

# پذیرفته شده پیش از انتشار

## بررسی آزمایشگاهی پروفیل سرعت در جریان چگال میان گذر

محدثه صادقی عسکری<sup>۱</sup> و مهدی قمشی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، Sadeghi.mohad3@yahoo.com

۲- \* نویسنده مسئول، استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، M.ghomeshi@yahoo.com

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

### چکیده

جریان‌های ثقلی که به آن‌ها جریان‌های چگال یا جریان‌های غلیظ گفته می‌شود به دلیل اختلاف چگالی بین جریان و سیال پیرامون به وجود می‌آیند. در مخازن سدها سیال پیرامون ممکن است دارای لایه‌بندی عمودی باشد. لذا جریان چگال ورودی به چنین مخازنی ممکن است به صورت میان گذر ادامه مسیر دهند. در این پژوهش جریان چگال به صورت میان گذر در یک سیال لایه‌بندی شده مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی آزمایشگاهی پروفیل سرعت در جریان چگال میان گذر در سیال پیرامون لایه‌بندی شده، آزمایش‌ها با ۴ دبی (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر روی شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد انجام شد. لایه‌بندی با استفاده از مخلوط آب و نمک با گرادیان غلظت عمقی ایجاد شد. برای ایجاد جریان چگال از ذرات سیلیس با قطر متوسط ۸ میکرون و وزن مخصوص ۲/۶۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد. سرعت جریان به وسیله دستگاه سرعت‌سنج پروفایلر اکوستیک DOP2000 ثبت شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد وقتی جریان از حالت زیرگذر به حالت میان گذر تبدیل می‌شود سرعت بدنه آن کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت از ۵ تا ۲۰ گرم بر لیتر درصد کاهش سرعت بدنه به ترتیب ۱۱، ۲۰ و ۳۶ درصد در شیب‌های ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد افزایش یافته است. همچنین افزایش دبی از ۱ تا ۲/۵ لیتر بر ثانیه درصد کاهش سرعت به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۱۵ درصد در شیب‌های ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد کاهش یافته است. سرعت پیشانی در جریان میان گذر بیشتر از سرعت بدنه است.

**کلید واژه‌ها:** جریان چگال، پروفیل سرعت، لایه‌بندی، گرادیان غلظت، ذرات سیلیس.

### مقدمه

جریان‌های گرانشی ناشی از نیروی جاذبه در همه جای زمین حضور دارند. یکی از انواع مهم این جریان‌ها که در طبیعت در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد جریان‌های چگال هستند. این جریان‌ها بر اثر وجود نیروی گرانش و تاثیر آن بر اختلاف چگالی جریان نسبت به سیال پیرامون ایجاد می‌گردند (Middleton, 1993). دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و مخازن تحت تاثیر دما دارای لایه‌بندی عمودی و مصب رودها و دریاچه‌ها تحت تاثیر دما و اختلاف چگالی جریان ورودی به آن‌ها دارای لایه‌بندی افقی هستند (Snow and Sutherland, 2014). جریان چگال هنگام ورود به سیال لایه‌بندی شده به دلیل اختلاف چگالی با سیال پیرامون، در سطحی که چگالی جریان با چگالی سیال پیرامون برابر باشد از کف جدا شده و وارد سیال پیرامون می‌شود (He et al., 2016). یکی از انواع معمول چنین جریاناتی، جریان کدر در اقیانوس‌ها است که جریان حاوی رسوبات روی فلات قاره‌ها به سمت اعماق اقیانوس پیش می‌رود و باعث انتقال رسوب به اقیانوس‌ها و پر کردن حوضه‌های بزرگ رسوبی در کف اقیانوس‌ها می‌شود. در بسیاری از موارد این جریان‌ها باعث پاره شدن کابل‌ها در زیردریا

می‌شوند (Simpson, 1997). جریان‌های چگال نیز در اتمسفر، به شکل باد پایین رو رخ می‌دهد (Thompson, 1984). نمونه‌های دیگری از جریان چگال که در طبیعت با آن مواجه هستیم، شامل سقوط بهمن (Hopfinger and Tochon-Danguy, 1977) و جریان‌های تشکیل شده در اثر فعالیت آتشفشانی (Valentine, 1987) هستند. همچنین نمونه‌هایی از جریان‌های چگال مصنوعی با کاربردهای صنعتی (به عنوان مثال آزاد سازی لحظه‌ای یک گاز متراکم در یک محیط با چگالی کم‌تر پس از شکست مخزن مهار کننده) وجود دارد (Baines, 2001).

با توجه به کاربردهای طبیعی و مصنوعی جریان‌های چگال، تحقیقات محققین بر روی این نوع جریان گسترده است. پژوهش‌های اولیه روی جریان چگال توسط Benjamin (1968) انجام شد. بسیاری از مطالعات انجام شده به بررسی جریان چگال در محیط یکنواخت پرداخته است. در این مقدمه تلاش شده است پژوهش‌هایی که در آن جریان به صورت میان گذر در سیال لایه‌بندی شده بررسی شده است، بیان شود (Imberger, Thompson and Fandry, 1976) فرض کردند که جریان میان گذر شناوری طبیعی، مومنت

## پذیرفته شده پیش از انتشار

فلاکس شناوری جریان غلیظ و مقدار فرکانس شناوری  $N$  پیدا کردند. (Snow and Sutherland, 2014) آزمایش‌هایی را برای بررسی شوری و رسوب‌گذاری یک جریان پایین رونده روی شیب در سیال پیرامون با لایه‌بندی خطی و چگالی ثابت انجام دادند. با توجه به تاثیر لایه‌بندی سیال پیرامون در جریان‌های گل‌آلود، جریان هم به‌صورت روگذر و هم به‌صورت زیرگذر مورد بررسی قرار گرفت. سرعت پیشانی روی شیب و ارتفاع نقطه جدایی اندازه‌گیری شد. این نتایج با پیش‌بینی‌های تئوری مقایسه شد که مشخصه‌های توسعه جریان و عمق جدایی در ترم‌های  $s$  شیب، پارامتر اختلاط  $E$  (نسبت اختلاط به سرعت جریان)، پارامتر لایه‌بندی نسبی  $S$  (نسبت اختلاط چگالی سیال پیرامون به چگالی نسبی جریان)، و یک پارامتر جدید برای نسبت رسوب‌گذاری به سرعت اختلاط تعریف شد. آن‌ها دریافتند که عمق جدایی به دو پارامتر اندازه ذرات و فاصله از دریچه ورودی بستگی دارد. (Cort'es et al (2015) چگونگی تقسیم جریان چگال ورودی را به جریان زیرگذر و میان‌گذر، وقتی که جریان ورودی به یک محیط طبقه‌بندی شده دولایه وارد می‌شود، بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که عدد فرود دنسیمیتریک و عدد ریچاردسون در تقسیم جریان موثر است. همچنین معادله‌ای را برای پیش‌بینی فلاکس شناوری بخش‌های تجزیه شده جریان به زیرگذر و میان‌گذر ارائه دادند. (Zhang et al. (2015) به بررسی اثر لایه‌بندی حرارتی در مخزن بر روی زمان گذر جریان میان‌گذر پرداختند، یک رابطه کمی بین فرکانس شناوری و زمان گذر جریان میان‌گذر به‌دست آوردند. آن‌ها برای صحت‌سنجی رابطه پیشنهاد شده، شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. برای آزمایش‌های تجربی، حرکت جریان میان‌گذر در یک کانال کم عمق با آزاد سازی جریان چگال داخل سیال لایه‌بندی شده مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عددی، از یک مدل RNG 2-D k- $\epsilon$  استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی، رابطه پیشنهاد شده آن‌ها را تأیید کرد. رابطه ارائه شده توسط آن‌ها برای پیش‌بینی زمان حرکت آلودگی در مخازن و کمک در کنترل آلودگی می‌تواند مفید باشد.

هر چند پژوهشگران، جریان‌های چگال در سیال پیرامون غیریکنواخت را نیز بررسی کرده‌اند، اما رفتار کامل آن‌ها در یک سیال طبقه‌بندی شده شناخته شده نیست. از این رو این پژوهش به بررسی پروفیل‌های سرعت در جریان چگال میان‌گذر می‌پردازد.

### روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی به طول  $1/8$  متر، ارتفاع  $70$  سانتی‌متر و عرض  $35$  سانتی‌متر انجام شد. شکل (۱) طرح شماتیک دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. در انتهای فلوم در کف و در ترازهای متفاوت لوله‌هایی برای تخلیه جریان نصب شد و به انتهای لوله‌ها

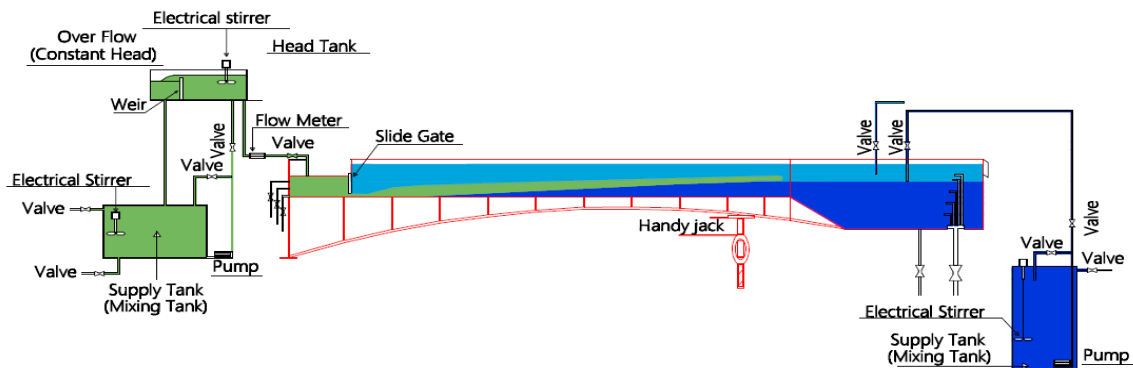
کم و شرایطی بین شرایط جریان ورودی و جریان خروجی دارد. پارامتر بی‌بعد  $R$  که تابعی از عدد فرود  $Fr$  است برای پیش‌بینی دینامیک جریان میان‌گذر به‌دست آوردند. با مقایسه پارامتر  $R$  و عدد پراتل  $Pr$  رژیم جریان را تعیین کردند و معادله‌هایی را برای عمق پیشروی و سرعت پیشروی جریان میان‌گذر در هر رژیم ارائه دادند. (DE Rooij, Lindeny and Dalziel (2002) پیشروی جریان نمکی و رسوبی در طول سطح مشترک دو لایه با چگالی مختلف را بررسی کردند. آن‌ها به‌وسیله‌ی آنالیزی مانند آنالیز Benjamin (1968) برای مرز جریان‌های چگال، شرایط پیشانی جریان توصیف کردند. معادلاتی برای سرعت انتشار و موقعیت پیشانی جریان به عنوان تابعی از چگالی نسبی استخراج کردند. (Lowe, Linden and Rotman (2002) سرعت پیشانی را با استفاده از فرض پایستگی انرژی و معادله برنولی روی خط جریان به‌دست آوردند، و همچنین عمق جریان میان‌گذر در هر لایه را نزدیک به نصف عمق لایه‌ی سیال پیرامون پیش‌بینی کردند. (Ahlfeld et al. (2003) مطالعه موردی روی رابطه بین زمان عبور جریان میان‌گذر و لایه‌بندی مخزن سد Wachusett در ماساچوست انجام دادند. در این مطالعه مشخص شد که رابطه‌ای خطی بین متوسط زمان عبور جریان میان‌گذر و درجه حرارت لایه‌بندی وجود دارد. (Sutherland, Kyba and Flynn (2004) برای تعریف انواع جریان‌های مرکب (مخلوط دوگانه‌ای که در یک زمان در دو فاز قرار دارد) در محیط پیرامون دو لایه، سه پارامتر بی‌بعد  $(\sigma, \epsilon, \Delta)$  را در مطالعات خود معرفی کردند. پارامتر  $\epsilon$  مربوط به اختلاف چگالی بین جریان‌های سنگین و لایه‌های سیال پیرامون، پارامتر  $\sigma$  برای توصیف تفاوت نسبی چگالی بین لایه‌های بالایی و لایه‌های پایینی استفاده می‌شود و تفاوت عمق لایه بالایی و پایینی سیال پیرامون نسبت به عمق کل با پارامتر  $\Delta$  مشخص می‌شود. (Samothrakis and Cotel (2006) جریان چگال را به صورت پیوسته روی یک سطح شیبدار ایجاد کردند. سیال پیرامون در آزمایش‌های آن‌ها از محیطی دو لایه با لایه‌بندی ثابت تشکیل شده است. ایشان از یک روش واکنش شیمیایی (فنولفاتالین) و فلورسانس ناشی از لیزر پلار (PLIF) برای اندازه‌گیری نرخ اختلاط سیال لایه پایینی به داخل جریان چگال استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که تغییرات در اندازه پیشانی جریان چگال، میزان درون آمیختگی و اختلاط را تغییر می‌دهد. همچنین سرعت لحظه‌ای و میدان گردابه‌ای را بررسی کردند. به‌علاوه، پروفیل‌های عمودی سرعت و گردابه‌ها را در دو موقعیت مختلف (بالادست و پایین دست از منطقه برخورد جریان چگال با سیال لایه پایینی) رسم کردند. (Wells and Nadarajah (2008) دریافتند که نرخ اختلاط  $(E)$  در موقعیت تغییر شکل جریان مؤثر است. آن‌ها مطالعاتی روی عمق نفوذ (عمقی که جریان از کف جدا می‌شود و وارد سیال پیرامون می‌شود) انجام دادند. همچنین رابطه‌ای را بین عمق وارد شدن، شدت اختلاط  $E$

## پذیرفته شده پیش از انتشار

رسوبی ابتدا مخزن سیال چگال با توجه به دبی مورد نیاز در طول آزمایش تا حجم معینی از آب پر می‌شد. سپس رسوبات به مخزن آب اضافه می‌شد و توسط یک همزن الکتریکی و یک پمپ لجن کش مخلوط می‌شدند. پس از ایجاد چگالی یکنواخت سیال رسوبی، به منظور تعیین ارتفاع مورد نیاز برای حرکت، سیال به مخزنی با تراز ثابت پمپ می‌شد. برای جلوگیری از ته‌نشینی رسوبات در مخزن بالایی، یک همزن الکتریکی کار اختلاط سیال چگال در این مخزن را بر عهده داشت. سپس سیال چگال از طریق یک شیر که قبل از آن دبی سنج قرار داشت وارد محفظه پشت دریچه شده و دبی آن تنظیم می‌شد. تا تنظیم دبی و رسیدن به دبی ثابت شیرهای ابتدای محفظه برای تخلیه محفظه و جلوگیری از سرریز کردن سیال رسوبی در محفظه، باز می‌ماندند. قبل از دریچه از یک صفحه مشبک به منظور آرام کننده جریان ورودی استفاده شد.

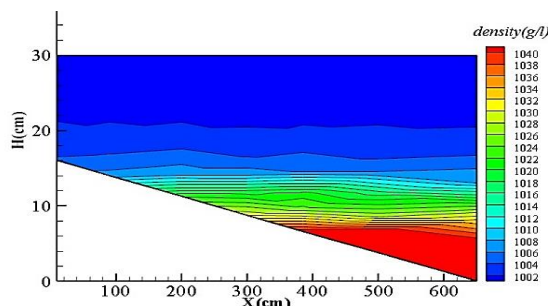
بعد از رسیدن به دبی مورد نیاز در هر آزمایش شیرهای تخلیه ابتدایی بسته می‌شد و هنگامی که ارتفاع سیال رسوبی در محفظه با ارتفاع سیال لایه‌بندی در فلوم برابر می‌شد دریچه بطور ناگهانی بالا می‌رفت و جریان رسوبی در زیر سیال لایه‌بندی شروع به حرکت می‌کرد. جریان مورد نظر پس از طی مسیری بسته به چگالی سیال رسوبی و سیال پیرامون از کف فلوم جدا می‌شد و به‌صورت میان‌گذر به حرکت خود در سیال پیرامون ادامه می‌داد. شکل (۲) لایه‌بندی سیال پیرامون، قبل از وارد شدن جریان چگال به آن را بر حسب گرم بر لیتر نشان می‌دهد. همانطور مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع از کف کانال غلظت نمک محلول در آب کاهش می‌یابد. به‌منظور بررسی پروفیل سرعت در جریان میان‌گذر، در مجموع ۴۸ آزمایش با چهار دبی ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه و چهار غلظت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر که به ترتیب جریانی با چگالی ۱۰۰۳/۲، ۱۰۰۶/۳، ۱۰۰۹/۴ و ۱۰۱۲/۵ گرم بر لیتر ایجاد می‌کردند، (منظور از غلظت در اینجا غلظت ذرات سیلیس است که جریان ورودی حاوی آن می‌باشد) روی شیب کف ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد انجام شد.

شیر وصل شد. در فاصله ۸۰ سانتی‌متری از ابتدای فلوم دریچه‌ای هم‌عرض و هم ارتفاع فلوم تعبیه شد. پشت دریچه محفظه‌ای به منظور ورود ناگهانی سیال چگال به داخل سیال لایه‌بندی شده ایجاد شد. ابتدای محفظه و در ترازهای متفاوت چندین شیر تخلیه برای جلوگیری از پر شدن محفظه تا تنظیم کامل دبی نصب شد. دو مخزن یکی برای تهیه سیال شور و دیگری برای تهیه سیال رسوبی در این تحقیق استفاده شد. به‌منظور تهیه سیال پیرامون ابتدا مخزن سیال شور تا حجم معینی از آب شهری پر شد سپس مقدار معینی نمک (که از پیش جرم آن اندازه‌گیری شده بود) به مخزن افزوده شد. اختلاط محلول آب و نمک به‌وسیله پمپ و همزن صورت گرفت. بعد از اختلاط کامل آب و نمک چگالی آن اندازه‌گیری می‌شد (برای اندازه‌گیری چگالی از دو روش استفاده شد یکی اندازه‌گیری شوری محلول آب و نمک توسط دستگاه EC متر و تبدیل آن به چگالی و دیگری اندازه‌گیری مستقیم چگالی توسط دستگاه چگالی سنج). بعد از رسیدن به چگالی مورد نظر، دریچه ابتدایی کانال و شیرهای تخلیه انتهایی بسته می‌شد و حجم معینی از محلول آب و نمک تهیه شده به کانال پمپ می‌شد. برای وارد کردن سیال با چگالی کمتر در مرحله بعد برای جلوگیری از اختلاط دو سیال صفحه مشبک شناوری روی لایه آب شور پایینی گذاشته می‌شد و سیال با چگالی کمتر با سرعت کم تا تراز معینی وارد کانال می‌شد. این عمل در چند مرحله تا رسیدن به لایه‌بندی مورد نظر تکرار می‌شد. در نتیجه سیال پیرامون با لایه‌بندی عمودی ایجاد می‌شد. بطوری که بیشترین چگالی در کف فلوم و کمترین آن در سطح آب مشاهده شد. چگالی سیال در جلوی دریچه و مقاطعی با فاصله یک متر در هفت مقطع در بازه‌های دو سانتی‌متری از سطح آب تا کف فلوم در هر مقطع اندازه‌گیری شد. در این پژوهش برای ایجاد جریان چگال ورودی از ذرات سیلیس با قطر متوسط هشت میکرون و وزن مخصوص ۲/۶۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد. وزن رسوبات مورد استفاده بسته به غلظت جریان چگال در هر آزمایش متفاوت بود. برای تهیه سیال



شکل ۱- طرح شماتیک از فلوم و مخازن

## پذیرفته شده پیش از انتشار



شکل ۲- لایه‌بندی سیال پیرامون قبل از ورود جریان چگال

در حالت آشفته بوده است. در ابتدای ورود جریان چگال به داخل سیال پیرامون برای مشخص نمودن رژیم جریان ورودی عدد فرود دنسیومتریکی و عدد رینولدز با مشخصات جریان در زیر دریچه محاسبه شدند. عدد فرود دنسیومتریکی در جریان چگال به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود:

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

در معادله‌های فوق  $U$  سرعت متوسط لایه چگال که با استفاده از رابطه پیوستگی در زیر دریچه محاسبه شد،  $h$  ضخامت یا ارتفاع لایه چگال برابر با ارتفاع باز شدگی دریچه،  $\nu$  لزجت سینماتیک مخلوط ورودی که با توجه به ناچیز بودن تغییرات لزجت نسبت به آب خالص، از لزجت سینماتیکی آب خالص استفاده شده است (Firozabadi et al, 2009). همچنین دمای جریان چگال و سیال پیرامون در آزمایش‌ها ثبت شده و در محاسبه لزجت تاثیر داده شده است،  $\theta$  زاویه شیب بستر و  $g'$  در واقع همان شتاب ثقل کاهش یافته است و با معادله (۳) بیان می‌شود:

$$g' = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} g \quad (3)$$

$\rho_w$ : چگالی سیال پیرامون که ثابت فرض می‌شود،  $\rho$ : چگالی جریان ورودی و  $g$  شتاب ثقل است. با توجه به تغییرات کم چگالی سیال پیرامون در ورودی، متوسط چگالی به عنوان چگالی سیال پیرامون در نظر گرفته شد. در این آزمایش‌ها با توجه به لایه‌بندی بودن سیال پیرامون از معادله (۴) برای به‌دست آوردن  $g'$  استفاده شد.

$$g' = \frac{g}{\rho_w} * \frac{\int_0^\infty \Delta\rho(z)u(z)dz}{\int_0^\infty u(z)dz} \quad (4)$$

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. به عنوان مثال Q2C15S3.25 آزمایش است که با دبی دو لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر روی شیب ۳/۲۵ درصد انجام شده است.

شکل (۳) نمایی از فلوم و محل نصب پرابه‌های اندازه‌گیری سرعت را نشان می‌دهد. فاصله پرابه‌های اندازه‌گیری سرعت از دریچه ورودی جریان چگال در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است مقدار حداقل دبی به گونه‌ای انتخاب شد که عدد رینولدز جریان ورودی در محدوده‌ی آشفته قرار گیرد و مقدار حداکثر دبی و معیار انتخاب شیب‌های مورد آزمایش براساس شرایط آزمایشگاه انتخاب شد. برای 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.

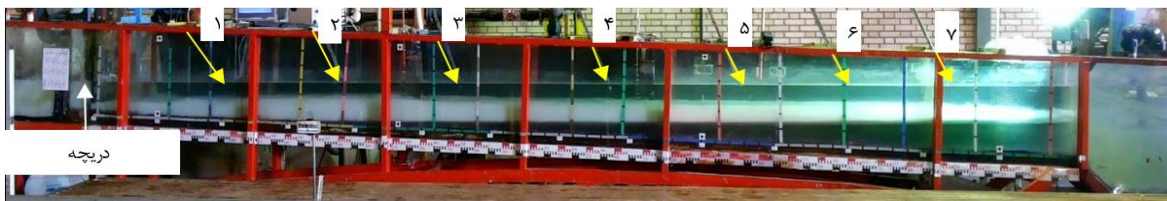
### ساختار جریان چگال

جریان‌های چگال ممکن است در دو محدوده‌ی آرام و آشفته ظاهر شوند. معیاری که برای تعیین این دو محدوده‌ی جریان وجود دارد عدد رینولدز چگال است که به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (1)$$

با توجه به اینکه در جریان‌های چگال رینولدز بحرانی بزرگتر از ۱۰۰۰ است (Simpson, 1997) بنابراین برای اطمینان در تمام آزمایش‌ها دبی ورودی در حالتی تنظیم شده است که رینولدز ورودی بیشتر از ۲۰۰۰ باشد براین اساس جریان ورودی در تمام آزمایش‌ها

## پذیرفته شده پیش از انتشار



شکل ۳- نمایی از آزمایش Q1.5C10S3.25 و موقعیت پراب‌های اندازه‌گیری سرعت و دریچه ورودی جریان چگال

جدول ۱ - فاصله پراب‌های اندازه‌گیری سرعت از دریچه ورودی

شماره پراب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
فاصله از دریچه (cm)	۹۵	۱۸۵	۲۷۵	۳۸۵	۴۸۰	۵۵۰	۶۲۰

جدول ۲- محدوده‌ی عدد فرود دنسومتریک و عدد رینولدز جریان

$Re$		$F_{rD}$	
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
۶۷۳۸	۲۶۹۵	۰/۲۶	۰/۱
۱۱۳۹۵	۱۶۶۹	۱/۶	۰/۱۷

می‌باشد. پروفیل سرعت در هفت مقطع با فاصله تقریباً یک متر و روی خط مرکزی فلوم برداشت شده است. مجذور عکس عدد فرود را عدد ریچاردسون می‌نامند که با معادله (۷) بیان می‌شود:

$$Ri = \frac{g'h\cos(\theta)}{U^2} \quad (7)$$

و  $U$  و  $h$  به ترتیب سرعت و ارتفاع به‌دست آمده از رابطه (۵) و (۶) می‌باشند.  $g'$  نیز از معادله ۴ به‌دست آمد. Turner (1973) بیان کرد که لایه‌بندی پایدار زمانی اتفاق می‌افتد که به‌طور کلی چگالی از کف به سمت بالا کاهش یابد. بنابراین عدد ریچاردسون محلی برای نشان دادن نواحی از جریان است که دارای لایه‌بندی ناپایداری نسبت به کل جریان هستند و به شکل دیفرانسیلی معادله (۸) قابل تعریف می‌باشند:

$$Ri_g = \frac{Buoyancy\ Force}{Shear\ Force} = -\frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z} \forall l}{\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2 l^2 A} \quad (8)$$

$$= -\frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2}$$

$u(z)$  سرعت متوسطی است که توسط دستگاه سرعت سنج ثبت می‌شود.  $\Delta\rho(z)$  اختلاف چگالی بین دو ارتفاع که سرعت در آن دو ارتفاع توسط دستگاه سرعت سنج ثبت شده است. عدد رینولدز و عدد فرود چگال در طول فلوم با مشخصات جریان چگال محاسبه شدند. محدوده‌ی عدد فرود و رینولدز در جدول (۲) بیان شده است.

برای بررسی پروفیل‌های سرعت چون فصل مشترک بین جریان چگال و سیال پیرامون به راحتی قابل تشخیص نیست. از مقادیر متوسط سرعت و ارتفاع استفاده شده است. با استفاده از روابط بقای جرم و بقای مومنتوم در جریان چگال داریم:

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

$$\bar{h} = \frac{\left(\int_0^\infty u(z) dz\right)^2}{\int_0^\infty u(z)^2 dz} \quad (6)$$

پروفیل سرعت بوسیله دستگاه سرعت‌سنج پروفایلر اکوستیک DOP2000 ثبت شده است. اندازه‌گیری سرعت در این دستگاه با روش اکوستیک و بوسیله پراب‌های ساطع و دریافت کننده فرکانس

## پذیرفته شده پیش از انتشار

است و دیگری در وسط فلوم که در این مرحله تقریباً جریان از کف جدا شده و شروع به پیشروی در سیال پیرامون کرده است. و در نهایت یکی در انتهای فلوم که در این موقعیت جریان بطور کامل میان گذر است.

همان طور که در شکل (۵) (الف) مشاهده می شود سرعت جریان چگال در ابتدا به دلیل تفاوت زیاد چگالی بین جریان چگال و سیال پیرامون، زیاد است. در این مرحله افزایش دبی سبب افزایش ضخامت جریان چگال و همین طور افزایش سرعت جریان شده است. در این مرحله نیروی گرانش و اصطکاک روی شیب به تعادل می رسند و جریان تا قبل از اینکه از بستر جدا شود و وارد سیال پیرامون گردد سرعت تقریباً ثابتی دارد. با پیشروی جریان چگال در طول فلوم، جایی که چگالی جریان با چگالی سیال پیرامون برابر شود جریان از کف جدا شده و به صورت افقی وارد سیال پیرامون می شود در این مرحله سرعت جریان چگال کاهش می یابد. درصد کاهش سرعت جریان بین مقاطع اندازه گیری در جدول (۴) آمده است، که پارامتر  $T$  زمان رسیدن پیشانی جریان به فاصله ۷ متری از دریچه ورودی جریان چگال است. شکل (۵) (ب) پروفیل های سرعت جریان اندکی بعد از جدایی جریان از کف را نشان می دهد. در این مرحله سرعت جریان نسبت به حالت زیرگذر کمتر شده است، زیرا ضخامت جریان به دلیل اختلاط در سطح مشترک بالایی و پایینی افزایش یافته است و حرکت جریان در یک مسیر افقی ادامه می یابد.

که در این رابطه  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$  و  $\frac{\partial \rho}{\partial z}$  به ترتیب تغییرات سرعت و غلظت در عمق می باشند. اگر  $Rig \geq 0.25$  جریان دارای لایه بندی پایدار است. لایه بندی پایدار به معنی عدم تلاطم در جریان نمی باشد.

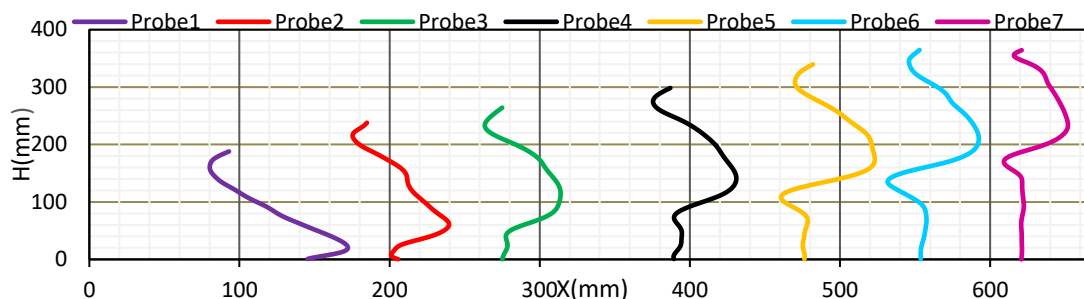
### نتایج و بحث

برای دستیابی به اهداف این پژوهش در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شد. در هر آزمایش پروفیل های سرعت در هفت مقطع اندازه گیری شد. نوسان های سرعت با برنامه متلب حذف شد. سپس مقدار متوسط سرعت و ارتفاع از رابطه های (۵) و (۶) به دست آمد. مشخصات آزمایش های انجام شده در جدول (۳) آورده شده است. شکل (۴) پروفیل های سرعت اندازه گیری شده را برای آزمایش Q1.5C10S3.25 نشان می دهد. لازم به ذکر است محور افقی در این شکل فاصله از دریچه است. با مقایسه شکل (۳) و (۴) مشاهده می شود با پیشروی جریان در طول فلوم با افزایش ارتفاع جریان از کف فلوم ارتفاع پروفیل های سرعت نیز افزایش یافته است. با توجه به این که آزمایش ها با ۴ دبی متفاوت انجام شد در ابتدا به بررسی اثر دبی بر روی پروفیل های سرعت در جریان میان گذر پرداخته می شود. با توجه به زیاد بودن تعداد پراب های اندازه گیری سرعت و از آنجا که روند تغییرات سرعت در تمامی پراب ها شبیه یکدیگر است در اینجا سه پراب برای بررسی پروفیل سرعت در سه موقعیت از جریان انتخاب شدند یکی در ابتدای فلوم که در این مرحله جریان زیرگذر

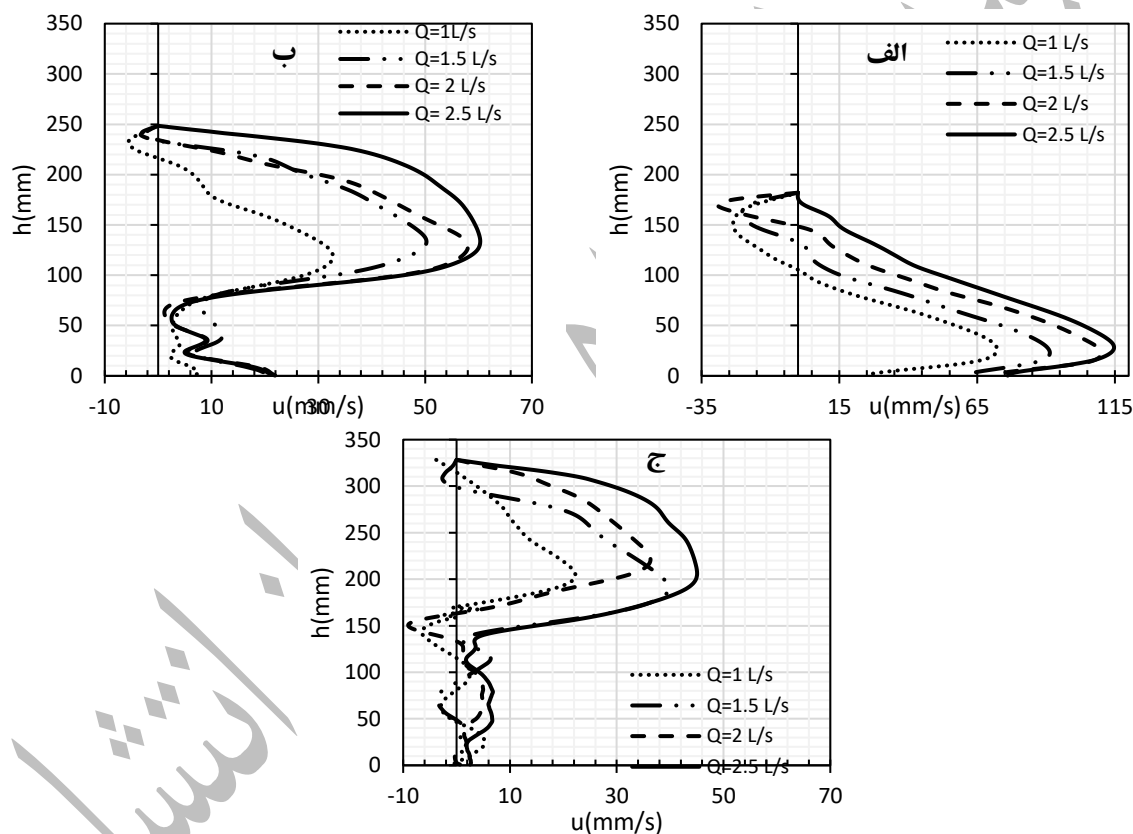
### جدول ۳- مشخصات آزمایش های انجام شده

نام آزمایش	سری آزمایش ها برای شیب ۲/۵ درصد				سری آزمایش ها برای شیب ۳/۲۵ درصد				سری آزمایش ها برای شیب ۴ درصد			
	$C_{in}(\frac{g}{l})$	$\rho(\frac{g}{cm^3})$	$U_f(\frac{mm}{s})$	$Ri$	$C_{in}(\frac{g}{l})$	$\rho(\frac{g}{cm^3})$	$U_f(\frac{mm}{s})$	$Ri$	$C_{in}(\frac{g}{l})$	$\rho(\frac{g}{cm^3})$	$U_f(\frac{mm}{s})$	$Ri$
Q1C5	۶/۵	۱۰۰۴/۱۶	۲۷/۵۰	۱/۰۹	۴/۱۳	۱۰۰۲/۶۷	۲۸/۰۰	۱/۴۶	۴/۹۳	۱۰۰۳/۱۷	۳۲/۶۴	۴/۲۴
Q1.5C5	۴/۷۴	۱۰۰۳/۶	۳۶/۸۵	۱/۴۲	۴/۲۹	۱۰۰۲/۷۸	۴۱/۱۲	۱/۳۴	۴/۶۳	۱۰۰۲/۹۹	۴۲/۴۱	۳/۴۴
Q2C5	۳/۷۶	۱۰۰۲/۴۵	۴۳/۵۹	۱/۰۳	۴/۶۵	۱۰۰۳	۴۳/۱۸	۳/۷	۳/۸۸	۱۰۰۲/۵۲	۴۵/۳۳	۲/۹۵
Q2.5C5	۴/۲۶	۱۰۰۲/۷۶	۵۱/۸۷	-/۸۳	۴/۲۳	۱۰۰۲/۷۴	۴۵/۳۷	۳/۰۲	۴/۵۰	۱۰۰۲/۹۱	۴۹/۷	۲/۸۶
Q1C10	۸/۹۵	۱۰۰۵/۶۹	۳۸/۰۵	۲/۶۳	۶/۷۹	۱۰۰۴/۳۴	۳۸/۹۱	۱/۲۵	۷/۴۰	۱۰۰۴/۷۲	-۰۶/۳۹	۱/۹۱
Q1.5C10	۱۰/۲۷	۱۰۰۶/۵۲	۴۴/۷۶	۱/۲۷	۹/۰۵	۱۰۰۵/۷۶	۵۲/۹۱	۱/۲۹	۸/۳۱	۱۰۰۵/۲۹	۴۵/۴۵	-/۹۳
Q2C10	۸/۵۷	۱۰۰۵/۴۶	۵۲/۰۸	-/۸۸	۹/۳۱	۱۰۰۵/۹۲	۶۰/۲۴	۱/۲۸	۷/۹۶	۱۰۰۵/۰۸	۴۸/۴۵	۳/۲۳
Q2.5C10	۹/۵۶	۱۰۰۶/۰۸	۶۱/۹۶	-/۹۵	۸/۷۸	۱۰۰۵/۵۸	۶۲/۵۰	۱/۹۳	۸/۷۸	۱۰۰۵/۵۸	۵۶/۲۴	۱/۰۸
Q1C15	۱۲/۸	۱۰۰۸/۰۱	۳۹/۱۵	۱/۵۴	۱۴/۵۶	۱۰۰۹/۲۱	۵۲/۳۶	-/۹۴	۱۱/۴۶	۱۰۰۷/۲۷	۴۴/۸	۳/۰۴
Q1.5C15	۱۲/۴۵	۱۰۰۷/۸۸	۵۶/۷۵	۱/۱۳	۱۳/۷۳	۱۰۰۸/۶۸	۵۰/۹۲	۳/۸۷	۱۳/۳۳	۱۰۰۸/۴۳	۵۳/۱۹	۱/۵۶
Q2C15	۱۳/۰۳	۱۰۰۸/۲۴	۵۹/۴۵	-/۸۸	۱۳/۳۰	۱۰۰۸/۴۲	۶۲/۵۰	۱/۳	۱۲/۶۰	۱۰۰۱۰/۴۲	۵۵/۵۶	-/۷۹
Q2.5C15	۱۳/۰۱	۱۰۰۸/۲۴	۶۵/۹۶	۱/۱۱	۱۳/۱۴	۱۰۰۸/۳۱	۷۲/۴۶	۱/۲۶	۱۱/۶۹	۱۰۰۹/۶۷	۵۷/۴۷	۱/۵
Q1C20	۱۹/۵۱	۱۰۱۲/۳	۴۴/۰۵	۱/۱۷	۱۶/۴۱	۱۰۱۰/۳۶	۴۶/۹۰	۵/۷۲	۱۳/۳۳	۱۰۱۱/۰۲	۵۳/۲۵	۳/۲۹
Q1.5C20	۱۶/۶	۱۰۱۰/۳۹	۶۳/۱۳	-/۵۴	۱۷/۷۳	۱۰۱۱/۱۹	۷۱/۴۳	۱/۲۸	۱۴/۷۴	۱۰۱۲/۱۹	۵۸/۸۹	۱/۱۲
Q2C20	۲۰/۷۱	۱۰۱۳/۰۶	۷۷/۷۶	-/۴۸	۱۸/۴۹	۱۰۱۱/۶۶	۷۲/۵۵	-/۶۴	۱۵/۷۰	۱۰۱۲/۹۹	۱۴/۵۲	-/۸۷
Q2.5C20	۱۸/۹۱	۱۰۱۱/۹۳	۸۶/۸۱	-/۷۲	۱۵/۴۳	۱۰۰۹/۷۵	۵۲/۵۸	۲/۱۵	۱۶/۸۸	۱۰۱۳/۹۶	۷۳/۷۵	۴/۸۵

## پذیرفته شده پیش از انتشار



شکل ۴- پروفیل‌های سرعت در طول جریان میان‌گذر



شکل ۵- پروفیل‌های سرعت برای غلظت ۱۵ میلی گرم بر لیتر و شیب ۲/۵ درصد. الف) پراب شماره ۱، ب) پراب شماره ۴ و ج) پراب شماره ۷

بالایی و کاهش اختلاف چگالی جریان با سطح مشترک پایینی را به-دنبال دارد. که این فرایند سبب اختلاط بیشتر در سطح مشترک بالایی و نیروی محرک کمتر در سطح مشترک پایینی می‌شود در نتیجه اثر ترکیبی این دو باعث می‌شود کاهش سرعت جریان در دبی‌های بالاتر کمتر از دبی‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد. بطور متوسط وقتی که جریان از حالت زیرگذر تبدیل به میان‌گذر می‌شود با افزایش

لازم به ذکر است وقتی جریان میان‌گذر می‌شود اختلاط در سطح مشترک بالایی بیشتر از سطح مشترک پایینی است زیرا اختلاف چگالی زیاد جریان با لایه زیرین باعث ایجاد نیروی محرکی می‌شود که از اختلاط زیاد در سطح مشترک پایینی جلوگیری می‌کند. افزایش دبی سبب کاهش رسوب‌گذاری جریان چگال در طی حرکت می‌شود در نتیجه افزایش اختلاف چگالی جریان با سطح مشترک

# پذیرفته شده پیش از انتشار

## جدول ۴- درصد کاهش سرعت بین پرابها

مشخصات آزمایش	سری آزمایش‌ها برای شیب ۲/۵ درصد			سری آزمایش‌ها برای شیب ۳/۲۵ درصد			سری آزمایش‌ها برای شیب ۴ درصد		
	T(S)	$\left(\frac{U_4 - U_1}{U_1}\right)\%$	$\left(\frac{U_7 - U_4}{U_4}\right)\%$	T(S)	$\left(\frac{U_4 - U_1}{U_1}\right)\%$	$\left(\frac{U_7 - U_4}{U_4}\right)\%$	T(S)	$\left(\frac{U_4 - U_1}{U_1}\right)\%$	$\left(\frac{U_7 - U_4}{U_4}\right)\%$
Q1C5	۱۸۰	۴۲/۶۹	۳/۱۷	۲۴۴	۳۵/۵۶	۱۱/۳۹	۳۰۰	۱/۸۸	۱۱/۴۰
Q1.5C5	۲۶۷	۴۸/۲۸	۳۲/۸	۱۹۲	۳۷/۱۹	۱۳/۹۵	۱۹۳	۳/۶۴	۲/۰۸
Q2C5	۱۹۲	۳۰/۹۴	۱۲	۲۱۶	۶/۱۱	۱۲	۲۰۵	۲/۱۹	۳۹/۱۳
Q2.5C5	۱۴۴	۳۳/۵۴	۱۵/۳۹	۲۰۲	۷/۴۳	۶/۸۷	۱۵۷	۱۶/۲۱	۱/۲۱
Q1C10	۲۳۲	۴۹/۰۴	۳۲/۳۴	۲۰۳	۴۵/۴۲	۱۴/۶۸	۲۲۵	۵۲/۶۲	۳۱/۲۲
Q1.5C10	۱۶۷	۵۲/۴۴	۸/۲۷	۱۵۵	۴۱/۸۸	۲۹/۳۰	۱۵۳	۰/۷۱	۳۴/۱۴
Q2C10	۱۳۹	۵۰/۷۸	۱۰/۹۴	۱۲۰	۲/۳	۲۰/۶۷	۱۷۶	۱۳/۸۲	۱۴/۰۵
Q2.5C10	۱۱۲	۴۰/۳۹	۳۹/۸۱	۱۱۹	۱۹/۷۷	۲۳/۳۱	۱۳۳	۲۸/۸۹	۲۹/۸۱
Q1C15	۲۱۵	۵۷/۹۳	۳۳/۱۸	۱۳۱	۳/۷۲	۳۴/۴۶	۱۸۷	۳۱/۷۰	۲۵/۸
Q1.5C15	۱۳۱	۴۴/۷۶	۲۳/۰۶	۲۲۱	۳۵/۳۷	۴/۷۳	۱۴۴	۲۵/۷۳	۳۰/۸
Q2C15	۱۱۱	۴۴/۹۹	۳۸/۴۵	۱۰۸	۱۸/۴۷	۲۵/۱۲	۱۱۷	۱۷/۰۷	۱۵/۲۹
Q2.5C15	۱۰۸	۴۰/۵۳	۲۶/۲۱	۱۰۳	۱۴/۱۰	۲۸/۳۳	۱۲۷	۴۷/۵۷	۱/۳۵
Q1C20	۱۷۸	۵۸/۱۱	۵/۰۴	۲۱۷	۳۶/۸۰	۷/۷۹	۱۹۰	۴۷/۴۲	۳۳/۱۱
Q1.5C20	۱۰۶	۴۹/۴۲	۴۳/۳۶	۹۸	۲۸/۱۸	۵۶/۸۵	۱۱۹	۹۳/۴۲	۱۵/۷۰
Q2C20	۹۱	۴۹/۳۴	۳۹/۵۸	۱۰۱	۴۷/۰۸	۶۰/۸۹	۱۴۶	۵۵/۶۰	۱/۱۸
Q2.5C20	۸۸	۴۳/۹۸	۳۵/۶۳	۱۵۱	۵۶/۰۴	۱۳/۸۴	۹۶	۲۴/۵۴	۲/۰۸

پیرامون می‌شود، نشان می‌دهد. سرعت جریان بعد از جدا شدن از بستر کاهش یافته است. با افزایش غلظت ارتفاع نقطه سرعت بیشینه کاهش یافته است زیرا جریان چگال تر است و ذرات رسوب در جریان به لایه‌های پایین تر سقوط کرده بنابراین چگالی جریان در این لایه‌ها افزایش یافته و سرعت بیشتر شده است. بطور متوسط وقتی جریان از حالت زیرگذر تبدیل به حالت میان‌گذر می‌شود با افزایش غلظت از ۵ تا ۲۰ گرم بر لیتر درصد کاهش سرعت بدنه به ترتیب ۱۱، ۲۰ و ۳۶ درصد در شیب‌های ۳/۲۵، ۲/۵ و ۴ درصد افزایش یافته است.

شکل (۶) (ج) پروفیل‌های سرعت را در حالتی که جریان کاملاً میان‌گذر است، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در این مرحله ضخامت پروفیل‌ها ثابت شده است زیرا جریان در این مرحله در لایه‌ای که چگالی سیال پیرامون با چگالی جریان برابر باشد بطور افقی تمایل به حفظ حرکت خود دارد.

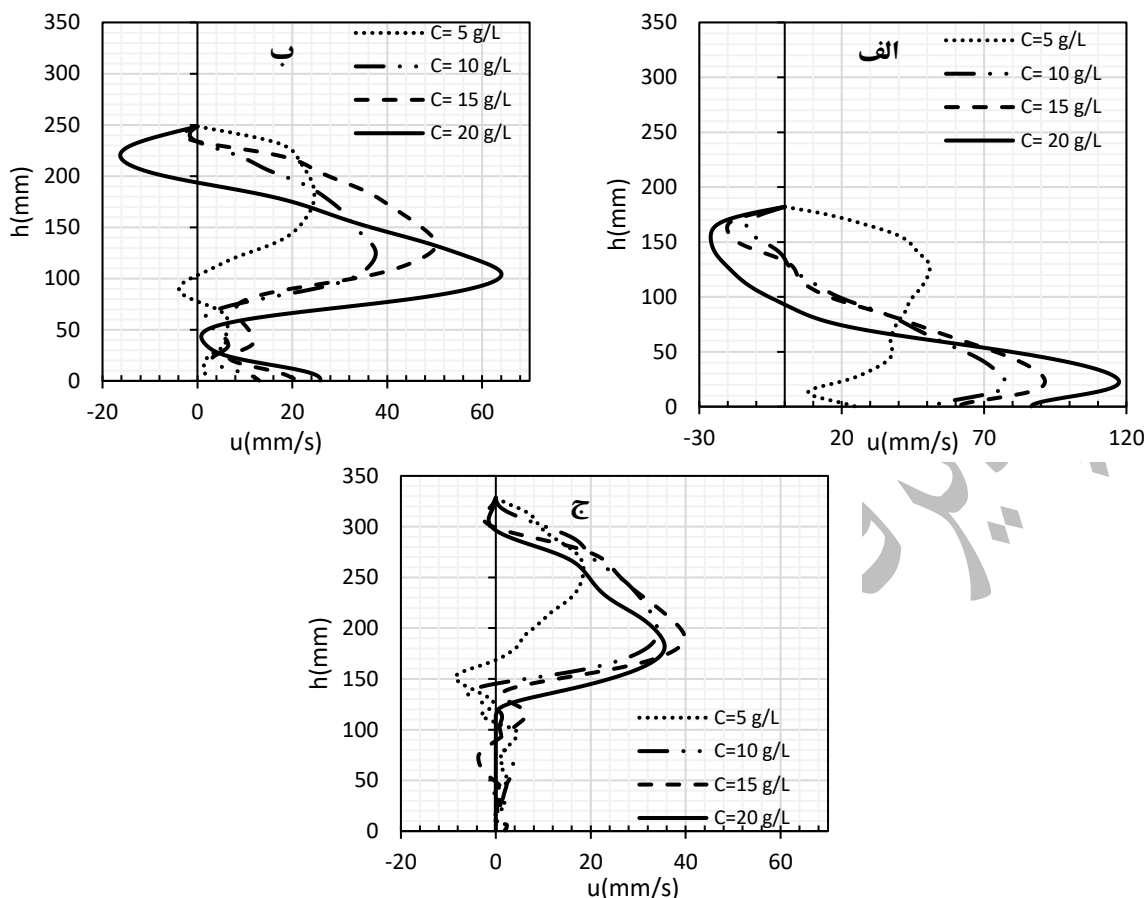
در مرحله‌ای که جریان از حالت زیرگذر تبدیل به میان‌گذر می‌شود کاهش سرعت بیشتر از مرحله‌ای است که جریان به صورت میان‌گذر به حرکت خود ادامه می‌دهد. زیرا در مرحله اول حرکت جریان از شیب‌دار به افقی تبدیل می‌شود، لذا شیب هیدرولیکی جریان به صفر میل می‌کند. در ادامه تحت همان انرژی اولیه (زمان جدا شدن جریان از بستر) ادامه مسیر می‌دهد و تنش برشی وارد بر جریان در این حالت کمتر است، بنابراین مشخصات جریان در بازه کوتاه مورد آزمایش تغییر محسوسی ندارد.

دبی از ۱ تا ۲/۵ لیتر بر ثانیه درصد کاهش سرعت به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۱۵ درصد در شیب‌های ۳/۲۵، ۲/۵ و ۴ درصد کاهش یافته است (جدول ۴). شکل (۵) (ج) پروفیل‌های سرعت جریان را در حالتی که جریان کاملاً میان‌گذر است نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۵) (ب و ج) مشاهده می‌شود ضخامت پروفیل‌های سرعت در این مرحله تقریباً ثابت است. در این مرحله با حرکت رو به جلوی جریان میان‌گذر در سیال پیرامون ذرات رسوبی که در جریان وجود دارند تمایل به ته نشین شدن دارند و از ارتفاع بالاتر جریان به سمت لایه زیرین حرکت می‌کنند و چگالی قسمت‌های پایینی جریان بیشتر از قسمت‌های بالایی آن می‌شود در نتیجه ارتفاعی که در آن سرعت بیشینه اتفاق افتاده است به مرز مشترک پایینی نزدیک تر می‌شود.

همانطور که در شکل (۶) (الف) مشاهده می‌شود پروفیل‌های سرعت با افزایش غلظت افزایش یافته‌اند در غلظت ۵ گرم بر لیتر چون اختلاف چگالی جریان ورودی و سیال پیرامون کم است، جریان در این مقطع از بستر جدا شده است و به صورت میان‌گذر در سیال پیرامون در حال حرکت است، بنابراین شکل پروفیل سرعت با بقیه پروفیل‌ها متفاوت است. با افزایش غلظت، ارتفاع پروفیل‌های سرعت کاهش یافته است و مقدار بیشینه سرعت افزایش یافته است زیرا افزایش غلظت سبب افزایش اختلاف چگالی شده است و اختلاف چگالی سرعت جریان را افزایش می‌دهد. شکل (۶) (ب) پروفیل‌های جریان چگال را در حالتی که جریان از کف جدا شده و وارد سیال



## پذیرفته شده پیش از انتشار



شکل ۶- پروفیل‌های سرعت برای دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه و شیب ۲/۵ درصد. الف) پراب شماره ۱، ب) پراب شماره ۴ و ج) پراب شماره ۷

سرعت جریان افزایش می‌یابد. در اینجا تعادل اثر ترکیبی این دو باعث تغییرات در سرعت جریان می‌شود.

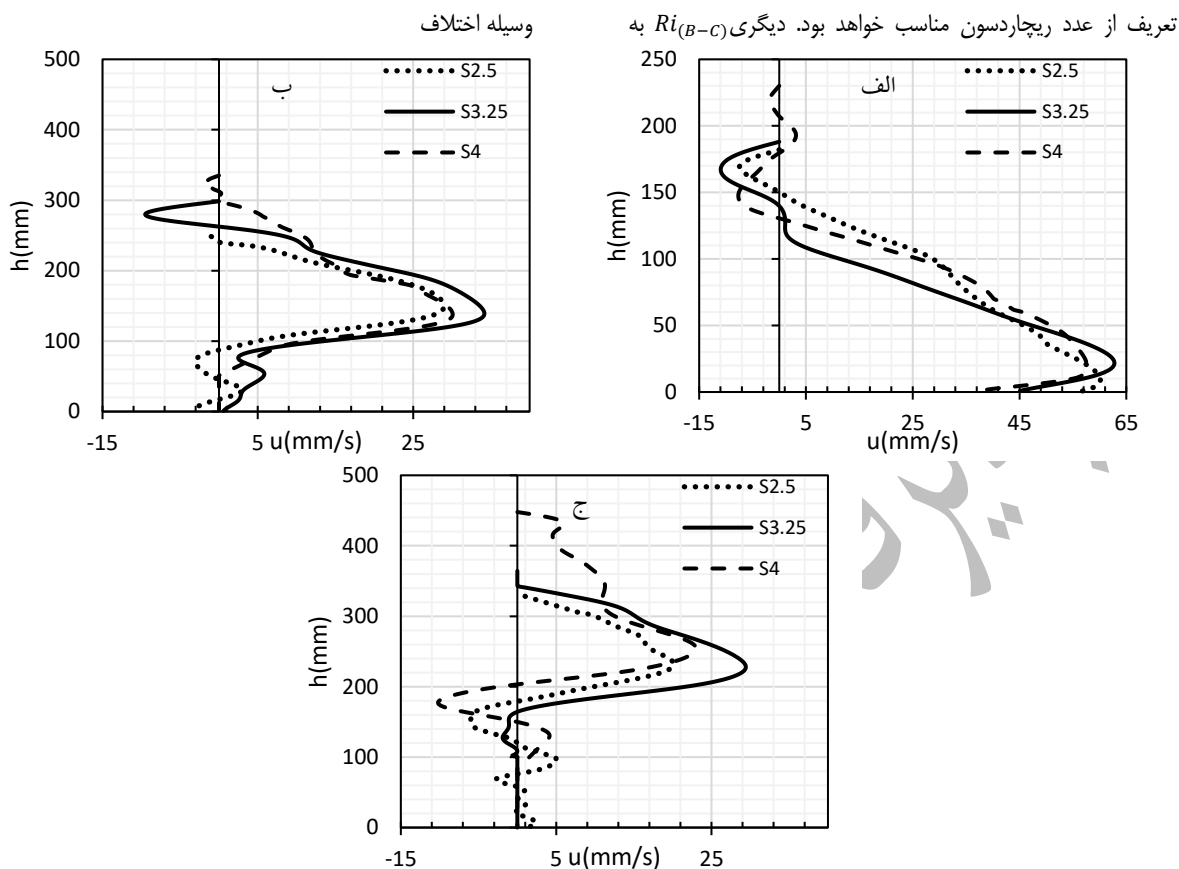
### عدد ریچاردسون

از آنجایی که سیال چگال در میان سیال پیرامون با لایه‌بندی مختلف در حرکت است عدد ریچاردسون را می‌توان بین هر دو لایه، بسته به تعریف  $\Delta\rho$  تعریف کرد. اگر چگالی لایه‌های سیال پیرامون و جریان چگال را متوسط گیری کنیم می‌توان فرض کرد سه لایه با چگالی‌های مختلف در میان یکدیگر وجود دارد، عدد ریچاردسون را می‌توان به سه روش مختلف تعریف کرد: اول  $Ri_{(C-T)}$  که به وسیله اختلاف چگالی بین جریان و سیال لایه بالایی تعریف می‌شود. این تعریف از عدد ریچاردسون بستگی به سرعت و ارتفاع جریان غلیظ دارد. همان‌طور که جریان در ابتدا زیرگذر است و با لایه بالایی برخورد می‌کند. اگر جریان در محیط یکنواخت پخش شود، تنها این

### تأثیر شیب

همان‌طور که در ابتدا بیان شد آزمایش‌ها روی سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد انجام شد. شکل (۷) پروفیل سرعت را در سه شیب مورد آزمایش نشان می‌دهد. در هر شیب ارتفاع آب در ابتدای فلوم با توجه به برابر بودن حجم سیال پیرامون در لایه‌بندی، متفاوت است. بطوری که در شیب ۲/۵ درصد ارتفاع آب حدود ۱۳ سانتی‌متر، در شیب ۳/۲۵ درصد ارتفاع آب حدود ۱۶ سانتی‌متر و در شیب ۴ درصد ارتفاع آب حدود ۲۰ سانتی‌متر است. با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که با افزایش شیب سرعت جریان ابتدا افزایش یافته است و سپس کاهش یافته است. به این دلیل که با افزایش شیب، نیروی محرک جریان چگال افزایش می‌یابد. افزایش نیروی محرک سبب افزایش درون آمیختگی می‌شود در نتیجه افزایش درون- آمیختگی باعث اتلاف مومنوم می‌شود. بطور کلی با افزایش شیب

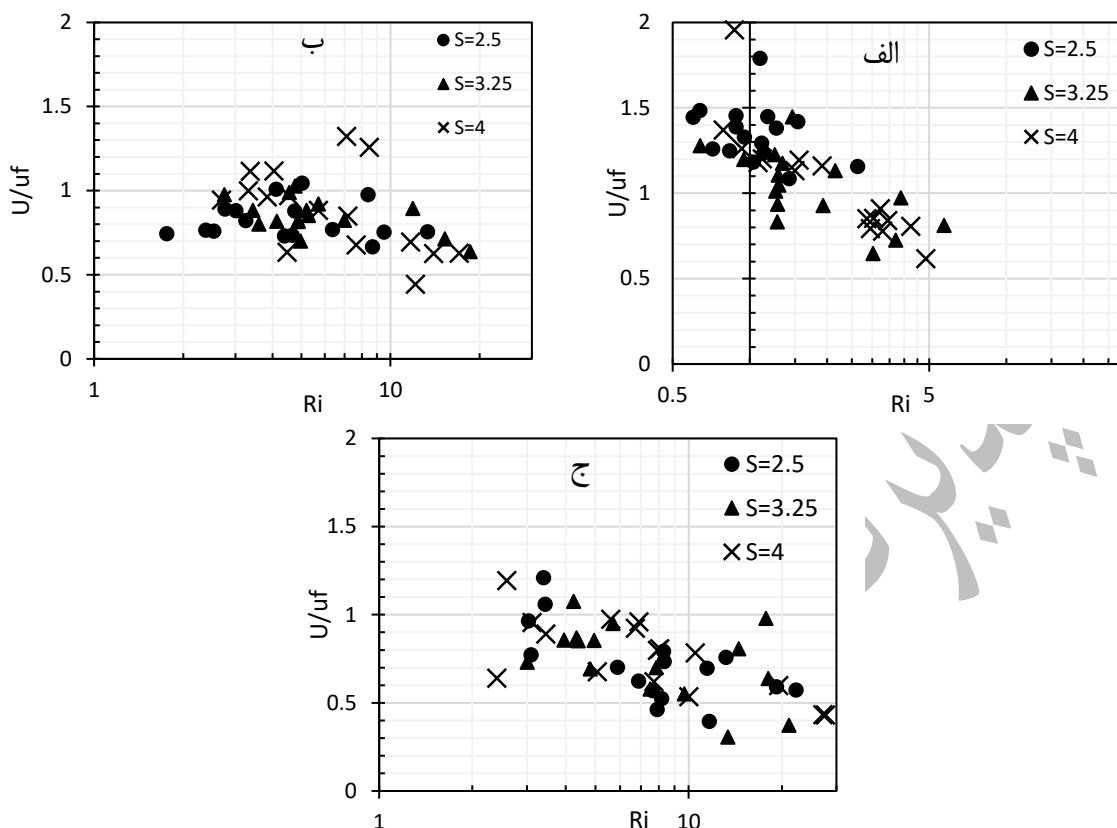
## پذیرفته شده پیش از انتشار



با توجه به رابطه (۷) کم شدن سرعت باعث افزایش عدد ریچاردسون می‌شود. وقتی جریان میان‌گذر وارد سیال پیرامون می‌شود آشفتگی ناشی از مرز به سرعت از بین می‌رود و تنش برشی وارد شده به جریان نسبت به حالتی که روی بستر صلب حرکت می‌کند کاهش می‌یابد و تنها تنش برشی بین دو سیال روی اختلاط اثر دارد. با حرکت رو به جلوی جریان پیشانی آن نازک‌تر می‌شود. به دلیل اختلاط در سطح مشترک ضخامت بدنه جریان بیشتر می‌شود در نتیجه سرعت پیشانی جریان در حالت میان‌گذر بیشتر از سرعت بدنه جریان می‌شود. عواملی مانند اختلاف چگالی سیال پیرامون با جریان و سرعت اولیه جریان مقدار سرعت پیشانی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در محل پراب شماره ۱ جریان زیر گذر است و در بیشتر آزمایش‌ها سرعت پیشانی کمتر از سرعت بدنه است اما با افزایش شیب نیروی محرک جریان افزایش می‌یابد در نتیجه سرعت بدنه جریان افزایش می‌یابد. بنابراین نسبت سرعت بدنه به سرعت پیشانی کم می‌شود.

چگالی بین سیال لایه پایینی و جریان تعریف می‌شود. بعد از میان‌گذر شدن، جریان چگال با سیال لایه پایینی رو به رو می‌شود. این تعریف از عدد ریچاردسون، میزان سیالی که از لایه پایینی وارد جریان چگال می‌شود را کنترل می‌کند. در نهایت  $Ri_{(B-T)}$  به وسیله اختلاف چگالی بین سیال لایه پایینی و سیال لایه بالایی تعریف می‌شود. این تعریف از عدد  $Ri$  نشان دهنده دوام نسبی سطح مشترک است. شکل (۸) عدد ریچاردسون محاسبه شده از رابطه ۷ را در مقابل سرعت محاسبه شده از رابطه ۵ نسبت به سرعت پیشانی جریان در سه شیب مورد آزمایش را نشان می‌دهد. عدد ریچاردسون کمتر از یک در شکل (۸) (الف) نشان دهنده‌ی فوق بحرانی بودن جریان در این مرحله است. در این محدوده جریان چگال پس از یک پرش هیدرولیکی که قبل از میان‌گذر شدن اتفاق می‌افتد تبدیل به زیر بحرانی می‌شود. محدوده عدد  $Ri$  به شدت تحت تأثیر سرعت جریان چگال قرار دارد. عددهای ریچاردسون بزرگ به ازای دبی‌های کم اتفاق افتاده‌اند شود. زیرا سرعت بدنه در دبی‌های کم کوچکتر است و

## پذیرفته شده پیش از انتشار



شکل ۸- عدد ریچاردسون الف) پرآب شماره ۱، ب) پرآب شماره ۴ و ج) پرآب شماره ۲

۴ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش غلظت اختلاف سرعت متوسط در حالت زیرگذر و میان‌گذر بیشتر شده است. در یک غلظت مشخص با افزایش دبی، ضخامت و سرعت جریان افزایش می‌یابد. در یک دبی ثابت با افزایش غلظت ارتفاع نقطه سرعت پیشینه کاهش یافته است. سرعت پیشانی جریان در حالت میان‌گذر بیشتر از سرعت بدنه است. ضخامت پیشانی جریان نیز کمتر از ضخامت بدنه است. با افزایش غلظت مقدار شتاب ثقل کاهش یافته جریان در سیال لایه بندی شده افزایش می‌یابد.

### نتیجه گیری

برای شناخت پروفیل سرعت در جریان چگال میان‌گذر نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر است:  
وقتی که جریان از حالت زیرگذر به میان‌گذر تبدیل می‌شود با افزایش دبی از ۱ تا ۲/۵ لیتر بر ثانیه درصد کاهش سرعت به ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۱۵ درصد در شیب‌های ۳/۲۵، ۲/۵ و ۴ درصد کاهش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش دبی اختلاف سرعت بدنه در حالت زیرگذر با حالت میان‌گذر کمتر شده است. همچنین افزایش دبی ضخامت پروفیل‌های سرعت را افزایش می‌دهد. با افزایش غلظت از ۵ تا ۲۰ گرم بر لیتر وقتی جریان از حالت زیرگذر تبدیل به حالت میان‌گذر می‌شود درصد متوسط کاهش سرعت بدنه به ترتیب ۱۱، ۲۰ و ۳۶ درصد در شیب‌های ۳/۲۵، ۲/۵ و

### منابع

1. Ahlfeld, D., Joaquin, A., Tobiason, J. & Mas, D. 2003. Case study: Impact of reservoir stratification on interflow travel time. *Journal of hydraulic engineering*, 129, 966-975.
2. Baines, P. G. 2001. Mixing in flows down gentle slopes into stratified environments. *Journal of Fluid Mechanics*, 443, 237-270.

## پذیرفته شده پیش از انتشار

3. Benjamin, T. B. 1968. Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics*, 31.
4. Cortes, A., Wells, M., Fringer, O., Arthur, R. & Rueda, F. 2015. Numerical investigation of split flows by gravity currents into two-layered stratified water bodies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 5254-5271.
5. De Rooij, F., Linden, P. F. & Dalziel, S. B. 2002. Saline and particle-driven interfacial intrusions. *Journal of Fluid Mechanics*, 389, 303-334.
6. Firoozabadi, B., Afshin, H. & Aram, E. 2009. Three-dimensional modeling of density current in a straight channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135, 393-402.
7. He, Z., Zhao, L., Lin, T., Hu, P., Lv, Y., Ho, H.-C. & Lin, Y.-T. 2016. Hydrodynamics of gravity currents down a ramp in linearly stratified environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143, 04016085.
8. Hopfinger, E. 1978. Buoyancy effects on the large scale structure of free turbulent shear flows. *Structure and Mechanisms of Turbulence I*. Springer.
9. Imberger, J. & Rorty, T. 1976. Selective withdrawal from a finite rectangular tank. *Journal of Fluid Mechanics*, 78.
10. Lowe, R., Linden, P. F. & Rotman, J. W. 2002. A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current. *Journal of Fluid Mechanics*, 456, 33-48.
11. Middleton, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21, 89-114.
12. Samothrakis, P. & Cotel, A. 2006. Propagation of a gravity current in a two-layer stratified environment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111.
13. Simpson, J. E. 1997. *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory* Cambridge University Press.
14. Snow, K. & Sutherland, B. R. 2014. Particle-laden flow down a slope in uniform stratification. *Journal of Fluid Mechanics*, 755, 251-273.
15. Sutherland, B. R., Kyba, P. J. & Flynn, M. R. 2004. Intrusive Gravity Currents in Two layer Fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, 514, 327-353.
16. Thompson, B. 1986. Small-scale katabatics and cold hollows. *Weather*, 41, 146-153.
17. Turner, J. S. 1979. *Buoyancy effects in fluids*, Cambridge University Press.
18. Valentine, G. A. 1987. Stratified flow in pyroclastic surges. *Bulletin of Volcanology*, 49, 616-630.
19. Wells, M. & Nadarajah, P. 2008. The Intrusion Depth of Density Currents Flowing into Stratified Water Bodies. *Journal of Physical Oceanography*, 39, 1935-1947.
20. Zange, X. F., Ren, S., Lu, J. Q. & Lu, X. H. 2015. Effect of thermal stratification on interflow travel time in stratified reservoir. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 16, 265-278.

## Experimental Investigation of Velocity Profile in Interflow Density Current

M. Sadeghi Askari<sup>1</sup> and M. Ghomeshi<sup>2\*</sup>

1- PhD Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

2\*- Professor, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.  
M.ghomeshi@yahoo.com

**Keywords:** density current, velocity profile, stratification, concentration gradient, silica particles.

### 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 current happen in geophysical environments. One of the most important types of these streams that occur in large-scale nature is density flow [Middleton 1993]. These flows are happen due to gravity and its effect on the density gradient. 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 [He et al, 2016]. Some examples of gravity currents found in nature katabatic winds thunderstorms, dust storms (haboobs), turbidity currents running down the continental shelf, and advancing cold fronts [Thompson, 1984]. Examples of gravity currents found in industrial processes are the spread of heavy gases and also ventilation systems that utilize buoyancy to drive horizontal flows along the ceiling and floor [Samothrakis, 2006]. Other examples of gravity currents that are encountered in nature include snow avalanches [Hopfinger, 1977] and pyroclastic flows [Valentine, 1987]. There are also examples of man-made gravity currents with industrial applications. Such an example is the instantaneous release of a dense gas in a less dense environment, after the failure of a containment tank [Baines, 2001]. Simpson [1997] has detailed descriptions of these and other examples of gravity currents and also provides an overview of the research performed on the subject

In dams reserve ambient fluid, usually has a vertical stratification. Therefore, the density current into this reservoirs may flow as interflow. In this study, the density current was investigated in ambient stratification fluid. For Experimental Investigation of velocity profile in interflow density current at stratification ambient, experiments were performed by 4 discharge 1, 1.5, 2 and 2.5 liters per second, and 4 concentrations 5, 10, 15 and 20 grams per liters on the bed slope 2.5, 3.25 and 4 percent. Stratification of ambient fluid was carried out by mixture water and salt with a deep concentration gradient. To create density flow silica particles with an average diameter of 8 microns was used.

### Methodology

The experiments are performed in an 8.8 meter long flume, 70 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. The velocity was recorded by the DOP2000 velocity meter. The measurements were performed on the central line of the flume and in 7 sections and at different intervals of the entrance.

### Parameters

In this work, we consider of velocity profile in interflow density current. For the series of experiments performed in this study the Reynolds number is less than 2000 is defined as equation (1):

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (1)$$

Where  $U$  and  $h$  are the characteristic velocity and height of the body of the gravity current  $\nu$  is the kinematic viscosity of water.

The densimetric Froude number  $F_{rG}$  is calculated from the average velocity  $U$ , thickness  $h$  and reduced gravity  $g'$  of the gravity current, as follows equation (2):

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

Where  $g' = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} g$ , and  $\rho$  is the density excess of the gravity current at each position. Because we know the gravity current velocity profile  $u(z)$  and its density excess profile  $\rho(z)$  we can calculate the average thickness  $h$  equation (4), velocity  $U$  equation (3), and reduced gravity  $g'$  equation (5) as in Ellison and Turner [1959].

$$U = \frac{\int_0^{\infty} u(z)^2 dz}{\int_0^{\infty} u(z) dz} \quad (3)$$

$$h = \frac{(\int_0^{\infty} u(z) dz)^2}{\int_0^{\infty} u(z)^2 dz} \quad (4)$$

$$g' = \frac{g}{\rho_w} * \frac{\int_0^{\infty} \Delta\rho(z) u(z) dz}{\int_0^{\infty} u(z) dz} \quad (5)$$

Equation (6) is the Richardson number based on the characteristics of the gravity current

$$Ri = \frac{g' h \cos(\theta)}{U^2} \quad (6)$$

All parameters introduced before.

### Results and Discussen

Study the velocity profile show the first, density current is underflow and due to high density difference between density current and ambient water the velocity of density current increase. In this state increase the discharge make the current body thickness and major velocity. When the density current separated from the bed and driven to ambient water horizontally, the velocity of density current decreases. In the next state density current formed as interflow and with the lower velocity than before state. Because mixing at upper and lower interface was happened.

Increasing of concentration increase maximum velocity profile. At concentration of 5 grams per liter, because the density differences between density current and the ambient fluid is low, the density

## پذیرفته شده پیش از انتشار

current at this section is separated from the bed and is driven in the ambient fluid, so the form of the velocity profile in this concentration is different from other profiles.

Since there are several stratification with different densities and density current intrude between them, the Richardson number can be defined in three different ways depending on the definition of  $\Delta\rho$ . The first one,  $Ri(C_T)$ , is defined by the density difference between the current and top layer fluids. This definition of  $Ri$  number determines the velocity and height of the body of the gravity current. The second one,  $Ri(B_C)$ , is defined by the density difference between the current and bottom layer fluids. After the separation, the gravity current encounters the bottom layer fluid and their density difference is taken into account through  $Ri(B_C)$ . Finally the third one,  $Ri(B_T)$ , is defined by the density difference between the bottom and top layer fluids. This definition of  $Ri$  number represents the relative strength of the interface.

### Conclusions

Experimental results were presented that examined the velocity profile in interflow density current, the results of this study are follow as:

At a constant concentration, with increasing discharge, the thickness and current velocity increase. As the current flows, velocity decreases at higher discharge than the lower ones.

In a constant discharge with increasing concentration the maximum velocity increased.

As the discharge or concentration increases, the Richardson number decreases.

### References

1. Baines, P. G. 2001. Mixing in flows down gentle slopes into stratified environments. *Journal of Fluid Mechanics*, 443, 237-270.
2. He, Z., Zhao, L., Lin, T., Hu, P., Lv, Y., Ho, H.-C. & Lin, Y.-T. 2016. Hydrodynamics of gravity currents down a ramp in linearly stratified environments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143, 04016085.
3. Hopfinger, E. 1978. Buoyancy effects on the large scale structure of free turbulent shear flows. *Structure and Mechanisms of Turbulence I*. Springer.
4. Middleton, G. V. 1993. Sediment deposition from turbidity currents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21, 89-114.
5. Samothrakis, P. & COTEL, A. 2006. Propagation of a gravity current in a two-layer stratified environment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111.
6. Simpson, J. E. 1997. *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory* Cambridge University Press.
7. Thompson, B. 1986. Small-scale katabatics and cold hollows. *Weather*, 41, 146-153.
8. Turner, J. S. 1979. *Buoyancy effects in fluids*, Cambridge University Press.
9. Valentine, G. A. 1987. Stratified flow in pyroclastic surges. *Bulletin of Volcanology*, 49, 616-630.