه بندی به سطح شناوری خنثی برسد از کف جدا می شود و داخل سیال پیرامون نفوذ میکند. لذا جریان های چگال ورودی به این مخازن ممکن است بصورت میان گذر ادامه مسیر دهند. این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی جریان چگال بصورت میان گذر در سیال پیرامون لایه بندی شده میپردازد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش آزمایش ها در فلولمی به طول ۹ متر با ۴ دبی ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه و ۴ غلظت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر که به ترتیب جریان با چگالی ۱۰۰۳/۲، ۱۰۰۶/۳، ۱۰۰۹/۴ و ۱۰۱۲/۵ گرم بر لیتر ایجاد می کردند، روی سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد انجام شد. بررسی پروفیل های سرعت نشان داد که جریان خود متشابه است و نوسانات سرعت حداکثر تا ۲/۵ برابر ضخامت جریان چگال در لایه زیرین ادامه مییابد. در سیال لایه بندی شده سرعت پیشانی بعد از افزایش کاهش قابل ملاحظه ای مییابد، این بدان معنی است که لایه بندی می تواند حرکت جریان را محدود کند. افزایش غلظت و دبی در هر سه شیب سبب افزایش سرعت پیشانی جریان چگال در سیال لایه بندی شده، می شود با افزایش شیب سرعت پیشانی جریان در زیرگذر افزایش مییابد و در مرحله میان گذر تغییر شیب تاثیر زیادی روی سرعت جریان ندارد. با افزایش دبی و افزایش غلظت زمان گذر جریان کاهش می یابد. جریان چگال در لایه بندی ضعیف تر می تواند فاصله بیشتری را روی شیب طی کند و دیرتر از بستر جدا شود.

۱-مقدمه

که خواص سیال نظیر چگالی در دو طرف آن متفاوت باشد. به دلیل اختلاف چگالی جریان ورودی با مخزن دریافت کننده جریان، جریان چگال می تواند در زیر، بالا یا میان سیال محیطی حرکت کند، که به ترتیب جریان زیرگذر، روگذر یا میان گذر نامیده می شوند. با توجه به اینکه در اغلب این جریان ها، وجود ذرات اجتناب ناپذیر است، جریان های گرانشی معمولاً حاوی ذره هستند، که آشفتگی موجود در جریان عامل معلق شدن ذرات می شود. این جریان ها را معمولاً جریان های کدر یا گل آلود می نامند. از نمونه های بارز جریان های چگال در طبیعت، ورود جریان های گل آلود به مخزن سدها می باشد.

جریان های گرانشی^۱ جزء پررخدادترین جریان های اتمسفری و اقیانوسی هستند که زیر مجموعه ای از جریان های لایه بندی شده، می باشند. به آن دسته از جریان هایی که دو سیال با سطح مشترک با یکدیگر در تماس هستند، جریان های لایه بندی شده گفته می شود. در چنین جریان هایی سطح مشترک را می توان سطحی در نظر گرفت

1 - Gravity Current

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.ghomeshi@yahoo.com



عمق نسبی است. آنها رابطه ای برای پیش بینی سرعت پیشروی جریان چگال در یک محیط دولایه ارائه کردند. بیشتر جریان های میان گذر متقارن وقتی که $\Delta = 0$ و $\varepsilon = 0$ و باشند، اتفاق می افتند، در حالی که موردهای نامتقارن با $\varepsilon \neq 0$ اتفاق می افتند. برای جریان چگال متقارن رابطه ایشان با رابطه تحلیلی لو و همکاران (۲۰۰۲) برابر است [۴].

تغییر شکل جریان زیرگذر به میان گذر ممکن است باعث اختلاط اولیه و درون آمیختگی شود. بنابراین چگالی جریان زیرگذر و میان گذر ممکن است یکسان باشد. ولز و ناداراجاح^۸ (۲۰۰۹) دریافتند که نرخ اختلاط (E) در موقعیت تغییر شکل جریان از زیرگذر به میان گذر موثر است. آنها مطالعات آزمایشگاهی برای توصیف عمق جداسازی انجام دادند، و رابطه ای را بین عمق جداسازی و شدت اختلاط، فلاکس شناوری و فرکانس شناوری جریان چگال ارائه دادند. همچنین دریافتند که عمق جدایی به تغییرات سیال ورودی حساسیت کمتر و نسبت به تغییرات لایه بندی حساسیت بیشتری را نشان می دهد. به عنوان مثال اگر فلاکس شناوری جریان چگال دو برابر شود در حالی که لایه بندی ثابت بماند ۲۵٪ عمق جدایی افزایش می یابد در حالی که دو برابر کردن لایه بندی ۵۰٪ عمق جدایی را کاهش می دهد [۵].

سانگدو و جولین^۹ (۲۰۱۴) دینامیک پخش جریان چگال وارد شونده به مخزن سد آیمها^۱ را با استفاده از یک کد دینامیک سیالات محاسباتی Flow-3D مورد بررسی قرار دادند. یک مدل آشفتگی $k - \varepsilon RNG$ که در چارچوب متوسط رینولدزی ناوبر استوکس طرح شده است، برای مطالعات میدانی بکار بردند و مدل ساخته شده را با داده های میدانی تست کردند. آنها نتیجه گرفتند که مدل عددی آنها تغییر شکل مکانی و زمانی جریان میان گذر در مخزن سد را بطور صحیح پیش بینی می کند.

زانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۵) به بررسی اثر لایه بندی حرارتی مخزن بر روی زمان گذر جریان میان گذر پرداختند. آنها رابطه ای را بین فرکانس شناوری و زمان گذر جریان میان گذر به لحاظ تئوری بر پایه رابطه برنولی و اصل بقای انرژی بدست آوردند. آنها برای صحت سنجی رابطه پیشنهاد شده، شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی

مخزن سد تحت تاثیر دما و یا غلظت مواد محلول لایه بندی شده است. به عنوان مثال در مخزن سد گتوند تحت تاثیر انحلال نمک موجود در کف و دیواره مخزن، لایه بندی شوری ایجاد شده است. وجود این لایه بندی سبب میان گذر شدن جریان ورودی به مخزن سد می شود.

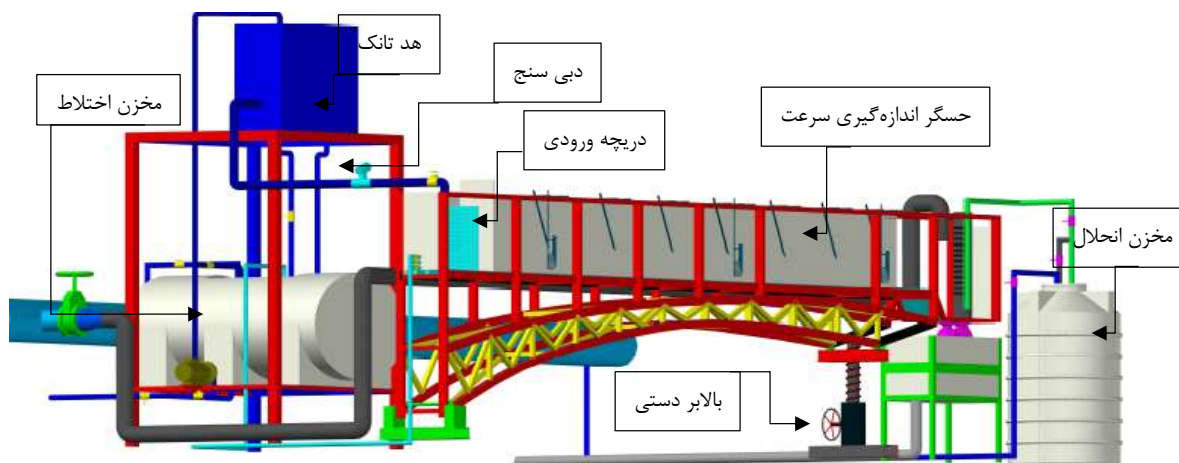
دینامیک پیچیده ی جریان های چگال سالهاست که محققین زیادی را به خود جذب کرده است. ایمبرگر و همکاران^۱ (۱۹۷۶) پارامتر بی بعد R را برای پیش بینی دینامیک جریان میان گذر معرفی کردند، آنها فرض کردند جریان میان گذر شناوری طبیعی و شرایط متقابل بین جریان زیرگذر و جریان روگذر را دارد. با فرض کم بودن مومنتم جریان ورودی، پارامتر بی بعد R را بصورت $R = F_i Gr^{1/3}$ معرفی کردند، F_i عدد فرود داخلی جریان و تابعی از فرکانس شناوری N (بسامد زاویه ای جسمی که در یک محیط پایدار استاتیکی نوسان میکند) است. Gr عدد گراشوف^۲ و تابعی از عدد پرانتل می باشد [۱]. لو و همکاران^۳ (۲۰۰۲) سرعت پیشانی جریان میان گذر را با استفاده از فرض پایداری انرژی جریان و رابطه برنولی بر روی خط جریان بدست آوردند. آنها همچنین پیش بینی کردند عمق جریان میان گذر در هر لایه نزدیک به نصف عمق لایه سیال پیرامون خواهد بود [۲].

آلفلد و همکاران^۴ (۲۰۰۳) مطالعه موردی بر روی رابطه بین زمان عبور جریان میان گذر و لایه بندی مخزن انجام دادند. مدل شبیه سازی آنها برای مخزن سد واچوست^۵ در ماساچوست^۶ کالیبره و اعتبار سنجی شده است. آنها بیان کردند که رابطه خطی بین متوسط زمان عبور جریان میان گذر و درجه لایه بندی وجود دارد [۳].

برای تعریف انواع جریان های مرکب (مخلوط دوگانه ای که در یک زمان در دو فاز قرار دارد) در محیط پیرامون دو لایه، سه پارامتر بی بعد $(\Delta, \sigma, \varepsilon)$ توسط ساترلند^۷ و همکاران (۲۰۰۴) معرفی شد. پارامتر ε مربوط به اختلاف چگالی بین جریان چگال و لایه های سیال پیرامون است. σ پارامتری است که برای توصیف تفاوت نسبی چگالی بین لایه های بالایی و لایه های پایینی استفاده می شود. پارامتر Δ

- 1 - Imbergr et al.
- 2 - Grashof
- 3 - Lowe et al.
- 4 - Ahlfeld
- 5 - Wachusett
- 6 - Massachusetts
- 7 - Sutherland et al.

8 - Wells and Nadarajah
9 - Sangdo and Julien
10 - Imha
11 - Zhang et al.



شکل ۱. شماتیک دستگاه آزمایش

Fig. 1. Schematic view of experimental setup

رانس پیوسته^۳ (دبی ثابت در طول آزمایش) مورد نیاز مهندسیین بخصوص در حوزه‌ی مدیریت منابع آب و کشاورزی و سدسازی می‌باشد که تا کنون هیچ گونه مطالعه‌ای در این زمینه صورت نگرفته است. روبه‌رو شدن کشور با مساله سد گتوند نیاز به شناخت هیدرولیک جریان چگال میان‌گذر با دبی پیوسته را چند برابر کرده است. از این رو این پژوهش به بررسی سرعت جریان چگال میان‌گذر با دبی ثابت در طول آزمایش بصورت علمی و دقیق می‌پردازد.

درک تکامل جریان‌های چگال اهمیت فوق‌العاده‌ای برای ساخت و سازهای دریایی، زیرساخت‌های مصب رودخانه‌ها، پیش‌بینی شرایط جوی و تعیین عمر مفید سدها دارد. هر چند بسیاری از مطالعات علمی، حرکت جریان‌های چگال را در سیال پیرامون غیر یکنواخت بررسی کرده‌اند، اما تکامل آنها در یک سیال طبقه‌بندی شده ناشناخته است. لذا در این پژوهش به منظور شناخت دقیق ساختار سرعت جریان چگال میان‌گذر در سیال پیرامون لایه‌بندی شده آزمایش‌های این پژوهش صورت گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

برای شبیه‌سازی جریان چگال، آزمایش‌ها در آزمایشگاه دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، در فلومی به طول ۹ متر، عرض ۰/۳۵ متر و ارتفاع ۰/۶۶ متر دارای اسکلت فلزی، دیواره‌ها از جنس شیشه و بستر از جنس پلکسی‌گلاس انجام شده است. در ابتدای فلوم محفظه‌ای به طول یک متر جهت نگهداری جریان چگال

انجام دادند. برای آزمایش‌های تجربی، حرکت جریان میان‌گذر در یک کانال کم عمق با آزادسازی جریان چگال داخل سیال لایه‌بندی شده مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها از یک مدل آشفتگی $RNG - 2D$ $K - \epsilon$ برای شبیه‌سازی عددی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی، رابطه آنها را تأیید کرد. این رابطه برای پیش‌بینی زمان حرکت آلودگی در مخازن و کمک در کنترل آلودگی می‌تواند مفید باشد [۷].

هی و همکاران^۱ (۲۰۱۶) به بررسی اثر لایه‌بندی خطی محیط پیرامون و شیب بستر بر روی هیدرودینامیک جریان چگال پرداختند. آنها از یک دوربین فیلمبرداری سرعت بالا و سرعت سنج PIV جهت آنالیز پارامترهای جریان چگال استفاده کردند. ایشان دریافتند که سرعت پیشانی جریان چگال هم برای محیط لایه‌بندی شده و هم برای محیط لایه‌بندی نشده در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. اختلاف چگالی زیاد که باعث می‌شود سیال چگال روی بستر پیش رود و دیرتر وارد سیال پیرامون شود، کاهش شدید سرعت پیشانی را به همراه دارد. آنها رابطه‌ای را برای پیش‌بینی سرعت پیشانی در حالی که روی شیب پیش می‌رود و رابطه‌ی دیگری را برای تعیین مکان پیشانی با در نظر گرفتن لایه‌بندی سیال پیرامون ارائه دادند [۸].

پژوهش‌های انجام شده، جریان چگال را بصورت آزاد سازی لحظه‌ای^۲ (سیال چگال با حجم مشخصی وارد سیال لایه‌بندی می‌شود) بررسی کرده‌اند. شناخت هیدرولیک جریان چگال با منبع

1 -He et al.

2 -lock-release experiment

3 - Constant inflow

ورودی از مخزن تعبیه شده است. دریچه‌ای به ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و هم‌عرض فلوم در انتهای محفظه نصب شده است. شکل ۱ شماتیک دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

جهت ایجاد سیال پیرامون با لایه بندی از محلول آب و نمک استفاده شد. برای ایجاد سیال شور، ابتدا مخزن انحلال تا حجم مشخصی آبگیری می‌شد. جرم نمک مورد نیاز اندازه‌گیری و سپس به تدریج به مخزن انحلال اضافه می‌شد. همزمان پمپ لجن-کش و هم‌زن برقی داخل مخزن انحلال روشن می‌شد. پس از رسیدن به EC مورد نظر، محلول آب و نمک به درون فلوم پمپ می‌شد. در تمام آزمایش‌ها محلول آب و نمک از انتهای فلوم و با حجم معینی بسته به شیب مورد آزمایش، وارد فلوم می‌شد.

پس از ورود آب و نمک انحلال یافته به درون فلوم، یونولیتی مشبک هم‌عرض فلوم و با طول تقریباً ۱ متر جهت جلوگیری از اختلاط آب زلال با سیال شور، روی سیال موجود در فلوم قرار می‌گرفت. سپس شیرفلکه‌ای که مخصوص ورود آب زلال به فلوم بود و در انتهای فلوم قرار داشت به آرامی باز می‌شد و آب زلال وارد فلوم می‌شد. بعد از تشکیل لایه بندی، مقدار EC و دما در ۷ مقطع مختلف از فلوم به فواصل یک متری، از ابتدای دریچه تا انتهای فلوم با فاصله‌های ۲ سانتی‌متری در عمق توسط EC متر دیجیتال برداشت شد. به منظور تهیه سیال رسوبی از ذرات سیلیس با قطر متوسط ۷ میکرون و جرم مخصوص ۲/۶۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد. جهت ایجاد جریان چگال در ابتدا مخزن اختلاط تا حجم مشخصی آبگیری می‌شد سپس با توجه به غلظت مورد نظر، مقدار مشخصی رسوب که از قبل اندازه‌گیری شده بود، بصورت پیوسته به مخزن اختلاط اضافه می‌شد. همزمان با ریختن رسوب در مخزن، هم‌زن درون آن روشن می‌شد تا عمل اختلاط آب و رسوب انجام گیرد. پس از آماده شدن سیال رسوبی، سیال چگال به هدتانک پمپ می‌شد. سپس هم‌زن برقی متصل به بالای هدتانک روشن می‌شد تا از ته‌نشینی رسوبات در هدتانک و کاهش غلظت سیال رسوبی در حین آزمایش جلوگیری به عمل آید.

جهت ورود سیال چگال به فلوم و ایجاد جریان میان‌گذر شیر ورودی سیال چگال به فلوم که در مسیر خط لوله ورود جریان از هدتانک به فلوم و بعد از دبی‌سنج قرار دارد، باز شده تا سیال چگال وارد محفظه پشت دریچه شود. سپس شیرهای ابتدایی محفظه باز

و جریان ورودی به محفظه به مخزن اختلاط برگشت داده می‌شد. تنظیم دبی مورد نظر آزمایش با قرائت دبی‌سنج و تنظیم آن از طریق شیر مذکور صورت می‌گرفت. بعد از ورود سیال به محفظه پشت دریچه، دمای سیال چگال پشت دریچه و سیال لایه بندی درون فلوم اندازه‌گیری می‌شد. پس از تنظیم دبی، شیرهای ابتدای محفظه بسته می‌شد. و با برابر شدن سطح سیال چگال و سیال لایه بندی در دو طرف دریچه، اهرم دریچه به صورت یکنواخت و سریع بالا برده می‌شد تا دریچه باز شود و سیال چگال رسوبی وارد فلوم گردد.

قبل از باز شدن دریچه دستگاه سرعت‌سنج، روشن گردیده و در حالت آماده به کار تنظیم می‌شد. در تمام آزمایش‌ها بعد از گذشت زمان مشخص عملیات داده‌برداری دستگاه شروع می‌شد. دستگاه حدود ۲۰۰ نقطه در هر عمق را با فاصله دو میلی‌متری در ۲۰ ثانیه در هر ایستگاه ثبت می‌نمود.

برای اینکه رأس جریان رسیده به انتهای فلوم برگشت نکند، لوله و دبی خروجی انتهای فلوم به گونه‌ای انتخاب می‌شد تا ضمن خروج رأس جریان چگال، تراز سطح سیال پیرامون همواره ثابت باقی بماند. جهت اندازه‌گیری چگالی جریان و غلظت آن از سه سیفون در طول فلوم به فاصله ۱، ۴ و ۶/۵ متر از دریچه ورودی جریان چگال، استفاده شد. در جریان میان‌گذر، به دلیل احتمال ته‌نشین شدن رسوبات در طول لوله‌های انتقال جریان رسوبی و کف مخزن، غلظت ورودی به محفظه پشت دریچه دو مرتبه در طول آزمایش برداشت شد و میانگین آن به عنوان غلظت ورودی جریان چگال در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است اختلاف غلظت‌های برداشت شده کمتر از ۰/۵ گرم در لیتر می‌باشد. با عبور جریان از مقاطع نصب سیفون‌ها، نمونه‌برداری غلظت از بدنه جریان شروع می‌شد. پیروفیل‌های سرعت جریان، با توجه به داده‌های دستگاه سرعت‌سنج میانگین‌گیری و سپس رسم شدند، اختلال‌های موجود در پیروفیل‌های برداشت شده به وسیله کدنویسی در برنامه متلب حذف شد. سپس پیروفیل‌ها آماده تجزیه و تحلیل شدند. شکل ۲ نمایی از آزمایش در حال اجرا را نشان می‌دهد.

۱-۲- ساختار جریان چگال

برای بررسی پیروفیل‌های سرعت چون فصل مشترک بین جریان چگال و سیال پیرامون به راحتی قابل تشخیص نیست، از مقادیر متوسط سرعت (\bar{U}) و ارتفاع (\bar{H}) استفاده شده است. [۹] با



شکل ۲: آزمایش در حال اجرا در سیال پیرامون لایه بندی شده

Fig. 2. Running experiment in stratified flow

$$g' = \frac{g}{\rho_a} \frac{\int_0^{\infty} \Delta\rho(z)u(z)dz}{\int_0^{\infty} u(z)dz} \quad (3)$$

رابطه (۳) بدست می‌آید.

$\Delta\rho(z)$ اختلاف چگالی بین دو نقطه در امتداد قائم است. پارامتر بی بعد R جهت نشان دادن اختلاف چگالی جریان با سیال پیرامون استفاده می‌شود. پارامتر لایه بندی با رابطه (۴) تعریف شود.

$$R = \frac{\rho_B - \rho_T}{\rho_d - \rho_T} \quad (4)$$

که در این رابطه ρ_B چگالی سیال پیرامون در کف، ρ_T چگالی سیال پیرامون در سطح و ρ_d چگالی جریان است. اگر $R < 1$ لایه بندی ضعیف و اگر $R > 1$ لایه بندی قوی محسوب می‌شود. نسبت نیروی شناوری به اینرسی جریان را عدد ریچاردسون می‌نامند که با معادله (۵) بیان می‌شود:

$$Ri = \frac{g'H \cos(\theta)}{U^2} \quad (5)$$

H و U به ترتیب سرعت و ارتفاع به دست آمده از رابطه (۱) و (۲) می‌باشند. θ زاویه شیب کف فلوم است، g' نیز از معادله (۳) به دست می‌آید.

ترنر^۱ (۱۹۷۹) عنوان نمود که لایه بندی پایدار در یک جریان لایه بندی شده زمانی اتفاق می‌افتد که به طور کلی چگالی از کف به سمت بالا کاهش یابد. بنابراین عدد ریچاردسون محلی یا گرادیان عدد ریچاردسون برای نشان دادن نواحی از جریان است که دارای لایه بندی ناپایداری نسبت به کل جریان هستند. اگر $Ri_g \geq 0.25$ جریان دارای لایه بندی پایدار است. لایه بندی پایدار به معنی عدم تلاطم در جریان نمی‌باشد [۱۱].

استفاده از روابط بقای جرم و بقای مومنوم در جریان چگال داریم:

$$\bar{U} = \frac{\int_0^{\infty} u(z)^2 dz}{\int_0^{\infty} u(z) dz} \quad (1)$$

$$\bar{H} = \frac{\int_0^{\infty} u(z) dz}{\int_0^{\infty} u(z)^2 dz} \quad (2)$$

$u(z)$ سرعت متوسطی است که توسط دستگاه سرعت سنج ثبت می‌شود. dz اختلاف ارتفاع بین دو نقطه ای است که سرعت در آن دو ارتفاع توسط دستگاه سرعت سنج ثبت شده است. پروفیل سرعت بوسیله دستگاه سرعت سنج پروفایلر اکوستیک DOP2000 ثبت شده است. اندازه‌گیری سرعت در این دستگاه با روش اکوستیک و بوسیله حسگرهای ساطع و دریافت کننده فرکانس می‌باشد. پروفیل سرعت در هفت مقطع و روی خط مرکزی فلوم برداشت شده است [۱۰]. جدول ۱ فاصله حسگرهای اندازه‌گیری سرعت را از دریچه ورودی جریان چگال نشان می‌دهد.

در محیط‌هایی لایه بندی شده شتاب ثقل کاهش یافته g' از

جدول ۱. فاصله حسگرهای اندازه‌گیری سرعت از دریچه ورودی (cm)
Table 1. Distance of velocity probe from the inlet gate (cm)

Probe number	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
Distance	۹۵	۱۸۵	۲۷۵	۳۸۵	۴۸۰	۵۵۰	۶۲۰

جدول ۲. متغیرهای موجود در تحقیق حاضر
Table 2. Parameters in the present study

متغیر	نام متغیر	بعد
H	ارتفاع سیال پیرامون	L
h	ارتفاع متوسط جریان چگال	L
q	دبی جریان چگال	$L^2 T^{-1}$
U	سرعت جریان چگال	LT^{-1}
U_f	سرعت پیشانی جریان چگال	LT^{-1}
W_e	سرعت دخول سیال پیرامون به درون بدنه جریان چگال	LT^{-1}
S	شیب کف	-----
g	شتاب ثقل	LT^{-2}
ρ_c	چگالی جریان چگال	ML^{-3}
ρ_T	چگالی لایه بالایی سیال پیرامون	ML^{-3}
ρ_B	چگالی لایه پایینی سیال پیرامون	ML^{-3}
ν	ویسکوزیته کینماتیکی سیال	$L^2 T^{-1}$
T	زمان عبور جریان	T
X	فاصله جریان چگال از دریچه ورودی	L

۲-۲- آنالیز ابعادی

به منظور شناخت بهتر پارامترهای موثر در پدیده ی مورد مطالعه آنالیز ابعادی صورت گرفت. برای آنالیز ابعادی از روش δ باکینگهام استفاده شد. متغیرهای موجود در آنالیز ابعادی در جدول ۲ ارائه شده است.

پارامترهای لازم برای آنالیز ابعادی بصورت رابطه (۶) می باشد.

$$f(H, h, q, U, U_f, W_e, S, g, \rho_c, \rho_T, \rho_B, \nu, T, X) = 0 \quad (6)$$

با انجام آنالیز ابعادی و انتخاب h ، ρ_c و U به عنوان متغیرهای

تکراری در نهایت رابطه ۷ بدست می آید.

$$f\left(\pi_1 = \frac{U^2}{gh}, \pi_2 = \frac{Uh}{\nu}, \pi_3 = \frac{H}{h}, \pi_4 = \frac{\rho_B}{\rho_c}, \pi_5 = \frac{\rho_T}{\rho_c}, \pi_6 = \frac{q}{hU}, \pi_7 = \frac{W_e}{U}, \pi_8 = \frac{X}{TU}, \pi_9 = \frac{U_f}{U}, \pi_{10} = S, \pi_{11} = \frac{X}{H}\right) = 0 \quad (7)$$

با ترکیب اعداد بدون بعد π_4, π_5 رابطه پارامتر R بدست می آید.

با ترکیب اعداد بدون بعد π_{11} و π_3 و همچنین ترکیب عدد بدون

بعد π_1 و پارامتر R و با در نظر گرفتن $g' = g \frac{\rho_B - \rho_c}{\rho_c} * \frac{\rho_c - \rho_T}{\rho_B - \rho_T}$

رابطه ۷ به رابطه ۸ تبدیل می شود.

$$f\left(\pi_1 = \frac{U^2}{g'h}, \pi_2 = \frac{Uh}{\nu}, \pi_3 = \frac{X}{H}, \pi_4 = S, \pi_5 = \frac{X}{UT}, \pi_6 = \frac{q}{hU}, \pi_7 = \frac{W_e}{U}, \pi_9 = \frac{C}{\rho_c}, \pi_{10} = \frac{U_f}{U}, \pi_{11} = S\right) = 0 \quad (8)$$

با معکوس نمودن عدد بدون بعد π_1 در رابطه ۸ و ادغام عدد بدون

بعد π_{11} به شکل $\cos \theta$ به $\frac{g'h \cos \theta}{U^2}$ می رسیم که معرف عدد

ریچاردسون جریان چگال می باشد. از عدد بدون بعد π_6 به دلیل واحد بودن صرفنظر می شود. طبق روابط معرفی شده در قبل رابطه

۸ به صورت رابطه ۹ بیان می شود.

$$f\left(Ri, Re, R, E_w, \frac{X}{H}, \frac{C}{\rho_c}, \frac{X}{UT}, \frac{U_f}{U}\right) = 0 \quad (9)$$

۲-۳- بررسی توزیع سرعت بدنه جریان چگال

نحوه ی توزیع سرعت و غلظت در بدنه ی جریان چگال از مهمترین

مشخصات جریان است. توزیع عمومی سرعت و غلظت در بدنه جریان

چگال در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل h_{\max} درحقیقت ارتفاعی

است که در آن سرعت بیشینه می باشد یعنی: $u = U_{\max}$

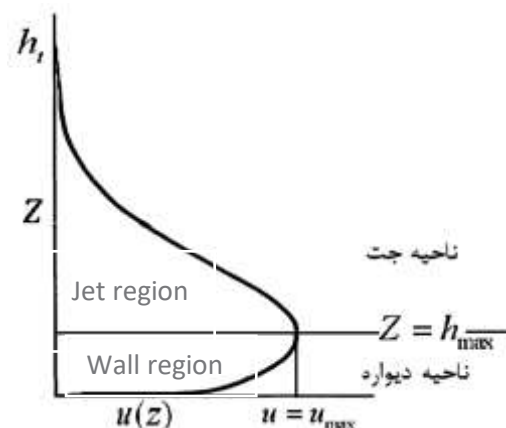
با چگالی $1003/2$ ، $1006/3$ ، $1009/4$ و $1012/5$ گرم بر لیتر ایجاد می‌کردند، روی سه شیب $2/5$ ، $3/25$ و 4 درصد انجام شد. هر آزمایش با نام QqCcSs نام‌گذاری شد که q ، c و s در هر آزمایش متغیر و به ترتیب عدد مربوط به دبی غلظت و شیب مورد آزمایش می‌باشند. برای مثال $Q1C5S2$ آزمایشی است که جریان چگال با دبی یک لیتر بر ثانیه و غلظت ۵ گرم بر لیتر روی شیب $2/5$ درصد انجام شده است. بررسی پروفیل‌های غلظت و مدت زمان انجام آزمایش‌ها پیشتر بررسی شده است [۱۴]. با توجه به متغیر بودن شیب فلوم و دبی جریان ورودی، ارتفاع جریان چگال و ضخامت سیال پیرامون در طول فلوم و در هر آزمایش متفاوت است. تمامی روابط ارائه شده در محدوده‌ی ضخامت جریان چگال بین ۶ تا ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع سیال پیرامون بین ۱۰ تا ۵۸ سانتی‌متر بدست آمده است.

۳- نتایج و بحث

جهت بررسی ساختار سرعت در جریان چگال میان‌گذر، با توجه به زیاد بودن تعداد حسگرهای اندازه‌گیری سرعت و از آنجا که روند تغییرات سرعت در تمامی حسگرها شبیه یکدیگر است در اینجا سه حسگر برای بررسی پروفیل سرعت در سه موقعیت از جریان انتخاب شدند یکی در ابتدای فلوم که در این مرحله جریان زیرگذر است (حسگر شماره ۱) و دیگری در وسط فلوم که در این مرحله تقریباً جریان از کف جدا شده و شروع به پیشروی در سیال پیرامون کرده است (حسگر شماره ۴) و در نهایت یکی در انتهای فلوم که در این موقعیت جریان بطور کامل میان‌گذر است (حسگر شماره ۷).

۳-۱ پروفیل‌های بی بعد سرعت

با وجود تغییر پروفیل‌های سرعت جریان‌های چگال در شرایط مختلف، این امکان وجود دارد که با بی‌بعد کردن پروفیل‌های سرعت



شکل ۳. شماتیک پروفیل‌های سرعت در جریان چگال [۱۲]

Fig. 3. Schematic of velocity profiles in density current

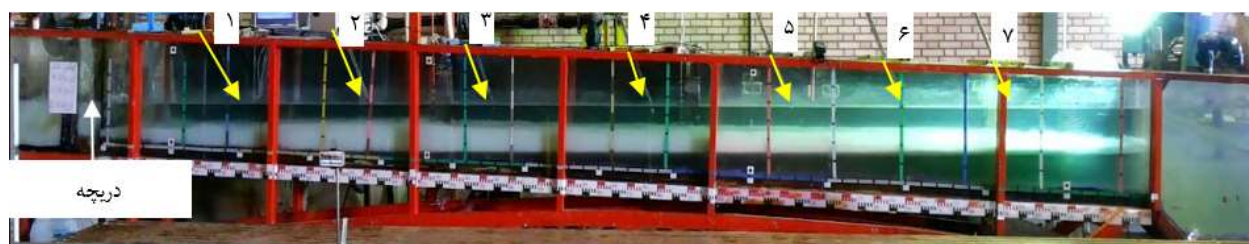
آلتیناکار و همکاران^۱ (۱۹۹۶) با توجه به پروفیل سرعت بدنه جریان چگال را به دو بخش ناحیه جت و ناحیه دیواره تقسیم کردند. در ناحیه دیواره یعنی $z < h_{max}$ ، آشفتگی جریان ناشی از بستر است. در ناحیه جت یعنی $z > h_{max}$ ، آشفتگی جریان ناشی از تنش برشی در سطح مشترک جریان چگال و سیال پیرامون می‌باشد. توزیع سرعت در ناحیه جت و دیواره بصورت زیر ارائه شده است.

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}}\right)^n \quad Z < h_{max} \text{ ناحیه دیواره} \quad (10)$$

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \exp\left[-\alpha_c \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}}\right)^m\right] \quad Z > h_{max} \text{ ناحیه جت} \quad (11)$$

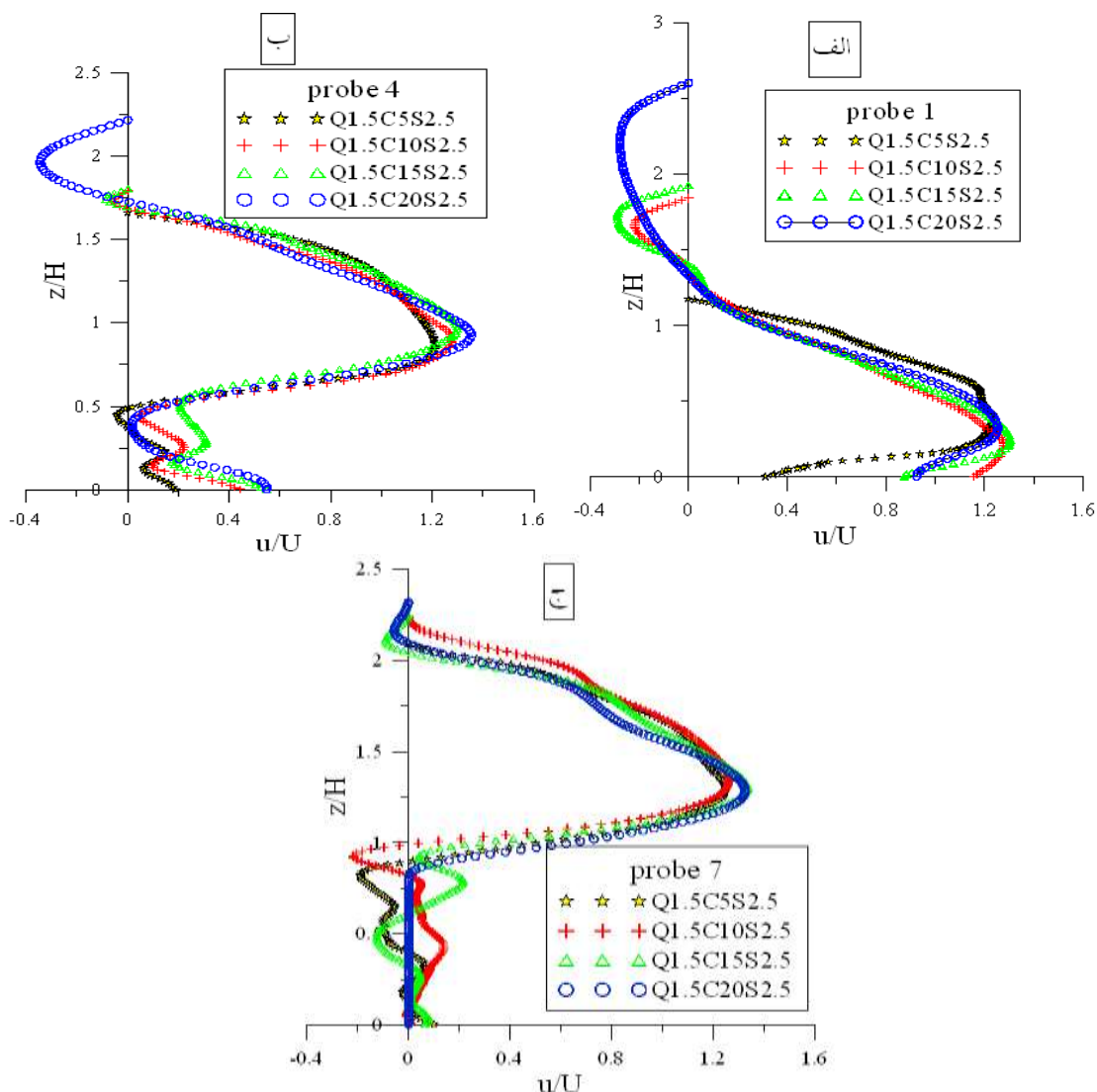
برای ناحیه دیواره $n = 1/6$ و برای ناحیه جت $m = 2$ و $\alpha_c = 1.412 \pm 0.065$ پیشنهاد شده است [۱۳].

در پژوهش حاضر ۴۸ آزمایش با دبی ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه و ۴ غلظت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر که به ترتیب جریان



شکل ۴. نمایی از آزمایش Q1.5C10S3.25 و موقعیت حسگرهای اندازه‌گیری سرعت
Fig. 4. A view of Q1.5C10S3.25 run and the position of the velocity probes

1 - Altinakar et al.



شکل ۵. پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده در سیال لایه بندی برای Q1.5S2.5 الف: جریان زیرگذر، ب و ج: جریان میان-گذر
 Fig. 5. Dimensional velocity profiles in stratified fluid for Q1.5S2.5 A. Underflow, B and C. Interflow

انجام شده توسط الیسون و ترنر^۲ (۱۹۵۹) [۹]، گارسیا و پارکر^۳ (۱۹۹۳) [۱۳] و گارسیا (۱۹۹۴) [۱۵] اشاره کرد.

به منظور بی‌بعد سازی پروفیل‌های سرعت، مقادیر سرعت و ارتفاع جریان با استفاده از روابط سرعت متوسط (۱) و ضخامت متوسط (۲) بی‌بعد شده‌اند.

شکل ۵ نتایج حاصل از بی‌بعد سازی پروفیل‌های سرعت در سه مقطع برای آزمایش‌های انجام شده با دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه و روی شیب ۲/۵ درصد نشان می‌دهد. مقادیر سرعت با U و ارتفاع با H بی‌بعد می‌شوند. نکته حائز اهمیت در این نمودارها این است که مستقل از

به کمک پارامترهای متوسط عمقی جریان چگال، پروفیل‌های بی‌بعد شده بر روی یکدیگر قرار گیرند. در واقع می‌توان گفت پروفیل‌های سرعت که با استفاده از پارامترهای متوسط عمقی بی‌بعد شده‌اند، مشابه یکدیگرند و جریان چگال خود متشابه^۱ است. رسیدن به این نکته که جریان خود متشابه است، از این لحاظ دارای اهمیت می‌باشد که می‌توان از صحت داده‌های آزمایشگاهی مطمئن شد، در صورتی که داده‌های آزمایشگاهی صحیح باشند، با توجه به اینکه جریان خود متشابه است، باید پروفیل‌های بی‌بعد شده‌ی سرعت روی هم قرار گیرند. محققین زیادی نیز کار مشابهی را برای روی هم انداختن پروفیل‌های سرعت صورت داده‌اند که برای نمونه می‌توان به کارهای

2 -Elison And Turner

3 -Garsia and Parker

1 -Self similar

جدول ۳. مقایسه مقادیر بیشینه جریان با مقادیر متوسط

Table 3. Comparison of maximum flow values with average values

u_{max}/U	h_{max}/h	محقق		شرایط آزمایش
۱,۳	۰,۳	آلتیناکار و همکاران [۱۱]		جریان زیرگذر سیال پیرامون لایه بندی نشده
۱,۳	۰,۳	گارسیا [۱۴]		
۱,۳	۰,۳۸۴	حسینی و همکاران [۱۶]		
۱,۲۸	۰,۲۶۸	خواصی [۱۷]		
۱,۳۱	۰,۳۳	حسگر شماره ۱	پژوهش حاضر	جریان زیرگذر سیال پیرامون لایه بندی شده
۱,۲۹	۰,۹۴	حسگر شماره ۴		جریان میان گذر سیال پیرامون
۱,۳۲	۱,۴۵	حسگر شماره ۷		لایه بندی شده

و ۰/۴ برای حسگرهای چهارم و هفتم بدست می‌آید. با پیشروی جریان میان گذر در طول فلوم ضخامت بدنه آن کاهش می‌یابد. از طرفی سرعت جریان نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه مقداری از جریان چگال وارد سیال پیرامون می‌شود. بنابراین علاوه بر درون آمیختگی برون آمیختگی نیز اتفاق می‌افتد، که به دلیل گسترده بودن بحث، این بخش بصورت جداگانه در پژوهشی دیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

جهت بررسی پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در دو ناحیه جت و دیواره، پروفیل‌های برداشت شده در مقاطع مختلف، نسبت به مقدار بیشینه کمیت مورد نظر بی‌بعد شدند. سپس قسمت جت و دیواره (قسمت بالایی و پایینی سرعت بیشینه) پروفیل‌های مورد نظر تفکیک شد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS معادله‌ی پروفیل سرعت در هر مقطع بدست‌آمده است.

برای جریان زیرگذر در سیال لایه بندی شده معادله پروفیل سرعت در ناحیه دیواره به صورت رابطه (۱۲) می‌باشد.

جدول ۴. مقادیر پیشنهاد شده برای n

Table 4. Suggested values for n

n	محقق	شرایط آزمایش
۶	آلتیناکار و همکاران [۱۱]	سیال پیرامون لایه بندی نشده
۵,۸	نورمحمدی و همکاران [۱۸]	
۶,۲	هی و همکاران [۸]	سیال پیرامون لایه بندی شده
۵	پژوهش حاضر	

شرایط آزمایش، نمودارها بر هم منطبق هستند. با مشاهده‌ی شکل ۵ (الف) مشخص می‌شود که پروفیل‌های سرعت در جریان چگال شبیه به پروفیل‌های سرعت جریان جت و دیواره هستند. در جریان چگال، سرعت بر روی بستر بر اساس اصل عدم لغزش روی دیواره، صفر است که با شیب تندی تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد. این سرعت بیشینه، پروفیل سرعت را به دو بخش پایینی و بالایی تقسیم می‌کند. پس از این مقدار بیشینه، سرعت به تدریج کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. البته برای برقراری بقای جرم در هر مقطع، در ارتفاع‌های بالاتر سرعت منفی نیز می‌شود. در شکل ۵ موارد ب و ج مشاهده می‌شود که در بخش بالایی پروفیل‌های سرعت شبیه جریان زیرگذر هستند اما در بخش پایینی مانند بخش بالایی سرعت از مقدار بیشینه به تدریج کم می‌شود تا به صفر برسد. در هر مقطع در ارتفاع پایین تر سرعت منفی نیز می‌شود. آلتیناکار (۱۹۹۶) و گارسیا (۱۹۹۴) گزارش کرده‌اند که مقادیر بیشینه جریان چگال مورد آزمایش‌شان روابطی با مقادیر متوسط عمقی دارند، که این روابط تقریباً برای همه‌ی آزمایش‌ها مقدار یکسانی را نشان می‌دهد. در آزمایش‌هایی که آلتیناکار انجام داده است، سرعت بیشینه در هر مقطع در همه‌ی جریان‌ها تقریباً ۱/۳ برابر سرعت متوسط است. روابط بین مقدار بیشینه و متوسط پارامترها برای تمامی آزمایش‌ها در مقایسه با کار سایر محققین در جدول ۳ ارائه شده است.

در حالت میان گذر به دلیل افزایش h_{max} مقدار پارامتر $\frac{h_{max}}{h}$ افزایش می‌یابد. اگر ارتفاع سیال شور در هر مقطع را از مقدار h_{max} آن مقطع کم شود، مقدار پارامتر $\frac{h_{max} - H_2}{h}$ به ترتیب ۰/۳۱۷

جدول ۵. مقادیر α و β

Table 5. The values of α and β

β	α	شرایط آزمایش
۱.۷۷	۰.۱۲	جریان زیرگذر ناحیه جت
۴.۵۱_۶.۶۷	۰.۰۸_۰.۰۸۴	جریان میان گذر ناحیه جت (بالایی)
-۶.۴۴_ -۹.۲	۰.۰۶۸_۰.۰۷۷	جریان میان گذر ناحیه جت (پایینی)

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(\frac{z}{z_{max}} \right)^{1/n} \quad (12)$$

مقدار n در مقایسه با پژوهش‌های قبلی در جدول ۴ آمده است. لازم به ذکر است این ضرایب مربوط به میانگین تمامی اطلاعات هستند.

تفاوت مقدار n در تحقیق حاضر با مقدار n ارائه شده توسط هی همکاران (۲۰۱۶) [۸] به این دلیل است که n جریان چگال در تحقیق حاضر دارای دبی ثابت در طول آزمایش است. در واقع جریان چگال با دبی ثابت در طول مدت آزمایش وارد فلوم شده است در حالی که محققین پیشین حجم مشخصی از جریان را که به صورت آنی وارد فلوم شده است بررسی کرده اند.

معادله پروفیل سرعت در حالت زیرگذر در ناحیه جت با رابطه (۱۳) بیان می شود. بررسی ها در این پژوهش نشان داد که معادله

پروفیل سرعت در حالت میان گذر در ناحیه جت (بالا و پایین) از رابطه (۱۳) پیروی می کند.

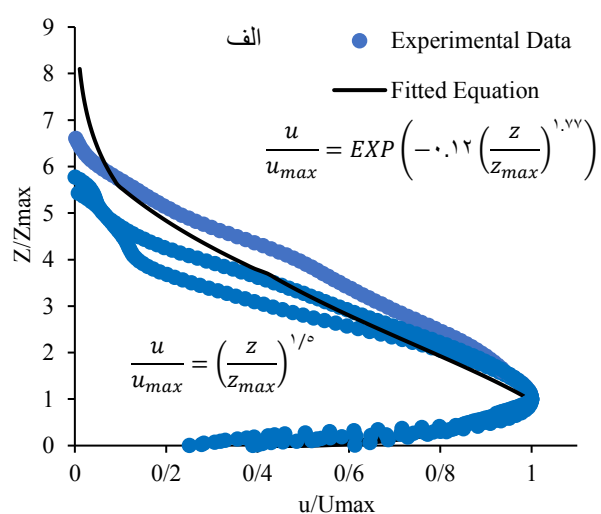
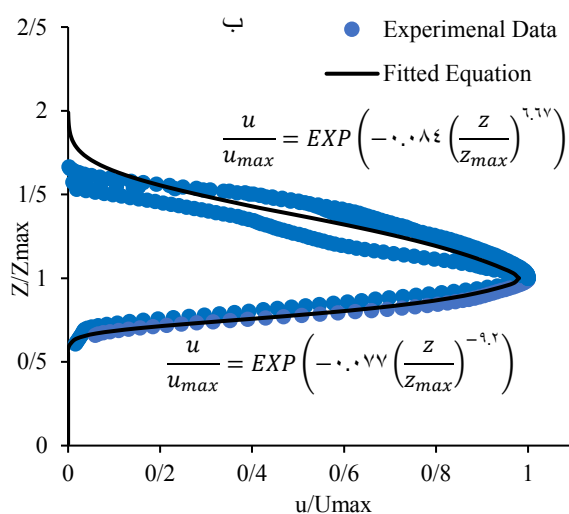
$$\frac{u}{u_{max}} = EXP \left(-\alpha \left(\frac{z}{z_{max}} \right)^\beta \right) \quad (13)$$

مقادیر α و β در جدول ۵ (میانگین تمامی اطلاعات) ارائه شده است. در جریان میان گذر پروفیل دیواره وجود ندارد و مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که پروفیل سطح تماس جریان با سیال زیرین مشابه پروفیل جت می باشد.

در شکل ۶ پروفیل بی بعد سرعت برای الف جریان زیرگذر و ب جریان میان گذر در سیال لایه بندی شده نشان داده شده است.

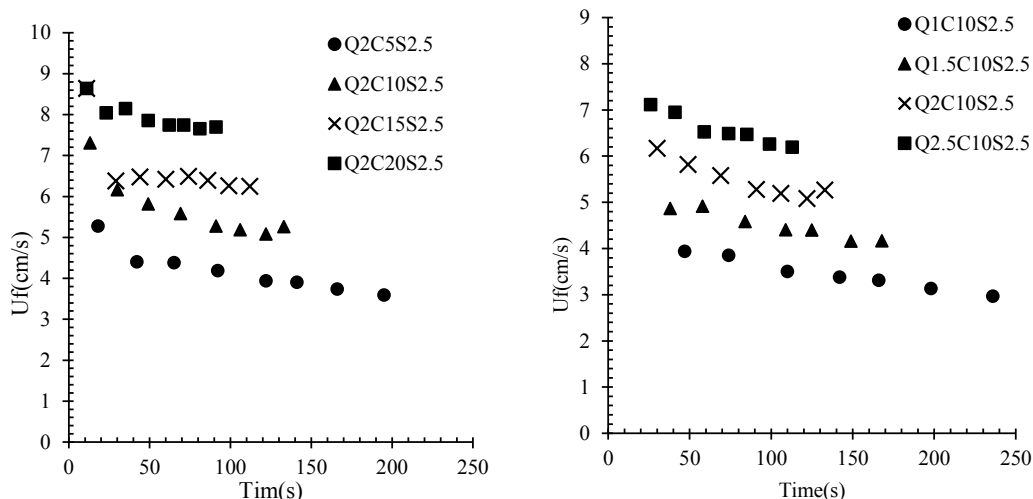
۲-۳- سرعت پیشانی

سرعت پیشانی جریان چگال در محیط لایه بندی شده و در حالت میان گذر با سرعت پیشانی جریان در محیط یکنواخت و حالت زیرگذر متفاوت است. در جریان زیرگذر، جریان چگال خیلی سریعتر حرکت می کند و سرعت پیشانی جریان سریع به اوج می رسد سپس به آرامی کاهش می یابد. در سیال لایه بندی شده سرعت پیشانی ابتدا افزایش و سپس کاهش قابل ملاحظه ای می یابد، این به این معنی است که لایه بندی می تواند حرکت جریان را محدود کند. شکل ۷ سرعت پیشانی جریان چگال را از فاصله ۲ تا ۷ متری از دریچه نسبت

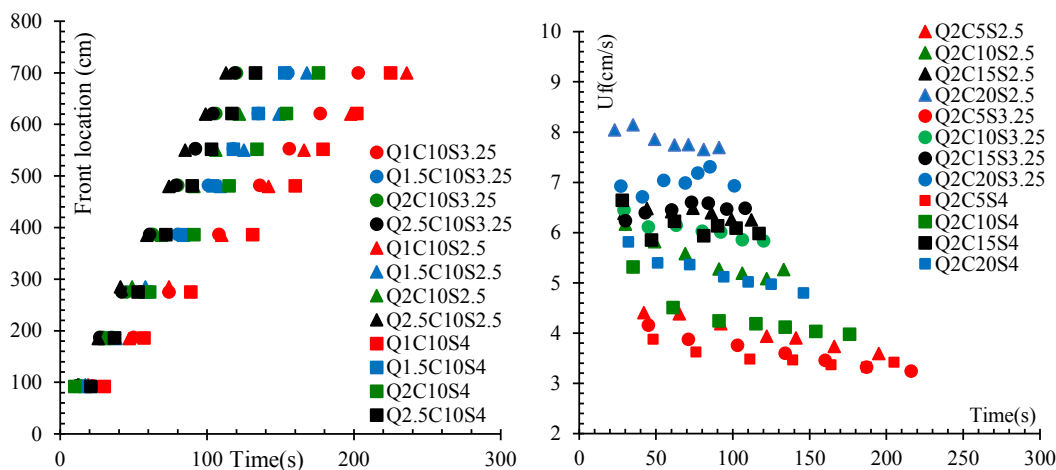


شکل ۶. پروفیل بی بعد شده سرعت در سیال لایه بندی شده، الف: جریان زیرگذر، ب: جریان میان گذر

Fig. 6. Dimensional velocity profile in stratified fluid, a. underflow, b. interflow



شکل ۷. سرعت پیشانی جریان نسبت به زمان
Fig. 7. Head velocity over time

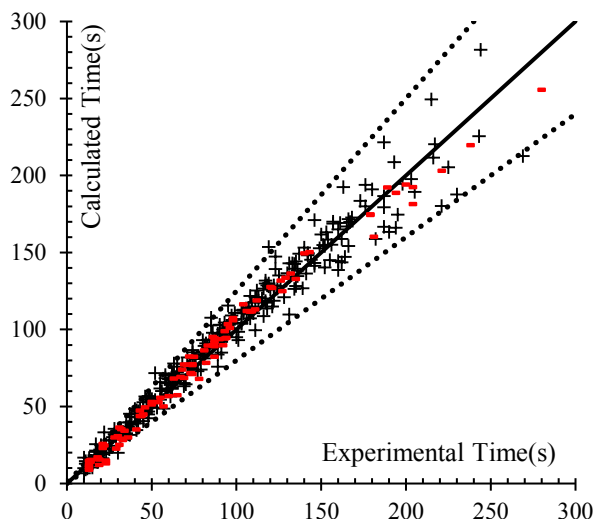


شکل ۸. سمت راست: موقعیت پیشانی، سمت چپ: سرعت پیشانی نسبت به زمان روی سه شیب مورد آزمایش
Fig. 8. Right. Head position, left. head velocity over time on the three slopes tested

شکل ۸ نشان می دهد که با افزایش شیب، سرعت پیشانی جریان در حالت میان گذر، کاهش یافته است. به این دلیل که در مرحله ی زیرگذر، با افزایش شیب، نیروی محرک جریان چگال افزایش می یابد. افزایش نیروی محرک سبب افزایش درون آمیختگی و در نتیجه باعث اتلاف مومنتوم می شود. تعادل اثر ترکیبی این دو باعث تغییرات در سرعت پیشانی جریان می شود.

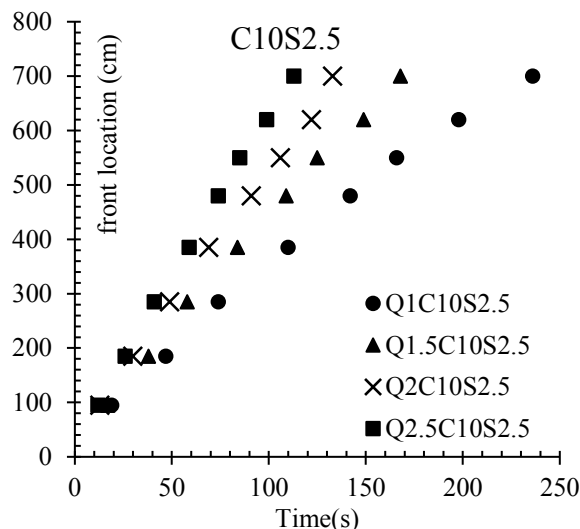
از طرفی وقتی جریان زیرگذر است، با افزایش شیب (از ۲/۵ به ۴ درصد) مولفه قائم نیروی محرک جریان ۲/۵ برابر می شود. این امر سبب می گردد که جریان چگال پیش از جدا شدن از کف، وارد لایه ای از سیال پیرامون با چگالی بیشتر شود. برخورد جریان چگال با لایه های

به زمان نشان می دهد. با توجه به اینکه هنگام عبور پیشانی، متوسط زمانی سرعت خود تغییرات زمانی دارد، سرعت پیشانی در هنگام رسیدن به هر حسگر و با توجه به زمان از ابتدای آزمایش محاسبه شده است. شکل ۷ نشان می دهد که افزایش غلظت و دبی سبب افزایش سرعت پیشانی جریان چگال در سیال لایه بندی شده، شده است. افزایش غلظت سبب کاهش پارامتر لایه بندی (R) می شود. سرعت جریان در محیط هایی با لایه بندی ضعیف (R کوچکتر) افزایش می یابد. به عنوان مثال هنگامی که R ۴۴٪ کاهش می یابد (از ۲۲/۷ به ۱۲/۶) سرعت پیشانی جریان چگال ۲۴٪ افزایش می یابد (از ۳۴/۱ به ۴۲/۲ سانتی متر بر ثانیه).



شکل ۱۰. بررسی دقت رابطه (۱۴) در محدوده

Fig. 10. The accuracy of formula (14) in the range of $\pm 20\%$



شکل ۹. موقعیت پیشانی نسبت به زمان

Fig. 9. Head position over time

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل آماری رابطه (۱۴)

Table 6. Results of statistical analysis of the formula (14)

RMSE(s)	E%	α	R^2
۹,۹	۷,۱	۰,۹۷	۰,۹۶

چگال تر، سبب کاهش سرعت پیشانی جریان در این مقطع می شود. تا زمانی که جریان روی بستر و در حالت زیرگذر است افزایش شیب سبب افزایش نیروی محرک جریان می شود اما زمانی که جریان میان گذر می شود از لایه ای که چگالی آن برابر با چگالی خود جریان است عبور می کند و تاثیر شیب در واقع کم می شود.

شکل ۹ نشان می دهد که افزایش دبی روی موقعیت پیشانی جریان چگال تاثیر دارند. موقعیت پیشانی نسبت به دریاچه ورودی جریان چگال اندازه گیری شده است. در یک غلظت ثابت افزایش دبی باعث افزایش سرعت جریان چگال شده است در نتیجه جریان در زمان کمتری به مقطع اندازه گیری می رسد.

در شکل ۹ مشاهده می شود که آزمایش ها با دبی کمتر بیشترین زمان رسیدن به انتهای فلوم را دارند. جریان چگال در لایه بندی ضعیف تر (R کوچکتر) می تواند فاصله بیشتری را رو شیب طی کند و دیرتر از بستر جدا شود. سرعت پیشروی جریان در حالت زیرگذر بیشتر از حالت میان گذر است در نتیجه جریان در زمان کوتاه تری به موقعیت مشخصی می رسد. همچنین شیب تاثیر کمی در زمان گذر جریان دارد.

۳-۳- معادله توسعه یافته برای زمان گذر جریان

از آنجا که زمان عبور جریان در سیال لایه بندی شده مخصوصا در پیش بینی روند آلودگی یا ورود جریان گل آلود به مخزن حائز اهمیت است، با استفاده از نرم افزار SPSS و پارامترهای بی بعد رابطه ای جهت پیش بینی زمان عبور جریان توسعه داده شد. از ۷۵٪ داده ها به منظور توسعه معادله و ۲۵٪ آنها به منظور تست معادله استفاده شد. معادله حاصل به صورت رابطه (۱۴) می باشد.

$$T = (1 + 0.1Ri) \left(\frac{X}{U_f} \right) - 1.3(R + Ri(S - 1)) \quad (14)$$

در اینجا T زمان گذر جریان از ابتدا تا انتهای فلوم و S شیب بستر برحسب درصد، X فاصله از دریاچه ورودی، U_f سرعت پیشانی جریان در حالت زیرگذر، R پارامتر لایه بندی و Ri عدد ریچاردسون جریان در حالت زیرگذر است. به منظور ارزیابی دقت رابطه از معیارهای آماری استفاده گردید. نتایج حاصل از تحلیل آماری در جدول ۵ ارائه شده است.

در شکل ۱۰ بین مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (۱۴) در محدوده $\pm 20\%$ مقایسه انجام شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود محدوده ی قابل قبولی از نتایج در بازه مورد بررسی قرار گرفته است. حدود ۹۰ درصد از داده ها در مرحله تست رابطه در بازه $\pm 20\%$ قرار دارند.

(از ۳۴/۱ به ۴۲/۲ سانتی متر بر ثانیه).

با افزایش دبی و افزایش غلظت زمان گذر جریان کاهش می یابد. همچنین افزایش غلظت سبب کاهش پارامتر لایه بندی (R) می شود. جریان چگال در لایه بندی ضعیف تر (R کوچکتر) می تواند فاصله بیشتری را رو شیب طی کند و دیرتر از بستر جدا شود.

علائم

علائم انگلیسی

متوسط سرعت	U
متوسط ارتفاع	H
سرعت اندازه گیری شده توسط دستگاه سرعت سنج	u(z)
اختلاف ارتفاع	zd
شتاب ثقل	g
شتاب ثقل کاهش یافته	g'
عدد ریچاردسون	iR
ارتفاعی که در آن سرعت بیشینه است	h _{xam}
بیشینه سرعت	u _{xam}
ارتفاع جریان	h
غلظت جریان	C
دبی جریان	Q
شیب کف کانال	S
زمان گذر جریان از ابتدا تا انتهای فلوم	T
فاصله از دریچه ورودی	X
سرعت پیشانی جریان در حالت زیرگذر	f ₀
پارامتر لایه بندی	R
ضریب	n
ضریب	m
علائم یونانی	
چگالی، 3m/gk	ρ
زاویه کف کانال	θ
ضریب	α
ضریب	β
زیرنویس	
مربوط به کف	B

آنالیز حساسیت معادله (۱۴) نشان داد که، بیشترین تاثیر به ترتیب مربوط به کاهش سرعت پیشانی، افزایش و کاهش فاصله از دریچه و افزایش سرعت پیشانی می باشد. در این روش با تغییر دادن مقدار یک پارامتر در محدوده $\pm 50\%$ و -50% مقدار واقعی آن، در حالی که مقادیر بقیه پارامترها ثابت می باشند؛ مقدار خروجی برای دو مقدار تغییر یافته و شاخص حساسیت پارامتر تغییر یافته از فرمول های مربوطه محاسبه گردید.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ساختار سرعت در جریان چگال میان گذر با ۴۸ آزمایش بررسی شد. بررسی پروفیل های بی بعد شده سرعت نشان داد این پروفیل ها روی هم قرار گرفتند، بنابراین می توان نتیجه گرفت که جریان خود متشابه است.

همچنین مقدار سرعت بیشینه در پروفیل های بی بعد شده سرعت در هر مقطع نشان داد که این مقدار در همه ی جریانها تقریباً ۱/۳ برابر سرعت متوسط است. و مقایسه این مقدار با کار سایر محققین تشابه قابل توجهی را نشان می دهد.

شکل پروفیل های بی بعد شده ی سرعت نشان داد که برای جریان زیرگذر در سیال لایه بندی شده معادله پروفیل سرعت در ناحیه دیواره مانند جریان زیرگذر در سیال یکنواخت با $n = 5$ است. و معادله پروفیل سرعت در حالت میان گذر در ناحیه جت بالایی و پایینی و در حالت زیرگذر در ناحیه جت با جریان زیرگذر در سیال یکنواخت متفاوت است. مقادیر α و β برای حالت زیرگذر به ترتیب ۰/۱۲ و ۱/۷۷، برای حالت میان گذر در ناحیه جت بالایی به ترتیب ۰/۰۸ و ۵/۰۸ و حالت میان گذر در ناحیه جت پایینی به ترتیب ۰/۰۷۲ و ۷/۸۲- می باشد.

در سیال لایه بندی شده سرعت پیشانی بعد از افزایش کاهش قابل ملاحظه ای می یابد، این به این معنی است که لایه بندی می تواند حرکت جریان را محدود کند. افزایش غلظت و دبی در هر سه شیب سبب افزایش سرعت پیشانی جریان چگال در سیال لایه بندی شده، شده است. افزایش غلظت سبب کاهش پارامتر لایه بندی R می شود. سرعت جریان در محیط هایی با لایه بندی ضعیف (R کوچکتر) افزایش می یابد. هنگامی که R ۴۴٪ کاهش می یابد (از ۲۲/۷ تا ۱۲/۶) سرعت پیشانی جریان چگال ۲۴٪ افزایش می یابد

- flows, Journal of Fluid Mechanics, 6(3) (1959) 423-448
- [10] M. Sadeghi Askari, M. Ghomeshi, Experimental investigation of velocity profile in interflow density current, Journal of Hydraulic, 13(1) (1397) 58397, in Persian
- [11] J.S. Turner, Buoyancy effects in fluids, Cambridge university press, 1979.
- [12] M. Altınakar, W. Graf, E. Hopfinger, Flow structure in turbidity currents, Journal of Hydraulic Research, 34(5) (1996) 713-718.
- [13] M. Garcia, G. Parker, Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current, Journal of Geophysical Research: Oceans, 98(C3) (1993) 4793-4807.
- [14] M. Sadeghi Askari, M. Ghomeshi, Experimental study of concentration profile in interflow density current, Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE) 10.22055/jise.2018.24246.1715, in Persian
- [15] M.H. Garcia, Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment, Journal of hydraulic engineering, 120(11) (1994) 1240-1263.
- [16] S. Hosseini, A. Shamsai, B. Ataie-Ashtiani, Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter, Flow Measurement and Instrumentation, 17(1) (2006) 59-68.
- [17] E. Khavasi, H. Afshin, B. Firoozabadi, Effect of selected parameters on the depositional behaviour of turbidity currents, Journal of Hydraulic Research, 50(1) (2012) 60-69.
- [18] Z. Nourmohammadi, H. Afshin, B. Firoozabadi, Experimental observation of the flow structure of turbidity currents, Journal of Hydraulic Research, 49(2) (2011) 168-177.

T مربوط به سطح

d مربوط به جریان

بالانویس

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات

منابع

- [1] J. Imberger, R. Thompson, C. Fandry, Selective withdrawal from a finite rectangular tank, Journal of fluid mechanics, 78(3) (1976) 489-512.
- [2] R.J. Lowe, P. Linden, J.W. Rottman, A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current, Journal of Fluid Mechanics, 456 (2002) 33-48.
- [3] D. Ahlfeld, A. Joaquin, J. Tobiasson, D. Mas, Case study: Impact of reservoir stratification on interflow travel time, Journal of hydraulic engineering, 129(12) (2003) 966-975.
- [4] B.R. Sutherland, P.J. Kyba, M.R. Flynn, Intrusive gravity currents in two-layer fluids, Journal of Fluid Mechanics, 514 (2004) 327-353.
- [5] M. Wells, P. Nadarajah, The intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies, Journal of Physical Oceanography, 39(8) (2009) 1935-1947.
- [6] S. An, P.Y. Julien, Three-dimensional modeling of turbid density currents in Imha Reservoir, South Korea, Journal of hydraulic engineering, 140(5) (2014) 05014004.
- [7] X.-f. Zhang, S. Ren, J.-q. Lu, X.-h. Lu, Effect of thermal stratification on interflow travel time in stratified reservoir, Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 16(4) (2015) 265-278.
- [8] Z. He, L. Zhao, T. Lin, P. Hu, Y. lv, H.-C. Ho, Y.-T. Lin, Hydrodynamics of gravity currents down a ramp in linearly stratified environments, Journal of Hydraulic Engineering, 143(3) (2016) 04016085.
- [9] T. Ellison, J. Turner, Turbulent entrainment in stratified

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Sadeghi Askari, M. Ghomeshi. Velocity structure in interflow density currents, Amirkabir J. Civil Eng., 52(10) (2021) 2607-2620.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15923.6084](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15923.6084)

