

## بررسی پروفیل غلظت در جریان چگال میان گذر

محدثه صادقی عسکری<sup>1</sup> و مهدی قمشی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز  
2- استاد، سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

\* M.ghomeshi@yahoo.com

**چکیده-** جریان‌های چگال که اغلب جریان گرانشی یا شناوری نامیده می‌شوند جریان‌هایی هستند که به سبب اختلاف چگالی بین جریان و سیال پیرامون آن اتفاق می‌افتند. وقتی یک جریان چگال در یک سیال لایه‌بندی به سطح شناوری خنثی برسد، از کف جدا می‌شود و داخل سیال پیرامون نفوذ می‌کند. در این مطالعه برای بررسی رفتار جریان چگال در محیط پیرامون لایه‌بندی شده، آزمایش‌هایی انجام شد. این آزمایش‌ها با 4 دبی 1، 1/5، 2 و 2/5 لیتر بر ثانیه و 4 غلظت 5، 10، 15 و 20 گرم بر لیتر که به ترتیب جریان‌هایی با چگالی 1003/2، 1006/3، 1009/4 و 1012/5 گرم بر لیتر ایجاد می‌کردند، روی شیب 2/5 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 8 میکرون و وزن مخصوص 2/673 گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شد و برای بررسی پروفیل غلظت، غلظت جریان چگال در سه مقطع در طول فلوم با فواصل 3 سانتی‌متری در عمق با استفاده از سیفون برداشت شد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که جریان چگال بعد از جدا شدن از بستر تقریباً بصورت افقی در سیال پیرامون پیش می‌رود و چگالی سیال پیرامون در زیر نقطه جدایی کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری‌ها در این مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت، عمق غلظت بیشینه و ضخامت جریان کاهش می‌یابد و با افزایش دبی ضخامت جریان ثابت می‌ماند.

**کلیدواژگان:** جریان چگال، سیال لایه‌بندی شده، غلظت، چگالی.

### 1- مقدمه

است بصورت زیرگذر، میان‌گذر یا روگذر اتفاق بیافتد (Marti et al., 2011). لایه‌بندی عمودی تحت تأثیر دما در دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و مخازن و لایه‌بندی افقی تحت تأثیر دما و اختلاف چگالی در مصب رودها و دریاچه‌ها، نمونه‌هایی از لایه‌بندی سیال پیرامون در طبیعت هستند. جریان‌های چگال در همه جای زمین معمولاً روی شیب و در سیال لایه‌بندی جریان می‌یابند، زیرا لایه‌بندی افقی و عمودی معمولاً در طبیعت وجود دارد. بنابراین شیب و لایه‌بندی دو پارامتر مهم هستند که مشخصه‌های جریان چگال را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Samothrakis and Cotel, 2006). از آنجایی که جریان‌های چگال کاربردهای طبیعی و

جریان گرانشی یا چگال، جریانی است که به دلیل وجود نیروی گرانش و تأثیر آن بر روی اختلاف چگالی جریان نسبت به سیال پیرامون یا محیط اطراف ایجاد می‌گردد. در حالت معمول، سیال با چگالی  $\rho_2$  داخل سیال با چگالی  $\rho_1$  پخش می‌شود ( $\rho_2 > \rho_1$ ). اختلاف چگالی ممکن است به دلیل اختلاف درجه حرارت، تفاوت غلظت مواد معلق یا محلول و یا ترکیبی از هر دوی آن‌ها، بین سیال ورودی و سیال پیرامون بوجود آید. بطور کلی اختلاف چگالی جریان ورودی به مخزن و آب ذخیره شده در مخزن، شرایط دینامیکی جریان را پس از ورود به مخزن تعیین می‌کند. به دلیل اختلاف چگالی، جریان ورودی ممکن

در یک زمان در دو فاز قرار دارد) در محیط پیرامون دو لایه، سه پارامتر بی‌بعد  $(\sigma, \varepsilon, \Delta)$  را در مطالعات خود معرفی کردند. پارامتر  $\varepsilon$  مربوط به اختلاف چگالی بین جریان ثقیلی 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. آنها دریافتند که تغییر شکل جریان زیرگذر به میان‌گذر ممکن است باعث اختلاط اولیه شود. بنابراین چگالی جریان زیرگذر و میان‌گذر ممکن است یکسان باشد. Wells and Nadarajah (2008) دریافتند که نرخ اختلاط ( $E$ ) روی موقعیت تغییر شکل جریان (جایی که جریان از حالت زیرگذر تبدیل به حالت میان‌گذر می‌شود) مؤثر است. آنها برای توصیف عمق نقطه جدایی (جایی که جریان چگال از کف جدا می‌شود و وارد سیال پیرامون لایه‌بندی شده می‌شود)، آزمایش‌هایی را انجام دادند. ایشان رابطه‌ای را بین عمق نقطه جدایی، نرخ اختلاط  $E$ ، فلاکس شناوری جریان غلیظ و مقدار فرکانس شناوری  $N$  پیدا کردند. Imberger et al. (1976) فرض کردند که جریان میان‌گذر شناوری طبیعی، مومنت کم و شرایطی بین شرایط جریان ورودی و جریان خروجی دارد. ایشان پارامتر بی‌بعد  $R$  که تابعی از عدد فرود  $Fr$  است را برای پیش‌بینی دینامیک جریان میان‌گذر بدست آوردند و با مقایسه پارامتر  $R$  و عدد پراتل  $Pr$  رژیم جریان را تعیین کردند و معادله‌هایی برای عمق پیشروی و سرعت پیشروی جریان میان‌گذر در هر رژیم ارائه کردند. Snow and Sutherland (2014) آزمایش‌هایی را برای بررسی شوری و رسوب‌گذاری یک جریان پایین رونده روی شیب در دو سیال با لایه‌بندی خطی و چگالی ثابت انجام دادند. با توجه به تأثیر لایه‌بندی سیال پیرامون در جریان‌های گل‌آلود، جریان را به صورت روگذر و زیرگذر مورد بررسی قرار دادند و سرعت پیشانی و ارتفاع نقطه جدایی را اندازه‌گیری کردند. ایشان این نتایج را با پیش‌بینی‌های تئوری مقایسه کردند که مشخصه‌های توسعه جریان و عمق جدایی را در ترم‌های شیب  $\theta$  پارامتر اختلاط  $E$  (نسبت اختلاط به سرعت جریان)، پارامتر لایه‌بندی نسبی

مصنوعی زیادی دارند، بسیاری از آثار علمی برای چندین دهه بر این موضوع متمرکز شده‌اند. در بین انواع جریان چگال، جریان میان‌گذر به دلیل مشکل بودن شرایط ایجاد آن کمتر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. بنابراین تمرکز این پژوهش بیشتر بر روی جریان چگال به صورت میان‌گذر بوده است. بطور خاص چند محقق جریان چگال را در آزمایشگاه با آزادسازی لحظه‌ای سیال چگال<sup>1</sup> یا با یک منبع رانش پیوسته<sup>2</sup> (دبی ثابت در طول آزمایش) چندین بار تولید کرده‌اند. در حالت مخزن و دریاچه (آزاد سازی لحظه‌ای) یک کانال پلکسی‌گلاس به وسیله یک دریاچه عمودی به دو قسمت، یکی کوچک‌تر (قسمت پشت دریاچه) و دیگری بزرگ‌تر (قسمت جلوی دریاچه) تقسیم شده است. قسمت پشت دریاچه به وسیله سیالی با چگالی  $\rho_0$  و قسمت دیگر آن به وسیله دو سیال با چگالی‌های  $\rho_2$  و  $\rho_1$  پر شده است ( $\rho_1 < \rho_0 < \rho_2$ ). بدین صورت که ابتدا تا تراز مشخصی سیال با چگالی  $\rho_1$  به قسمت جلوی دریاچه وارد می‌شود. سپس سیال با چگالی  $\rho_2$  روی سیال با چگالی  $\rho_1$  اضافه می‌شود. با بالا رفتن ناگهانی دریاچه و حرکت سیال با چگالی  $\rho_0$  به داخل دو سیال دیگر در قسمت جلوی دریاچه، آزمایش شروع می‌شود. DE Rooij et al. (2002) پیشروی جریان نمکی و رسوبی را در طول سطح مشترک دو لایه با چگالی متفاوت بررسی کردند. آن‌ها به وسیله آنالیزی مانند آنالیز بنیامین<sup>3</sup> برای مرز جریان‌های چگال شرایط پیشانی جریان را توصیف کردند. همچنین روابطی برای سرعت انتشار و موقعیت پیشانی جریان چگال بر حسب چگالی نسبی استخراج کردند. Lowe et al. (2002) در مطالعه‌ای سرعت پیشانی را با استفاده از فرض پایستگی انرژی و معادله برنولی روی خط جریان بدست آوردند و همچنین عمق جریان میان‌گذر در هر لایه را نزدیک به نصف عمق لایه‌ی سیال پیرامون پیش‌بینی کردند. Kaeo (1997) سرعت پیشروی جریان چگال در طول سطح مشترک بین دو سیال همگن را بر پایه تئوری برنولی بدست آورد. Sutherland et al. (2004) برای تعریف انواع جریان‌های مرکب (مخلوط دوگانه ای که

1- lock-release experiment

2- Constant inflow

3- Benjamin

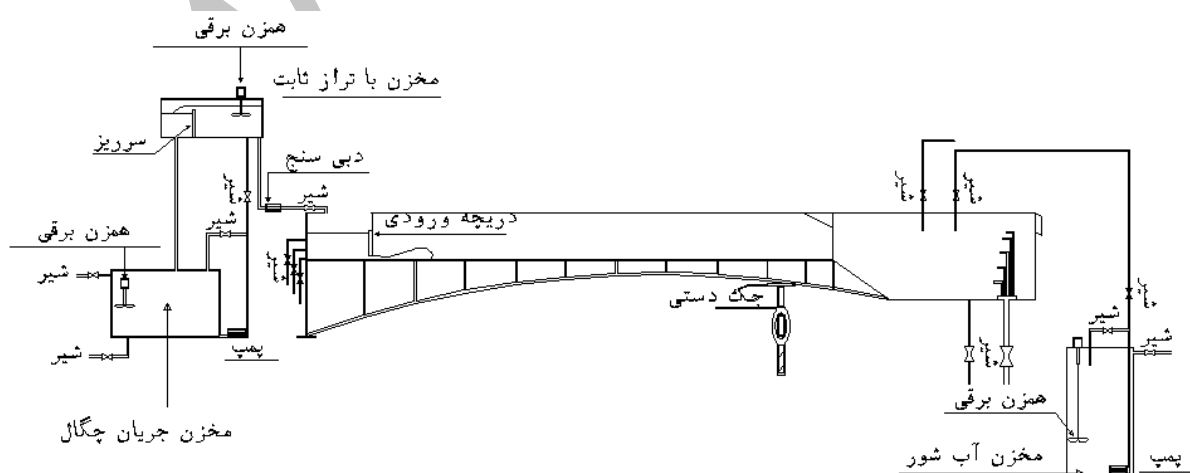
شاهد چمران اهواز انجام شد. در انتهای فلوم در کف و در ترازهای متفاوت لوله‌هایی برای تخلیه جریان نصب شد و به انتهای لوله‌ها شیر وصل شد. در فاصله 80 سانتی‌متری از ابتدای کانال دریچه‌ای هم‌عرض و هم‌ارتفاع فلوم تعبیه شد. پشت دریچه محفظه‌ای به منظور ورود ناگهانی سیال چگال به داخل سیال لایه‌بندی شده ایجاد شد. ابتدای محفظه و در ترازهای متفاوت، چندین شیر تخلیه برای جلوگیری از پر شدن محفظه تا تنظیم کامل دبی نصب شد. در این تحقیق از دو مخزن یکی برای تهیه آب شور و دیگری برای تهیه سیال رسوبی استفاده شد. شکل 1 طرح شماتیک دستگاه آزمایش مورد نظر را نشان می‌دهد.

روش انجام هر آزمایش به این صورت بود که در ابتدا مخزن آب شور تا حجم معینی از آب شهری پر می‌شد سپس مقدار معینی نمک به آن افزوده می‌شد. بعد از اختلاط کامل آب و نمک برای اطمینان از رسیدن به چگالی مورد نظر، شوری آن اندازه‌گیری می‌شد. سپس دریچه ابتدایی فلوم و شیرهای تخلیه انتهایی بسته می‌شد و حجم معینی از آب شور به فلوم پمپ می‌شد. برای جلوگیری از اختلاط دو سیال صفحه مشبک شناوری روی لایه آب شور گذاشته می‌شد و آب شهری با سرعت کم تا تراز معینی وارد فلوم می‌شد. تحت تأثیر آشفتگی‌های ایجاد شده و پدیده پخش، چگالی سیال پیرامون از کف به سطح کاهش می‌یابد، بطوری که بیشترین چگالی در کف فلوم و کمترین آن در سطح آب مشاهده شد.

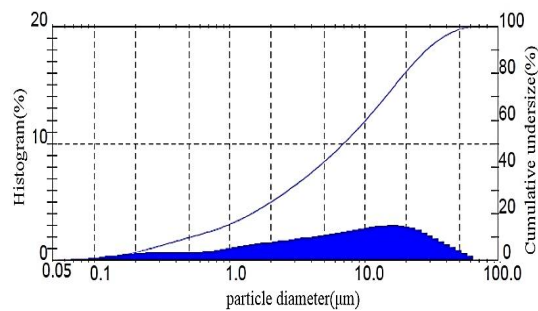
S (نسبت اختلاف چگالی سیال پیرامون به چگالی نسبی جریان)، و پارامتر جدید  $\gamma$  (نسبت رسوب‌گذاری به سرعت اختلاط) تعریف کردند. Zange et al. (2015) مطالعه‌ای بر روی تأثیر لایه‌بندی حرارتی بر زمان عبوری جریان میان‌گذر انجام دادند و یک رابطه کمی بین فرکانس شناوری (بسامد زاویه‌ای جسمی که در یک محیط پایدار استاتیکی نوسان می‌کند) و زمان عبوری جریان میان‌گذر با استفاده از اصل برنولی و قانون بقای انرژی بدست آوردند. آنها برای صحت‌سنجی رابطه پیشنهاد شده، شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. در پژوهش‌های قبلی سیال زیر نقطه جدایی و سیال پیرامون جریان چگال کمتر مورد توجه قرار گرفته است و تصور می‌شد لایه‌بندی سیال در زیر نقطه جدایی دست نخورده باقی بماند (Guo et al., 2014). پژوهش‌های انجام شده تاکنون نشان می‌دهد که محققان پروفیل غلظت در جریان چگال میان‌گذر را بررسی نکرده‌اند. هدف این پژوهش بررسی سیال لایه‌بندی در زیر نقطه جدایی قبل و بعد از ورود جریان چگال و همچنین مطالعه پروفیل‌های غلظت جریان چگال در یک سیال لایه‌بندی است.

## 2- روش انجام آزمایش‌ها

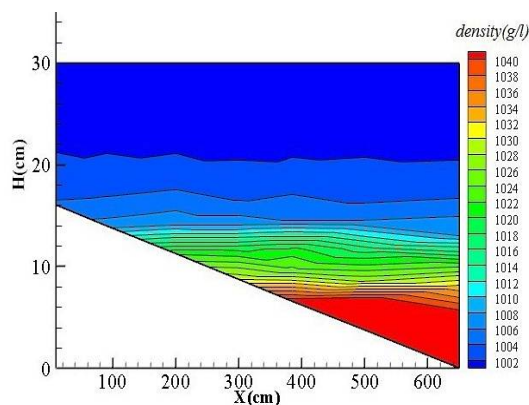
به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، آزمایش‌ها در فلومی به طول 8/8 متر، ارتفاع 70 سانتی‌متر و عرض 35 سانتی‌متر در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه



شکل 1 طرح شماتیک از فلوم و مخازن



شکل 2 نمودار توزیع اندازه ذرات



شکل 3 لایه‌بندی سیال پیرامون قبل از ورود جریان چگال

پس از ورود جریان چگال به فلوم در سه مقطع A، B و C که به ترتیب 1، 4 و 6/5 متر از دریچه ورودی جریان چگال فاصله داشتند، نمونه برداری عمقی از جریان چگال و سیال پیرامون انجام می‌شد. نمونه‌های برداشت شده در ظرف‌های مخصوص نمونه‌برداری جمع‌آوری می‌شدند و چگالی و شوری آنها اندازه‌گیری می‌شد. سپس مقدار مشخصی از نمونه سانتریفیوژ می‌شد. پس از جدایی آب و رسوب، آب جدا شده از نمونه تخلیه گردیده و رسوبات باقی‌مانده در آن خشک می‌شد. نمونه خشک شده بوسیله ترازوی دیجیتال با دقت 0/001 گرم وزن می‌شد. سپس غلظت نمونه‌ها برحسب گرم در لیتر محاسبه می‌گردید. شکل 4 محل نصب سیفون‌های نمونه برداری غلظت و چگالی جریان را نشان می‌دهد.

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، در مجموع 16 آزمایش با چهار دبی 1، 1/5، 2 و 2/5 لیتر بر ثانیه و چهار غلظت 5، 10، 15 و 20 گرم در لیتر روی شیب کف 2/5 درصد انجام شد.

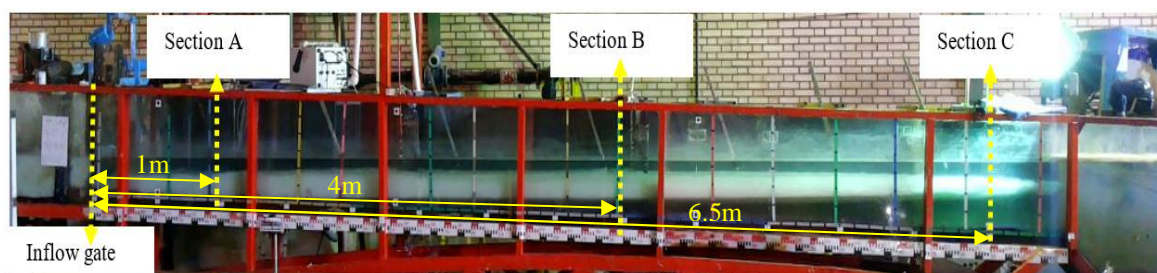
تلاش شده است که لایه‌بندی در همهی آزمایش‌ها یکسان باشد. در این پژوهش برای ایجاد جریان رسوبی از ذرات سیلیس با قطر متوسط 8 میکرون و وزن مخصوص 2/673 گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است. شکل 2 نمودار توزیع دانه بندی ذرات را که با استفاده از دستگاه لیزری دانه‌بندی ذرات<sup>1</sup> بدست آمده است، نشان می‌دهد.

وزن رسوبات مورد استفاده بسته به غلظت جریان چگال در هر آزمایش متفاوت است. برای تهیه سیال رسوبی ابتدا مخزن جریان 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 برقی و یک پمپ لجن کش مخلوط می‌شدند. پس از ایجاد چگالی یکنواخت سیال رسوبی، به منظور تعیین بلندای مورد نیاز برای حرکت، سیال به مخزنی با تراز ثابت پمپ می‌شد. سپس جریان چگال از طریق یک شیر وارد محفظه پشت دریچه می‌شد و دبی آن تنظیم می‌گردید.

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 به صورت میان‌گذر به حرکت خود در سیال پیرامون ادامه می‌داد. شکل 3 لایه‌بندی سیال پیرامون، قبل از وارد شدن جریان چگال به آن را بر حسب گرم بر لیتر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع از کف فلوم، غلظت نمک محلول در آب کاهش می‌یابد. چگالی سیال پیرامون قبل از ورود جریان چگال به فلوم در 7 مقطع از فلوم در بازه‌های 2 سانتی-متری از سطح آب تا کف فلوم اندازه‌گیری شد.

برای نمونه‌گیری از جریان چگال و سیال پیرامون بعد از آزمایش از سه سیفون در طول فلوم استفاده شد. سیفون‌ها از لوله‌های مسی به قطر 5 میلی‌متر و در فواصل 3 سانتی‌متری در عمق ساخته شدند. در انتهای سیفون سرنگ‌هایی برای مکش جریان نصب شدند.

1- Master sizer



شکل 4 موقعیت مقاطع اندازه‌گیری غلظت نسبت به دریچه ورودی

### 3- ساختار جریان چگال

جریان‌های چگال دو محدوده‌ی آرام و آشفته را از خود به نمایش می‌گذارند. معیاری که برای تعیین این دو محدوده‌ی جریان وجود دارد، عدد رینولدز چگال است که به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود (Kaeo, 1997).

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

با توجه به اینکه در جریان‌های چگال، عدد رینولدز بحرانی بزرگتر از 2000 است (Kneller et al., 1999)، بنابراین در تمام آزمایش‌ها دبی ورودی در حالتی تنظیم شده است که عدد رینولدز ورودی بیشتر از 2000 باشد. براین اساس جریان ورودی در تمام آزمایش‌ها آشفته است.

عدد فرود در جریان چگال به صورت معادله (2) تعریف می‌شود: (Kaeo, 1997)

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

عدد رینولدز و عدد فرود چگال در ورودی (زیر دریچه) از روابط (1) و (2) محاسبه شد. در معادله‌های فوق  $U$  سرعت متوسط لایه چگال که با استفاده از رابطه پیوستگی زیر دریچه محاسبه شد،  $h$  ضخامت یا ارتفاع لایه چگال که با ارتفاع باز شدگی دریچه برابر است،  $\nu$  لزجت سینماتیک مخلوط ورودی که با توجه به ناچیز بودن تغییرات لزجت نسبت به آب خالص، لزجت سینماتیکی آب خالص استفاده شده است (Firoozabadi et al., 2009). همچنین دمای جریان چگال و سیال پیرامون در آزمایش‌ها ثبت شده و در محاسبه لزجت تأثیر داده شده است،  $\theta$  زاویه شیب بستر است و  $g'$  در واقع همان شتاب ثقل کاهش یافته است و با رابطه (3) بیان می‌شود (Kaeo, 1997):

به منظور بررسی پروفیل غلظت 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 آن‌ها به عنوان غلظت ورودی جریان چگال در نظر گرفته شد. در جدول 1 مشخصات آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود.

با توجه به جدول 1 مشاهده می‌شود که متوسط غلظت ورودی با غلظت تهیه شده در مخزن جریان چگال متفاوت است.

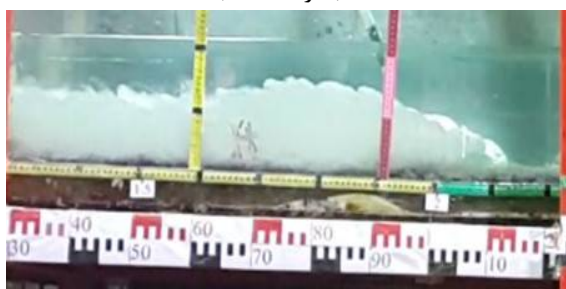
جدول 1 مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	مشخصات جریان ورودی		غلظت (g/l)	زمان آزمایش (s)
	چگالی (g/l)	عدد فرود دنسیمیتریک ورودی		
C5Q1	1004/16	0/48	6/5	180
C5Q1.5	1003/06	1/12	4/73	267
C5Q2	1001/97	1/37	3/76	192
C5Q2.5	1002/77	1/49	4/26	144
C10Q1	1005/42	0/48	8/95	232
C10Q1.5	1006/17	0/61	10/26	167
C10Q2	1005/35	0/87	8/57	139
C10Q2.5	1006/08	0/97	9/56	112
C15Q1	1007/75	0/38	12/8	215
C15Q1.5	1007/83	0/56	12/45	131
C15Q2	1008/19	0/66	13/05	111
C15Q2.5	1008/18	0/87	13/01	108
C20Q1	1012/25	0/29	19/51	178
C20Q1.5	1010/24	0/44	16/3	106
C20Q2	1013	0/51	20/71	91
C20Q2.5	1011/86	0/67	18/91	88

اتفاق می‌افتد. این مرحله تا وقتی که نیروی اینرسی و شناوری پیشانی جریان نتواند از اثر ترکیبی اصطکاک کف و لایه‌بندی تجاوز کند، ادامه می‌یابد (شکل 5-ب). بعد از آن مرحله جدایی اتفاق می‌افتد که در آن جریان چگال با سرعت کم و به صورت افقی وارد سیال پیرامون می‌شود.



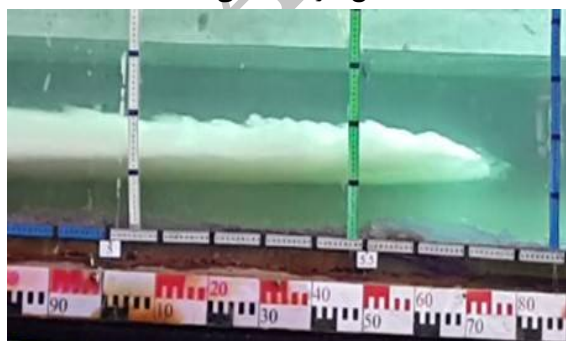
الف) مرحله شتاب



ب) مرحله کاهش شتاب



ج) مرحله جدایی



د) مرحله میان گذر

شکل 5 پیشروی جریان چگال در محیط پیرامون لایه‌بندی شده برای  $Q=1.5 \text{ l/s}$ ,  $C=16.3 \text{ g/l}$  و  $S=2.5\%$ .

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

$\rho_w$  چگالی سیال پیرامون که ثابت فرض می‌شود،  $\rho$  چگالی جریان ورودی و  $g$  شتاب ثقل است. برای بدست آوردن عدد فرود در ابتدای فلوم، با توجه به تغییرات کم چگالی سیال پیرامون در ورودی، متوسط چگالی در ابتدای فلوم به عنوان چگالی سیال پیرامون در نظر گرفته شد.

#### 4- مشاهدات آزمایشگاهی

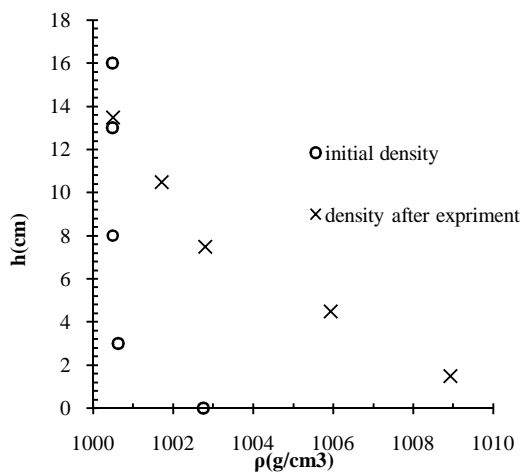
##### 4-1- لایه‌بندی

جریان چگال در جایی که چگالی آن با چگالی سیال پیرامون برابر باشد، از بستر جدا می‌شود و به صورت تقریباً افقی وارد سیال پیرامون می‌شود. هنگامی که که جریان چگال در یک محیط لایه‌بندی شده در حال پیشروی است، چهار مرحله متفاوت از جریان را می‌توان مشاهده نمود، مرحله شتاب، مرحله کاهش سرعت، مرحله جدایی و مرحله میان‌گذر. این مراحل در شکل 5 نشان داده شده‌اند. در شروع آزمایش تفاوت چگالی بین سیال پیرامون و جریان چگال زیاد است، در نتیجه پیشانی جریان به سرعت شکل می‌گیرد و جریان روی شیب کف شتاب می‌گیرد.

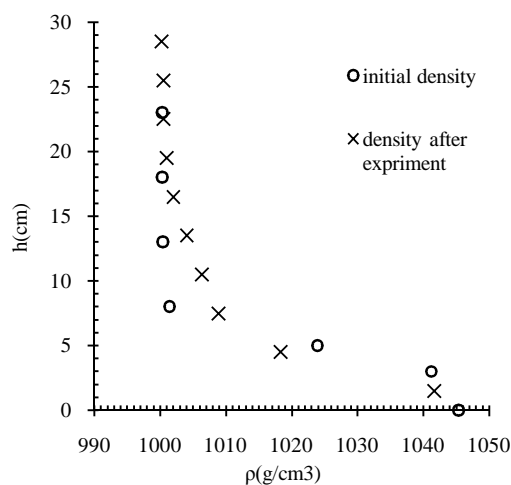
همان‌طور که جریان چگال روی بستر به سمت جلو در حال حرکت است، در سطح مشترک بین جریان چگال و سیال پیرامون نیروی برشی ایجاد می‌شود. جریان چگال در حین حرکت خود سیال ساکن پیرامون را به داخل خود می‌کشد و این نیروی برشی باعث ایجاد اختلاط در سطح مشترک می‌شود. سیال چگال به‌خاطر اختلاط و افزایش ضخامت پیشانی جریان رقیق می‌شود. بنابراین نیروی محرک رو به جلوی جریان که به دلیل اختلاف چگالی بین سیال پیرامون و جریان چگال بوجود می‌آید، در طول مسیر کاهش می‌یابد (شکل 5-الف). مقادیر چگالی قبل و بعد از آزمایش در این مرحله، در شکل 6-الف نشان داده شده است.

وقتی که سرعت پیشانی شروع به کاهش می‌کند آشفتگی و اختلاط آشکارتری در مرز بالایی (سطح مشترک جریان چگال ورودی و سیال پیرامونی که در بالای آن قرار دارد)

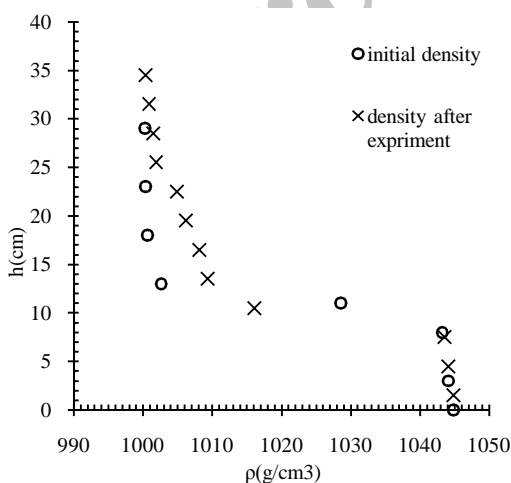




الف) مقطع A



ب) مقطع B



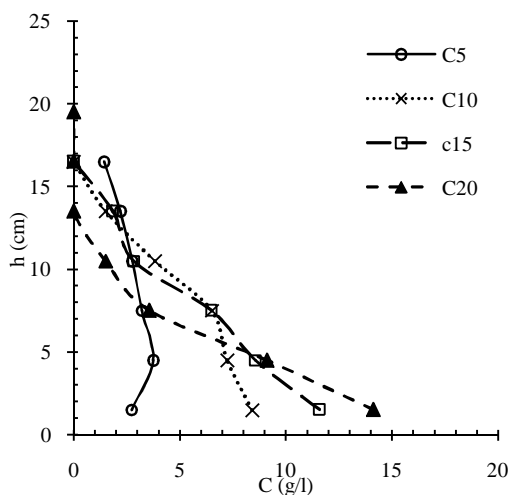
ج) مقطع C

شکل 6 چگالی قبل و بعد از آزمایش برای آزمایش  $Q=1.5 \text{ l/s}$ ,  $C=16.3 \text{ g/l}$

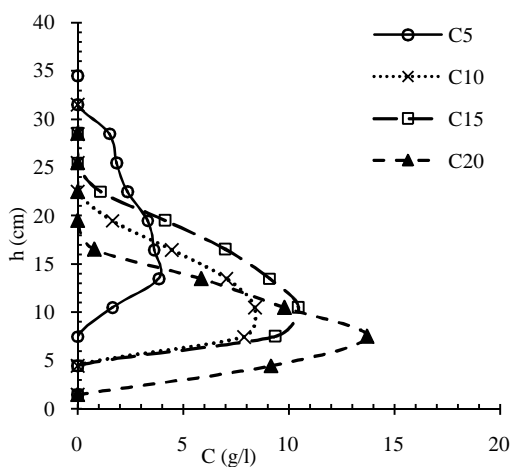
جریان چگال به دلیل وجود مومنتم خودش، در موقعیتی پایین‌تر از سطح شناوری خنثی (ترازی که در آن چگالی سیال پیرامون با چگالی جریان ورودی برابر است) وارد سیال پیرامون می‌شود، اما به سرعت تا سطح خنثی بالا می‌آید (شکل 5-ج). در این مرحله جریان میان‌گذر شکل می‌گیرد و جریان بین دو لایه با چگالی متفاوت شروع به حرکت می‌کند. 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 و آشفتگی‌هایی در بدنه جریان دیده می‌شود. اختلاف چگالی زیاد جریان با لایه زیرین (شکل 6-ج) باعث ایجاد نیروی محرکی می‌شود که از اختلاط زیاد در سطح مشترک پایینی جلوگیری می‌کند. پیشانی ضمن حرکت در طول فلوم مسیری کاملاً مستقیم را طی نمی‌کند، زیرا وجود امواج داخلی که ناشی از بالا آمدن ناگهانی دریچه در ابتدای فلوم هستند، باعث نوسان موقعیت پیشانی می‌شوند (شکل 5-د).

شکل 6 تغییرات چگالی سیال پیرامون قبل و بعد از آزمایش را نشان می‌دهد. در فاصله یک متری از دریچه تقریباً در تمام آزمایش‌ها، جریان به صورت زیرگذر می‌باشد. به دلیل زیاد بودن چگالی جریان ورودی نسبت به سیال پیرامون، چگالی بعد از آزمایش در مقایسه با چگالی اولیه در تمام آزمایش‌ها افزایش یافته است. وقتی جریان چگال به صورت زیرگذر جلو می‌رود سیال پیرامون در سطح مشترک به درون جریان چگال کشیده می‌شود که به آن درون‌آمیختگی می‌گویند. درون‌آمیختگی ناشی از امواجی است که در پشت پیشانی شکل گرفته‌اند. به دلیل درون‌آمیختگی و اختلاط در سطح مشترک، چگالی سیال پیرامون در سطح مشترک و کمی بالاتر از آن افزایش می‌یابد. برای مثال سطح مشترک در این مقطع در ارتفاع 10 سانتی‌متری قرار دارد که چگالی آن قبل از آزمایش 1001/6 گرم بر سانتی‌متر مکعب و بعد از آزمایش 1001/6 گرم بر سانتی‌متر معکب است (شکل 6-الف).

غلظت به شدت کاهش یافته که این منطقه نشان دهنده‌ی سطح مشترک جریان با سیال پیرامون است (شکل 8). شکل 9 پروفیل غلظت جریان را در مقطع C نشان می‌دهد. جریان در این مقطع میان‌گذر و کاملاً توسعه یافته است (توسعه یافتگی جریان با بررسی پروفیل‌های سرعت مشخص می‌شود). به دلیل سقوط رسوبات در طول جریان، مقدار بیشینه غلظت در این مقطع کمتر از مقطع B است. افزایش غلظت باعث بیشتر شدن مقدار چگالی جریان می‌شود و جریان روی لایه‌بندی با چگالی بیشتر حرکت می‌کند؛ در نتیجه در یک دبی مشخص با افزایش غلظت جریان، ارتفاع غلظت بیشینه جریان و ضخامت بدنه جریان کاهش می‌یابد.



شکل 7 پروفیل غلظت در مقطع A برای  $Q=1.5$  l/s



شکل 8 پروفیل غلظت در مقطع B برای  $Q=1.5$  l/s

اندازه‌گیری‌ها در این مطالعه نشان می‌دهد که چگالی سیال پیرامون در زیر نقطه جدایی کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که جریان با خود برخی از مایعات با چگالی کمتر را به جلو آورده است و با فشار (بطور ناگهانی) به منطقه زیر نقطه جدایی وارد کرده است. بنابراین، لایه‌بندی در این ناحیه مختل شده است. باید توجه شود که چگالی سیال در زیر نقطه جدایی بیشتر از چگالی جریان است. (شکل 6-ب)

شکل 6-ج مرحله‌ای را که جریان به صورت میان‌گذر حرکت می‌کند، نشان می‌دهد. در این مرحله اختلاط کمتری در سطح مشترک پایینی نسبت به سطح مشترک بالایی اتفاق می‌افتد. سیال پیرامون در هر دو سطح مشترک تمایل به حرکت رو به عقب دارد. چگالی سیال پیرامون در سطح مشترک پایینی کاهش و در سطح مشترک بالایی افزایش می‌یابد. با گذشت زمان رسوبات در سطح مشترک پایینی سقوط کرده که این امر باعث افزایش چگالی در این سطح می‌شود. در منطقه خارج از محدوده اختلاط، چگالی سیال پیرامون ثابت باقی می‌ماند.

#### 2-4- غلظت

جریان هنگام عبور از مقطع A بصورت زیرگذر و در مرحله کاهش شتاب است. در این مرحله سرعت پیشانی جریان کمتر از سرعت بدنه است. بنابراین برای حفظ پیوستگی جریان، ضخامت پیشانی در این مرحله بیشتر از ضخامت بدنه است. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود با افزایش غلظت جریان ورودی، ارتفاع بدنه جریان کاهش یافته است و مقدار حداکثر غلظت نزدیک به بستر اتفاق افتاده است. برای  $c=5$  g/l بدلیل اینکه جریان در این مقطع وارد مرحله جدایی شده است، حداکثر مقدار غلظت در بالای بستر اتفاق افتاده است.

در مقطع B جریان از بستر جدا شده است و در میان سیال پیرامون رو به جلو پیش می‌رود. در این مقطع به دلیل اختلاط در طول مسیر، غلظت جریان از مقطع A کمتر است. رسوبات در طول مسیر تمایل به سقوط به لایه‌های پایین‌تر را دارند، به همین دلیل مقدار بیشینه غلظت در یک سوم اولیه ارتفاع جریان اتفاق افتاده است. در نقاط با ارتفاع کمتر از نقطه بیشینه غلظت، مقدار



جدول 2 درصد کاهش غلظت جریان

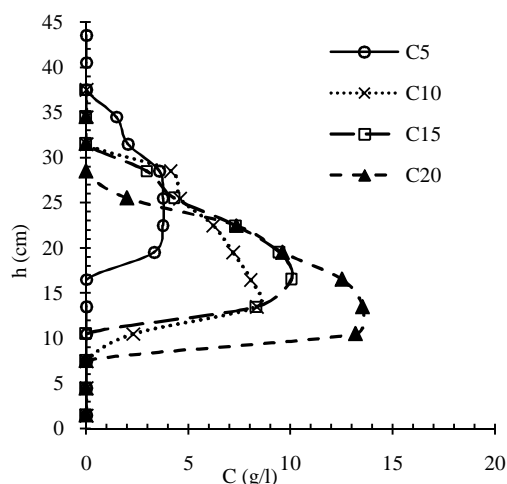
نام مقطع	غلظت (g/l)	دبی (l/s)		
		1	2	2/5
A	5	21/15	16/60	14/88
	10	23/92	17/36	9/10
	15	24/21	18/03	12/76
	20	28/75	12/84	4/94
B	5	15/24	17/39	16/01
	10	27/65	18/03	12/13
	15	26/95	11/49	10/65
	20	30/42	15/72	5/47
C	5	25/77	20/27	19/08
	10	29/27	18/32	18/41
	15	22/46	12/26	11/41
	20	31/11	17/18	9/84

همچنین مقدار بیشینه غلظت در این مقطع روی بستر اتفاق افتاده است. در یک ارتفاع ثابت با افزایش دبی غلظت جریان در آن ارتفاع افزایش یافته است، زیرا افزایش دبی سبب افزایش سرعت جریان شده است. این افزایش سرعت باعث می‌شود جریان چگال در زمان کمتری به مقاطع اندازه‌گیری غلظت برسد، در نتیجه رسوبات کمتری در جریان ته‌نشین می‌شود.

در مقطع B جریان از بستر جدا شده و وارد سیال پیرامون شده است. بدلیل اختلاط کمتر در این مرحله ضخامت بدنه با افزایش دبی مقدار کمی افزایش یافته است. چون سرعت در این مرحله تقریباً کم است و جریان تمایل دارد بصورت افقی وارد سیال پیرامون شود، بنابراین نیروی محرک جریان صرف شکافتن سیال پیرامون شده است. مقدار بیشینه غلظت در این مرحله روی سطح مشترک پایینی اتفاق افتاده است (شکل 10- ب).

شکل 10- ج جریان در مقطع C را نشان می‌دهد. در این مقطع جریان کاملاً به صورت میان‌گذر در حال پیشروی است و افزایش دبی تأثیری در ضخامت بدنه جریان نداشته است. مقدار بیشینه غلظت بالاتر از سطح مشترک اتفاق افتاده است و افزایش دبی باعث کشیدگی پروفیل‌های غلظت شده است.

با مقایسه پروفیل‌های غلظت در 3 مقطع مشاهده می‌شود که با افزایش دبی اختلاف غلظت اندازه‌گیری شده در سه



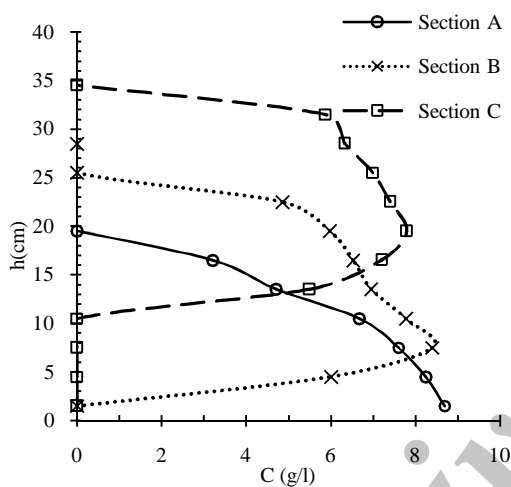
شکل 9 پروفیل غلظت در مقطع C برای  $Q=1.5 \text{ l/s}$

در هر سه مقطع با افزایش غلظت، ارتفاع غلظت بیشینه و ارتفاع جریان چگال کاهش می‌یابد، بطور متوسط با 4 برابر شدن غلظت جریان چگال ورودی، ارتفاع جریان چگال 30 درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت جریان چگال ورودی، اختلاف غلظت اندازه‌گیری شده در مقاطع‌های A، B و C با غلظت ورودی در دبی 1 لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد. برای سایر دبی‌ها با افزایش غلظت این اختلاف کاهش می‌یابد، زیرا در دبی 1 لیتر بر ثانیه سرعت جریان نسبت به سایر دبی‌ها کمتر است و زمان رسیدن به انتهای فلوم بیشتر است. در نتیجه ذرات فرصت بیشتری برای ته‌نشینی دارند. بنابراین غلظت جریان در طول مسیر کاهش می‌یابد. جدول 2 درصد کاهش غلظت بیشینه جریان را در سه مقطع A، B و C نسبت به غلظت ورودی نشان می‌دهد.

برای مقایسه تأثیر دبی ورودی جریان چگال روی پروفیل‌های غلظت رسم این پروفیل‌ها در یک غلظت مشخص الزامی است. از آنجا که غلظت ورودی جریان چگال متفاوت است با توجه به جدول 1 غلظت 15 گرم بر لیتر انتخاب شده است که متوسط غلظت‌های ورودی آن کمترین اختلاف را با یکدیگر دارند. همان‌طور که در شکل 10- الف مشاهده می‌شود، با افزایش دبی در غلظت‌های نزدیک به هم در مرحله‌ای که جریان زیرگذر است، ضخامت بدنه جریان افزایش می‌یابد، زیرا افزایش دبی سبب افزایش سرعت جریان در این مرحله می‌شود و سرعت بیشتر اختلاط بیشتری را با سیال پیرامون ایجاد می‌کند.

در واقع افزایش دبی سبب کاهش زمان رسیدن جریان از دریچه ابتدایی فلوم به مقطع‌های اندازه‌گیری شده است که این زمان کمتر، ته‌نشینی رسوبات در طول جریان را کاهش داده است (جدول 2).

شکل 11 پروفیل غلظت جریان در سه مقطع A، B و C در دبی 2/5 لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه با شکل 11 در یک دبی و غلظت ثابت، با افزایش فاصله از دریچه ورودی مقدار غلظت بیشینه کاهش می‌یابد. همچنین ارتفاع غلظت بیشینه افزایش می‌یابد.



شکل 11 پروفیل غلظت  $Q=2.5 \text{ l/s}$  و  $C=10 \text{ g/l}$  در سه مقطع مورد آزمایش

### 5- نتیجه‌گیری

برای شناخت پروفیل غلظت در جریان چگال میان گذر نتیجه حاصل از این مطالعه به دو گروه تقسیم شد.

#### 5-1- نتایج حاصل از لایه‌بندی

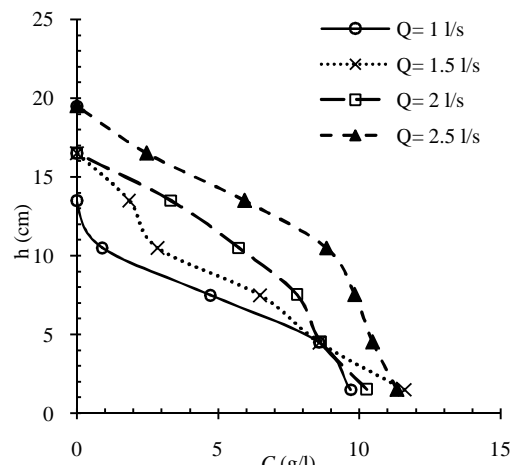
سیال چگال به صورت افقی در سیال پیرامون حرکت می‌کند.

می‌توان حرکت سیال چگال در سیال پیرامون را به 4 مرحله تقسیم کرد:

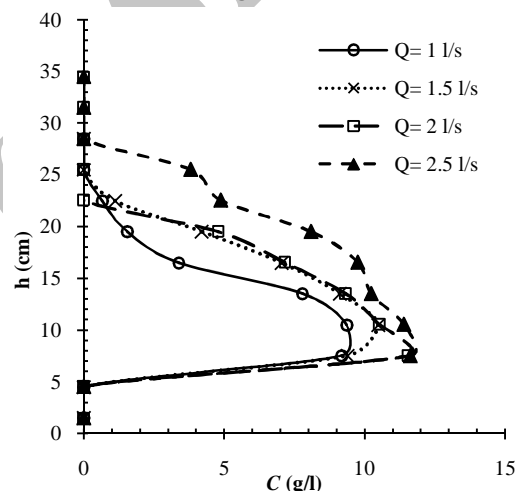
1- مرحله شتاب: در سطح مشترک اختلاط زیادی صورت می‌گیرد و جریان به‌صورت زیرگذر است.

2- مرحله کاهش شتاب: در این مرحله تلاطم و اختلاط آشکارتری در مرز وجود دارد. جریان در این مرحله نیز

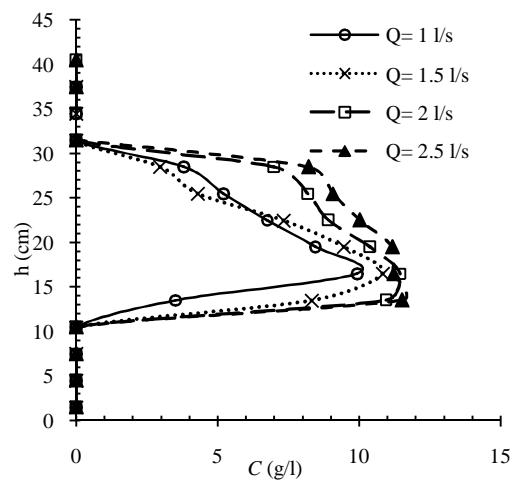
مقطع با غلظت جریان چگال ورودی کمتر می‌شود.



الف) مقطع A



ب) مقطع B



ج) مقطع C

شکل 10 پروفیل غلظت  $C=15 \text{ g/l}$

زیرگذر است.  
 3- مرحله جدایی: جریان بستر را ترک می کند و با سرعت کم وارد سیال پیرامون می شود.  
 4- مرحله میان گذر: آشفتگی ها در این مرحله کمتر می شود. پیشانی جریان در این مرحله نازکتر از مراحل قبلی است.  
 ورود جریان چگال به درون سیال لایه بندی شده، چگالی سیال پیرامون در زیر نقطه جدایی را کاهش می دهد.

$\theta$  زاویه بستر  
 زیرنویس ها  
 0 مربوط به جریان  
 1 مربوط به سیال با چگالی کمتر  
 2 مربوط به سیال با چگالی بیشتر  
 w آب

### 7- مراجع

DE Rooij, F. Lindeny, P. F. and Dalziel, S. B. (2002). "Saline and particle-driven interfacial intrusions". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 389, pp. 303-334.

Firoozabadi, B. Afshin, H. and Aram, E. (2009). "Three dimensional modeling of density current in a straight channel". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 135, No. 5, pp. 393-402.

Guo, Y. Zhang, Z. and Shi, B. (2014). "Numerical simulation of gravity current descending a slope into a linearly stratified environment". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 140, No. 12, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000936.

Imberger, J. Thompson, R. and Fandry, C. (1976). "Selective withdrawal from a finite rectangular tank". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 78, No. 03, pp. 489-512

Kaeo, B. (1997). "Density currents and their applications". *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 103, No. HY5, pp. 543-555.

Kneller, B. C. Bennet, J. S. and McCaffrey, W. D. (1999). "Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104, No. C3, pp. 5381-5391.

Lowe, R. Linden, P. F. and Rotman, J. W. (2002). "A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 456, pp. 33-48.

Marti, C. Mills, R. and Imberger, J. (2011). "Pathways of multiple inflows into a stratified reservoir Thomson reservoir Australia". *Advances in Water Resources*. Vol. 34, No. 05, pp. 551-561.

Snow, K. and Sutherland, B. R. (2014). "Particle-laden flow down a slope in uniform stratification". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 755, pp. 251-273.

Sutherland, B. R. Kyba, P. J. and Flynn, M. R. (2004). "Intrusive gravity currents in two layer fluids". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 514, pp. 327-353.

### 5-2- نتایج حاصل از پروفیل غلظت

در یک دبی مشخص با افزایش غلظت ارتفاع بدنه جریان غلیظ کاهش می یابد و تراز نقطه غلظت بیشینه کاهش می یابد. افزایش غلظت جریان چگال باعث نوک تیزتر شدن شکل پروفیل های غلظت می شود.

در یک غلظت مشخص با افزایش دبی در مراحل 1 تا 3 ضخامت بدنه جریان افزایش می یابد. در مرحله میان گذر ضخامت بدنه تقریباً ثابت است. با افزایش دبی تراز نقطه غلظت بیشینه ثابت می ماند، اما مقدار غلظت آن افزایش می یابد.

کاهش دبی و افزایش غلظت باعث افزایش درصد رسوب گذاری در طول فلوم می شوند. بیشترین اختلاف غلظت اندازه گیری شده در طول فلوم با غلظت جریان چگال ورودی 31 درصد می باشد.

### 6- فهرست علائم

$C$	غلظت
$Fr$	عدد فرود
$g$	شتاب ثقل
$g'$	شتاب ثقل کاهش یافته
$h$	ارتفاع از کف فلوم
$H$	ارتفاع متوسط
$Pr$	عدد پرائنتل
$Q$	دبی
$s$	شیب کف
$U(Z)$	سرعت اندازه گیری شده توسط دستگاه سرعت سنج
$U$	سرعت متوسط
$v$	لزجت سینماتیکی آب
$\rho$	چگالی

Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics and Engineering). Vol. 16, No. 4, pp. 265-278.

Samothrakis, P. and Cotel, A. J.(2006). "Propagation of a gravity current in a two-layer stratified environment". Journal of Geophysical Research. Vol. 111, No. C1, doi:10.1029/2005JC003125.

Wells, M. and Nadarajah, P. (2008). "The intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies". Journal of Physical Oceanography. Vol. 39, No. 8, pp. 1935-1947.

Zange, X. F. REN, S. Lu, J. Q. and LU, X. H. (2015). "Effect of thermal stratification on interflow travel time in stratified reservoir".

Archive of SID