

## بررسی تأثیرپذیری پروفیل‌های چگالی و سرعت در جریان‌های چگال از تغییرات شیب بستر، نوع ذرات معلق و میزان پیشروی جریان

امیر حمزه حقی‌آبی<sup>1</sup>، مهدی قمشی<sup>2</sup>، سید محمود کاشفی‌پور<sup>3</sup>، حسن گلیج<sup>4\*</sup>

تاریخ دریافت: 92/11/28 تاریخ پذیرش: 94/10/19

1- دانشیار سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

2,3- استاد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

4- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [Hassan\\_goleij37@yahoo.com](mailto:Hassan_goleij37@yahoo.com)

### چکیده

در یک بررسی آزمایشگاهی جریان چگال ورودی به یک مخزن، تأثیر شیب بستر (از 0 تا 0/003)، نوع ذرات معلق (نمک و دو اندازه مختلف از ذرات رسوبی) و میزان پیشروی (در سه ایستگاه) بر پروفیل‌های چگالی و سرعت مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک فلوم با شیب قابل‌تغییر انجام شد. مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها نشان داد که پروفیل‌های چگالی و سرعت که به کمک مقیاس‌های انتگرالی بی‌بعد شده‌اند، در یک جریان ثابت در ایستگاه‌های مختلف متشابه می‌باشند؛ حتی برای جریان‌های مختلف در شیب‌های متفاوت پروفیل‌های سرعت از تشابه نسبتاً خوبی برخوردارند. پروفیل‌های بدون بعد دانسیته که در انواع مختلف جریان اندازه‌گیری شده‌اند، مشابه نیستند. جریان‌های کدر حاوی رسوبات درشت‌تر تقریباً یک پروفیل چگالی خطی در نزدیک بستر دارند، درحالی‌که جریان‌های چگال شور در نزدیک بستر دارای یک چگالی نسبی تقریباً ثابت هستند.

واژه‌های کلیدی: پروفیل چگالی، پروفیل سرعت، جریان کدر، فلوم

## The Influence of Bed Slope, Type of suspended particle and Current Advance Distance on Density and Velocity Profiles of Density Currents

AH Haghiabi<sup>1</sup>, M Ghomeshi<sup>2</sup>, M Kashefipour<sup>3</sup>, H Goleij<sup>\*4</sup>

Received: 17 February 2014 Accepted: 9 January 2016

1- Associ. Prof. of Water Structure, Faculty of Agric., University of Lorestan, Khorramabad, Iran

2,3- Prof. of Water Structure, Faculty of Hydraulic structures, University of Shahid Chamran, Ahwaz, Iran

4- Ph.D. Student of Water Structure, Faculty of Agric., University of Lorestan, Khorramabad, Iran

\*Corresponding Author, E-mail: [hassan\\_goleij37@yahoo.com](mailto:hassan_goleij37@yahoo.com)

### Abstract

In an experimental investigation of the density current inflow into reservoir, the influence of bed slope (0.000 to 0.003), type of suspended particles (salt and two sizes of sediment particles) and advance distance (at three stations) on density and velocity profiles were investigated. Experiments were carried out in a tilting flume. Observations and measurements showed that the velocity and density profiles nondimensionalized with integral scales, in the same current but at different stations were the same. Furthermore, there was a fairly good similarity between the velocity profiles measured for types of currents flowing on different slopes. The dimensionless density profiles measured in different current types were not similar. Turbidity currents with coarse sediment had an almost linear density profile near the bed, whereas the saline density currents showed an almost constant relative density near the bed.

**Keywords:** Density profile, Flume, Turbidity current, Velocity profile

### مقدمه

و بر روی کف در جهت شیب، جریان می‌یابد نمونه‌ای از جریان چگال است (گراف و آلتیناکار 1998). در شکل 1، یک جریان چگال دوبعدی با دانسیته  $\rho_d = \rho_1$  در جهت X روی یک سطح شیب‌دار با زاویه Q که از زیر یک توده سیال ساکن عمیق‌تر با چگالی  $\rho_a = \rho_2$  حرکت می‌کند نشان داده شده است. جریان چگال دارای رأس و بدنه مشخص است که البته موضوع بحث این مقاله بدنه جریان هست. این جریان دارای شباهت‌هایی با جریان در مجاری روباز هست ولی با آن تفاوت اساسی دارد و این تفاوت از آنجا

وقتی یک جریان وارد توده سیال تقریباً ساکنی شود، به چهار دلیل ممکن است دانسیته آن با دانسیته سیال ساکن فرق کند: وجود مواد معلق، وجود مواد محلول، اختلاف درجه حرارت و متفاوت بودن دو سیال و یا ترکیبی از آن‌ها. اگر دانسیته جریان ورودی بیشتر از دانسیته توده سیال باشد، به صورت یک جریان تحتانی از زیر توده سیال حرکت خواهد نمود و به آن جریان چگال گفته می‌شود. جریان گل‌آلود رودخانه‌ها که به مخزن سدها وارد می‌شود و به‌داخل آن فرو رفته

آگاهی از رفتار هیدرولیکی جریان چگال در یک مخزن در مواردی همچون تعیین افت ظرفیت ذخیره مخزن، نصب و بهره‌برداری صحیح از دریاچه‌ها، پیش‌بینی و مدیریت کیفیت آب دریاچه‌ها، بهره‌گیری مناسب از قدرت حمل‌کنندگی جریان‌های چگال جهت تخلیه رسوبات و جلوگیری از ساییده‌شدن ماشین‌های هیدرولیکی و لایه پوششی مجاری انتقال آب توسط آن‌ها مفید هست. بررسی‌های میدانی جریان گل‌آلود ناشی از حرکت جریان چگال در عمق زیاد و در زیر حجم وسیع آب (همانند مخازن سدها)، بسیار مشکل، پرهزینه و مخرب است. از طرفی بررسی‌های عددی به‌خاطر محدودیت‌ها و فرضیات ساده‌کننده اعمال‌شده در آن‌ها دارای مشکلات خاص خود می‌باشند. لذا بررسی این نوع جریان بیشتر به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است (حقی آبی 1383).

ناشی می‌شود که سیال محیط تأثیر کاهنده‌ای روی نیروی ثقل دارد و ضریب کاهش به‌صورت  $\Delta\rho/\rho_a$  هست. شتاب ثقل مانع از اختلاط جریان چگال با سیال ساکن و عمیق شده و آن را در امتداد شیب به جلو می‌راند.

شتاب ثقل مؤثر نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد (گراف و آلتیناکار 1998):

$$g\phi = g(\rho_t - \rho_a)/\rho_a = g\Delta\Delta/\rho_a$$

[1]

$$\rho_t = C_s\rho_s + (1 - C_s)\rho_a = \rho_a + (\rho_s - \rho_a)C_s$$

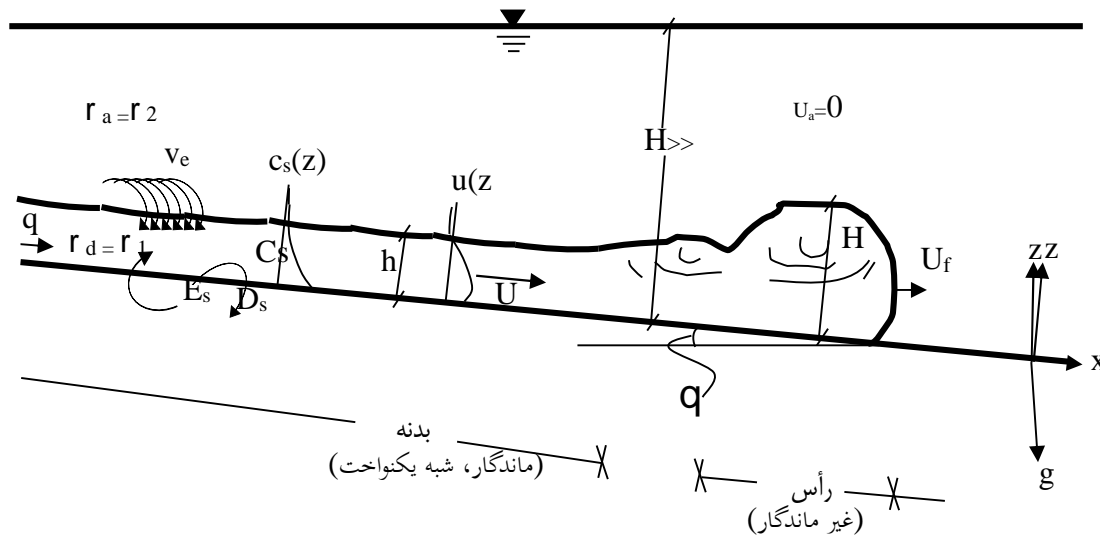
[2]

$$g\phi = g \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} C_s = gRC_s$$

[3]

مقدار  $\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} C_s$  اختلاف دانسیته نسبی ذرات نامیده و

با حرف R نشان داده می‌شود.



شکل 1- نمای شماتیک یک جریان چگال.

چگال انجام شده است (حقی آبی 1383) که ذیلاً برخی از آن‌ها که مرتبط با این تحقیق می‌باشند ارائه شده است.

بررسی‌های آزمایشگاهی، عددی و میدانی یا ترکیبی از آن‌ها توسط محققان مختلف روی جریان‌های

شدت تداخل رسوبات بستر با جریان را محاسبه نمودند. سزار و اسپایز (1999) جهت بررسی ساز و کار جریان‌های چگال و انتقال رسوب از رودخانه به دریاچه‌های مصنوعی، مدل فیزیکی جریان را مورد بررسی قرار دادند و به‌موازات مطالعه آزمایشگاهی، مشاهدات صحرایی در دریاچه و رودخانه اصلی ورودی به آن انجام گرفت. شبیه‌سازی عددی نیز صورت گرفت. نتایج مطالعه آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شد و سازگاری خوبی را نشان دادند. بوکت و همکاران (2001) با بررسی آزمایشگاهی روی بدنه جریان چگال حاوی نمک نتیجه گرفتند که در رقوم سرعت بیشینه شدت توربولانس کم و در قسمت فوقانی جریان شدت توربولانس زیاد است. هورش (2004) در یک بررسی عددی ساختار یک جریان چگال ماندگار، ورقه‌ای و دوبعدی را روی یک سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که جریان شامل دو ناحیه می‌شود: یکی ناحیه درحال توسعه که رشد جریان در آن تابع شرایط اولیه است و دیگری ناحیه کاملاً توسعه‌یافته که مستقل از شرایط اولیه جریان است. بر اساس مطالعات به‌عمل‌آمده، علیرغم تحقیقات محققان قبلی، بررسی آزمایشگاهی تأثیرپذیری پروفیل‌های چگالی و سرعت در جریان‌های چگال از تغییرات شیب بستر، نوع ذرات معلق و میزان پیشروی جریان تا قبل از این تحقیق انجام نگرفته است.

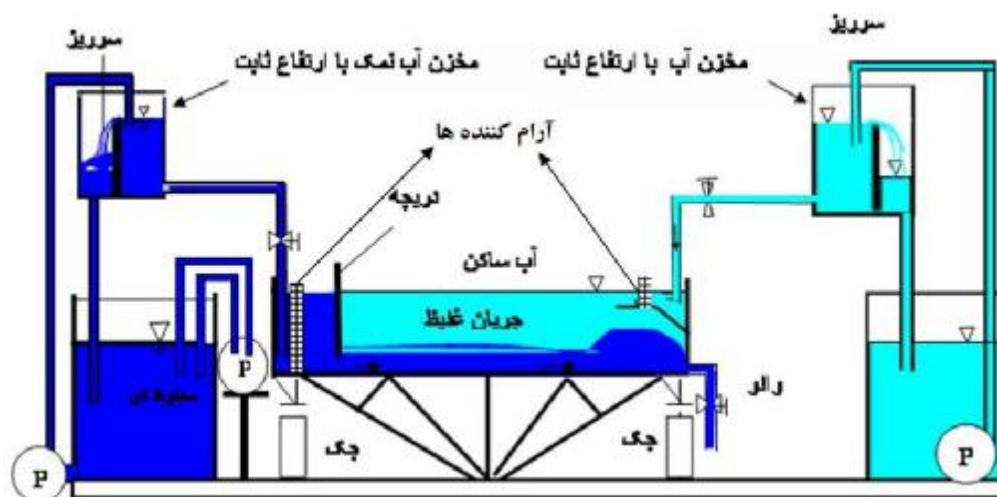
#### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در یک فلوم با دیواره‌های پلکسی گلاس با شیب بستر قابل‌تغییر، به عرض 25 سانتی‌متر، عمق 50 سانتی‌متر و طول 10 متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. دامنه شیب مورد استفاده با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی از 0/000 تا 0/036 متغیر بود. در کل 85 آزمایش با نمک طعام (معرف سرعت سقوط صفر ذرات یا جریان چگال بدون رسوب‌گذاری) و دو نوع رسوب ( $d_{50}=0/014$  mm و  $d_{50}=0/014$  mm)

قمشی (1376) جریان‌های چگال حاوی رسوب و نمک را به‌صورت آزمایشگاهی موردبررسی قرار داد و با استفاده از داده‌های خود و سایر محققان روابطی را برای تعیین سرعت رأس و ارتفاع جریان ارائه نمود. فیروزآبادی و همکاران (1378) حرکت جریان چگال محلول آب‌نمک را در زیرآب شیرین و روی سطح شیب‌دار به‌صورت عددی بررسی نمودند. به کمک حل معادلات حاکم، اثرات تغییر دبی ورودی، غلظت و شیب کف را به‌صورت اعداد بدون بعد ریچاردسون و عدد رینولدز در ساختار جریان بررسی کردند و اظهار داشتند که با حل معادله‌ها می‌توان توزیع سرعت و غلظت را به‌دست آورد. امیرشکاری و فیروزآبادی (1383) به‌منظور پیش‌بینی توزیع سرعت و غلظت ذرات جامد درون حوضچه‌های دایروی که جریان طبقه‌ای و مغشوش دارند، مدل عددی برای حوضچه‌های دایروی ایده‌آل ارائه داده و اظهار داشتند که پروفیل‌های سرعت محاسبه‌شده با داده‌های تجربی سازگاری خوبی دارند. حسینی و شمسایی (1384) ساختار هیدرولیکی بدنه یک جریان چگال آزمایشگاهی را با استفاده از سرعت‌سنج صوتی موردبررسی قرار دادند و اظهار داشتند که افزایش غلظت باعث افزایش سرعت و کاهش ارتفاع جریان می‌گردد. شهنی کرمزاده و همکاران (1385) در یک مطالعه آزمایشگاهی روی جریان چگال حاوی نمک تأثیر تغییرات شیب و غلظت را روی سرعت رأس و بدنه جریان بررسی نمودند و اظهار داشتند که با افزایش شیب و غلظت، سرعت بدنه و رأس جریان افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت ارتفاع بدنه جریان کاهش پیدا می‌کند. آلتیناکار و همکاران (1990) در یک بررسی آزمایشگاهی روی جریان چگال حاوی رسوب و نمک، تأثیر تغییرات شیب کف و رسوب‌گذاری را روی سرعت و ارتفاع رأس جریان موردبررسی قرار دادند. گارسیا و پارکر (1993) در یک بررسی آزمایشگاهی روی جریان با بستر متحرک، پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان چگال را اندازه‌گیری کردند و با استفاده از معادلات مومنوم و بالانس جرم، تنش برشی مرزی و

مجاورت فلوم یک مخزن اختلاط به حجم 11/3 متر مکعب مجهز به پمپ مخلوطکن، برای تهیه و ذخیره جریان چگال در نظر گرفته شده بود. برای تهیه سیال چگال، مواد رسوبی (آرد کوارتز) یا نمک (نمک طعام) با آب در مخزن اختلاط مخلوط می‌شد.

(به ترتیب معرف از جنس آرد کوارتز  $d_{50}=0/032$ ) جریان‌های چگال حاوی مواد معلق ریز و نسبتاً درشت-تر) بر روی 15 شیب مختلف انجام گرفت. فلوم و تجهیزات موجود در شکل 2 نشان داده شده است. قبل از شروع آزمایش‌ها، همه ابزار اندازه‌گیری به‌نحو مناسب آماده و فلوم از آب معمولی پر می‌شد. در



شکل 2- نمای شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی.

وارد مخزن آب می‌شد و در زیر توده آب ساکن به سمت پایین دست حرکت می‌کرد و در پایین با استفاده از سیستم زهکش به خارج از آزمایشگاه تخلیه می‌شد. دریچه ورودی یک عمق اولیه را برای جریان ایجاد می‌نمود. در طول آزمایش، آب معمولی از انتهای فلوم به آن اضافه می‌شد تا جایگزین آب تخلیه شده توسط جریان چگال گردد و رقوم آب را ثابت نگهدارد. آب اضافه شده به فلوم ابتدا وارد یک حوضچه آرامش می‌شد تا باعث ایجاد تلاطم در آب ساکن نشود. پس از عبور رأس جریان و تشکیل بدنه ماندگار جریان، غلظت جریان چگال در بدنه با استفاده از یک دستگاه کدورت سنج اپتیک با دقت  $0/02NTU$  و سرعت آن نیز با استفاده از یک دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیسی با دقت 5 میلی‌متر در ثانیه اندازه‌گیری می‌شد (شکل‌های 3 و 4). در هر مقطع، سرعت‌ها و غلظت‌های نقطه‌ای در خط مرکزی فلوم و در چند نقطه به فواصل عمودی یک

سیال چگال تولید شده از طریق خط لوله و با شدت ثابت از مخزن اختلاط به یک مخزن فوقانی با ارتفاع سطح آب ثابت به حجم 242 لیتر پمپاژ می‌شد و سپس از تانک توسط یک سیستم لوله و شیر فلکه به داخل فلوم هدایت می‌شد. دبی جریان چگال ورودی به فلوم با استفاده از یک شیر فلکه تنظیم می‌شد. انتهای بالادست فلوم با استفاده از یک صفحه مسدود شده بود. تمام طول فلوم به وسیله یک دریچه جداکننده کشویی به دو بخش با طول متفاوت تقسیم می‌شد. بخش کوتاه‌تر در بالادست به طول 2 متر نقش منبع ورود جریان چگال را ایفا می‌کرد. بخش طویل‌تر در پایین دست به طول 8 متر، نقش مخزن را داشت که جریان چگال از زیر آن حرکت می‌کرد و در واقع مقطع مورد آزمایش بود. در بالادست دریچه جداکننده یک سازه آرام‌کننده جریان تعبیه شده بود که تلاطم اولیه را کاهش می‌داد. با بالا کشیدن دریچه ورودی، جریان

نمک با اضافه کردن ماده رنگی حرکت جریان چگال در زیر توده ساکن سیال به‌طور مشخص قابل‌رؤیت می‌شد.

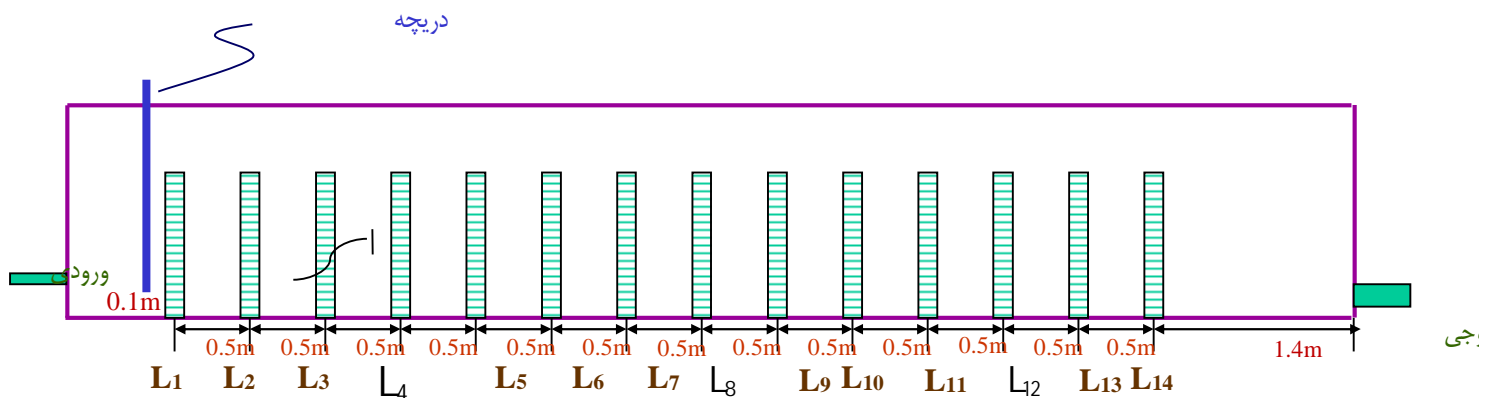
سانتی‌متر از هم اندازه‌گیری می‌شد و محدوده نقاط اندازه‌گیری در هر مقطع از دو سانتی‌متری کف فلوم تا چند سانتی‌متری بالای جریان چگال بود. در آزمایش‌ها



شکل 4- کدورت سنج اپتیک.



شکل 3- سرعت‌سنج الکترومغناطیسی.



شکل 5- نمای شماتیک ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان.

$$Uh = \int_0^{h_t} u dz = \bar{u} h_t = q \quad [4]$$

$$U^2 h = \int_0^{h_t} u^2 dz = \beta_u \bar{u}^2 h_t \quad [5]$$

$\beta_u$  سرعت نقطه‌ای،  $\bar{u}$  سرعت متوسط جریان، ضریب بوزینسک توزیع سرعت و  $h_t$  ارتفاع جریان در نقطه‌ای است که سرعت صفر هست (ترنر 1973). با توجه به اینکه غلظت ذرات  $C_s$  در جهت عمقی و به‌خصوص در مرز جریان چگال متغیر است، غلظت

اندازه‌گیری سرعت و غلظت در سه ایستگاه  $L_4$ ،  $L_8$  و  $L_{12}$  به‌ترتیب در فاصله‌های 160، 360 و 560 سانتی‌متری از دریچه ورودی انجام می‌شد (شکل 5). معمولاً نمی‌توان به‌آسانی مرز بین جریان چگال و سیال محیط را تشخیص داد لذا با استفاده از مقیاس‌های انتگرالی<sup>1</sup> جریان، ارتفاع  $h$  و سرعت  $U$  به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

<sup>1</sup> - Integral scales

$$u(x, z, t) = U(x, t) f_u(z/h) \quad [11]$$

$$C_s(x, z, t) = C_s(x, t) f_c(z/h) \quad [12]$$

فرض تشابه این پروفیل‌ها در جهت جریان در شیب‌های مختلفی، در صورتی درست است که در هر آزمایش، پروفیل‌های بدون بعد سرعت و غلظت،  $u/U$  و  $C_s/C_s$  یا  $(\Delta\rho/\Delta\rho_{ave})$  در برابر  $z/h$  که با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های مختلف تهیه می‌شوند، بایستی روی یک منحنی بیفتند.

پروفیل‌های بی‌بعد دانسیته و سرعت برای داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شده و در شکل‌های 6 و 7 برای 6 آزمایش منتخب، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ارائه همه پروفیل‌ها نیاز به فضای زیادی دارد که به‌همین دلیل شکل‌های 6 و 7 به‌گونه‌ای انتخاب شده که روند کلی داده‌ها را نشان داده و تقریباً کل محدوده پارامترهای آزمایشگاهی را پوشش دهند. مثلاً از هر کدام از انواع مواد معلق، دو پروفیل بی‌بعد سرعت و دو پروفیل بی‌بعد دانسیته نشان داده شده که یکی مربوط به تندترین شیب و دیگری مربوط به ملایم‌ترین شیب در آزمایش‌ها هست و در هر پروفیل، داده‌های مربوط به هر سه ایستگاه اندازه‌گیری نمایش داده شده است. پراکنندگی داده‌ها مانع از یک استنتاج آسان می‌گردد به‌طوری‌که حصول یک ایده از طریق روی هم‌گذاری همه پروفیل‌ها مشکل است. لذا پروفیل‌ها بر حسب سه پارامتر شکل، به‌شرح ذیل با هم مقایسه می‌شوند:

ارتفاع نسبی کل جریان:  $h_t/h$ ، ارتفاع نسبی نظیر سرعت بیشینه:  $h_{umax}/h$ ، سرعت نسبی بیشینه:  $U_{max}/U$ . در بین این سه پارامتر تعیین  $h_t/h$  با خطای نسبتاً بیشتری همراه است. زیرا تعیین ارتفاع نظیر سرعت صفر، قدری مشکل است. داده‌ها نشان می‌دهند که ارتفاع نسبی کل جریان برابر با  $1/3 \pm 0/1$  هست.

حجمی متوسط ذرات،  $C_s$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_s U h = \int_0^{h_t} (u c_s) dz = \int_0^{h_t} (u c_s) dz = C_s \bar{U} h_t \quad [6]$$

برای تعیین سرعت،  $U$  و ارتفاع،  $h$  در روابط 4 و 5، می‌توان این روابط را منفصل نمود و روابط 7 و 8 را به‌دست آورد. سپس بر اساس روابط اخیر و اندازه‌گیری سرعت در نقاط متوالی مقطع موردنظر، مقادیر  $U$  و  $h$  تعیین می‌گردد.

$$U h = \int_0^{h_t} u dz = \int_{k=1}^{m-1} \frac{(u_k + u_{k+1})}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad [7]$$

$$U^2 h = \int_0^{h_t} u^2 dz = \int_{k=1}^{m-1} \frac{(u_k)^2 + (u_{k+1})^2}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad [8]$$

که  $z_k$  ارتفاع نقطه  $k$  ام از بستر هست ( $k=1$  متناظر با اولین نقطه در بستر یعنی در  $z=0$ ) و  $u_k$  معرف مقدار سرعت اندازه‌گیری شده در ارتفاع  $z_k$  است. حرف  $m$  نیز معرف تعداد نقاط اندازه‌گیری در جهت عمقی هست. پس از تعیین  $U$  و  $h$  با توجه به معادلات 7 و 8 و با منفصل کردن معادله 6، می‌توان غلظت  $C_s$  یا اختلاف دانسیته متوسط  $\Delta\rho_{ave}/\rho_a$  را از روابط زیر محاسبه نمود:

$$U C_s h = \int_0^{h_t} u c_s dz = \int_{k=1}^{m-1} \frac{(u_k c_{s_k}) + (u_{k+1} c_{s_{k+1}})}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad [9]$$

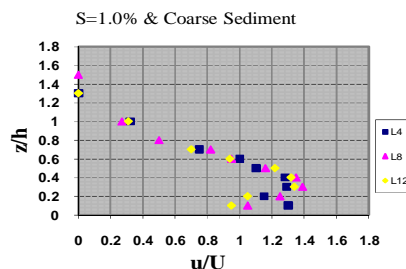
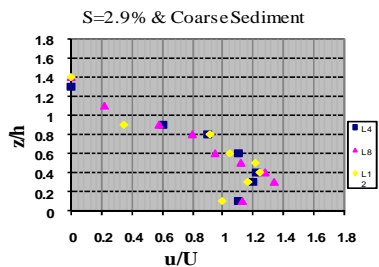
یا

$$U \frac{\Delta\rho_{ave}}{\rho_a} h = \int_0^{h_t} \frac{\Delta\rho}{\rho_a} dz = \int_{k=1}^{m-1} \frac{u_k \frac{\Delta\rho_k}{\rho_a} + u_{k+1} \frac{\Delta\rho_{k+1}}{\rho_a}}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad [10]$$

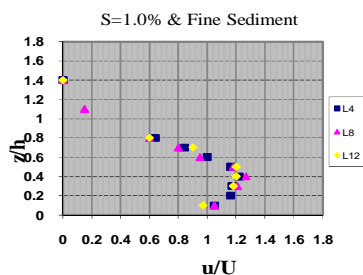
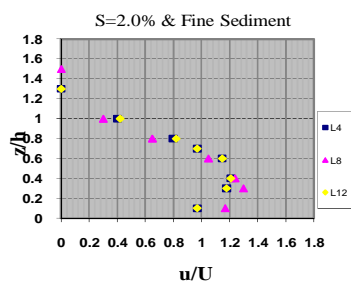
## نتایج و بحث

اگر معادلات پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان را به‌صورت زیر در نظر بگیریم:

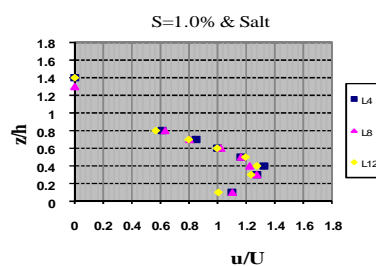
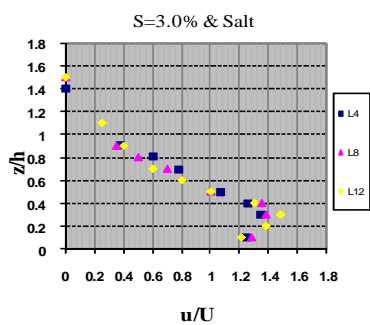
اطلاعات آماری مربوط به دو پارامتر دیگر در جدول 1 ارائه شده است.



### رسوبات درشت‌تر



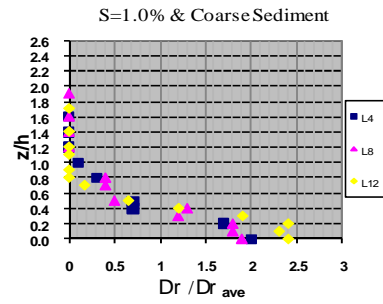
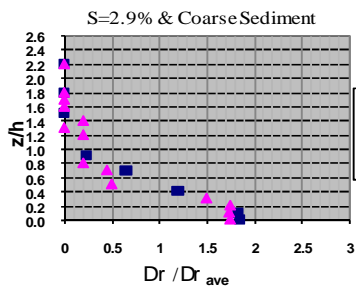
### رسوبات ریزتر



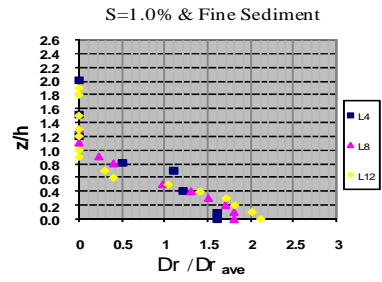
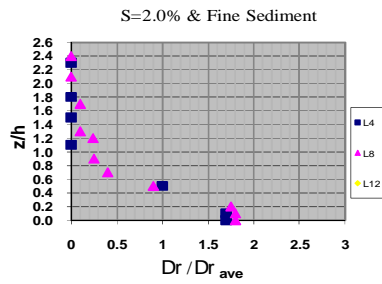
### نمک

شکل 6- تشابه پروفیل‌های سرعت در 6 آزمایش منتخب.

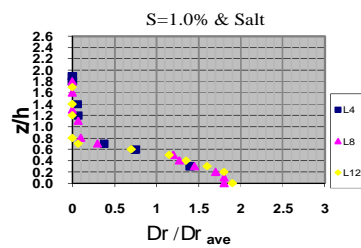
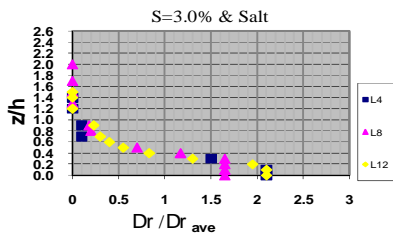




## رسوبات درشت‌تر



## رسوبات ریزتر



## نمک

شکل 7- تشابه پروفیل‌های دانسیته برای 6 آزمایش منتخب.

جدول 1- اطلاعات آماری داده‌های آزمایش‌ها در مورد مقادیر  $U_{max}/U$  و  $h_{umax}/h$ .

$h_{umax}/h$	جریان چگال رسوبی								
	رسوبات درشت‌تر			رسوبات ریزتر			جریان چگال حاوی نمک		
	$L_4$	$L_8$	$L_{12}$	$L_{12}$	$L_4$	$L_8$	$L_{12}$	$L_4$	$L_8$
تعداد آزمایش‌ها	9	9	7	8	7	3	10	11	10
کمینه	0/130	0/220	0/170	0/280	0/230	0/370	0/110	0/190	300
بیشینه	0/460	0/290	0/350	0/420	0/460	0/420	0/430	0/490	0/480
دامنه تغییرات	0/330	0/070	0/180	0/140	0/230	0/050	0/320	0/300	0/180
میانگین	0/271	0/259	0/273	0/359	0/360	0/390	0/290	0/354	0/356
انحراف معیار	0/099	0/024	0/064	0/058	0/079	0/026	0/113	0/088	0/060
خطای استاندارد	0/033	0/008	0/024	0/020	0/030	0/015	0/036	0/028	0/019

$U_{max}/U$	جریان چگال رسوبی								
	رسوبات درشت‌تر			رسوبات ریزتر			جریان چگال حاوی نمک		
	$L_4$	$L_8$	$L_{12}$	$L_4$	$L_8$	$L_{12}$	$L_4$	$L_8$	$L_{12}$
تعداد آزمایش‌ها	9	9	7	8	7	3	10	10	10
کمینه	1/270	1/280	1/260	1/210	1/250	1/210	1/230	1/170	1/250
بیشینه	1/520	1/370	1/440	1/380	1/430	1/460	1/380	1/360	1/450
دامنه تغییرات	0/250	0/090	0/180	0/170	0/180	0/250	0/150	0/190	0/200
میانگین	1/344	1/333	1/350	1/266	1/309	1/307	1/312	1/292	1/347
انحراف معیار	0/080	0/029	0/065	0/058	0/060	0/134	0/046	0/054	0/062
خطای استاندارد	0/027	0/010	0/024	0/020	0/023	0/078	0/015	0/017	0/019

## نتیجه‌گیری کلی

دانسیته در جریان‌های چگال رسوبی که دارای مواد معلق درشت‌تر هستند (ردیف اول) و در جریان‌های چگال حاوی نمک (ردیف سوم)، مقداری باهم متفاوت‌اند. در جریان‌های چگال حاوی نمک یک لایه با دانسیته ثابت وجود دارد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که پروفیل‌های دانسیته و سرعت که به کمک مقیاس‌های انتگرالی بی‌بعد شده‌اند، در یک جریان ثابت در ایستگاه‌های مختلف متشابه می‌باشند؛ حتی برای جریان‌های مختلف روی شیب‌های متفاوت پروفیل‌های سرعت از تشابه نسبتاً خوبی برخوردارند.

بر اساس شکل‌های 6 و 7، به‌ازای شیب بستر و نوع مواد معلق مشخص، پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در سه ایستگاه اندازه‌گیری، تقریباً روی یک منحنی می‌افتند. در مورد پروفیل‌های بی‌بعد دانسیته نیز همین‌طور است. با توجه به شکل 6 می‌توان نتیجه گرفت که حتی برای شیب‌های مختلف و هر سه نوع مواد معلق مورد استفاده، پروفیل‌های بی‌بعد سرعت تشابه زیادی با هم دارند. اما در مورد پروفیل‌های بی‌بعد دانسیته چنین چیزی مشهود نیست. باوجوداین، پروفیل‌های موجود در یک ردیف تقریباً با هم مشابهند. اما پروفیل‌های

است. در مورد مقادیر  $U_{max}/U$  عکس این موضوع صادق است. در جریان‌های چگال رسوبی حاوی ذرات ریزتر و نمک ضمن پیشروی جریان، مقدار  $h_{umax}/h$  اندکی افزایش می‌یابد. در جریان چگال حاوی نمک، مقدار اختلاف دانسیته نسبی  $\Delta\rho/\Delta\rho_{ave}$  در نزدیک بستر ثابت است و در  $z/h @ 1$  مقدار آن به صفر می‌رسد. لازم به ذکر است که  $z/h @ 1$  پایین‌تر از ارتفاع نسبی کل جریان  $h_t/h @ 3$  که از پروفیل بی‌بعد سرعت به دست می‌آید، قرار می‌گیرد.

پروفیل‌های بدون بعد دانسیته در انواع مختلف جریان و برای شیب‌های مختلف مشابه نیستند. جریان‌های حاوی رسوبات درشت‌تر، در نزدیک بستر یک پروفیل دانسیته تقریباً خطی دارند درحالی‌که جریان‌های حاوی نمک در نزدیک بستر دارای یک دانسیته نسبی تقریباً ثابت هستند. ارتفاع نسبی کل جریان برابر با  $0/1 \pm 1/3$  هست. مقادیر کلی به دست آمده از داده‌ها به صورت  $U_{max}/U = 1/3 \pm 0/05$  و  $h_{umax}/h = 0/32 \pm 0/07$  می‌باشد. مقادیر  $h_{umax}/h$  در جریان‌های چگال رسوبی حاوی ذرات درشت‌تر، کمتر از مقادیر متناظر در جریان‌های چگال رسوبی حاوی ذرات ریزتر و نمک

#### منابع مورد استفاده

- امیر شکاری م و فیروزآبادی ب، 1383. بررسی عددی جریان چگال در حوضچه‌های رسوبگذاری دایروی. صفحه‌های 76-87، مجموعه مقالات اولین کنگره ملی مهندسی عمران، 24-27 اردیبهشت ماه، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.
- حسینی ع و شمسایی ا، 1384. بررسی جریان در بدنه جریان‌های گل‌آلود و تاثیر غلظت، شیب و دبی بر آن. صفحه‌های 36-44، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 17-19 آبان ماه، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.
- حقی آبی اح، 1383. تأثیر شیب کف بر پروفیل‌های سرعت و غلظت در جریان‌های غلیظ. رساله دکتری تخصصی تأسیسات آبیاری، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شهنی کرمزاده ن، محمودیان شوشتری م و قمشی م، 1385. مطالعه آزمایشگاهی تغییرات سرعت در جریان‌های غلیظ. صفحه‌های 106-117، مجموعه مقالات هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، 18-20 اردیبهشت ماه دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- فیروزآبادی ب، فرهانی ب و راد م، 1378. بررسی عددی ساختار جریان چگالی در یک کانال دوبعدی. مجله استقلال، سال 18، شماره 2، صفحه‌های 43 تا 51.
- قمشی م، 1376. بررسی آزمایشگاهی حرکت جریان‌های غلیظ. صفحه‌های 36-48، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، 11-13 شهریور ماه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
- Altinakar MS, 1988. Weakly depositing turbidity current on a small slope, Thesis No 738, Sciences Techniques, EPF Lausanne.
- Altinakar MS, Graf WH and Hopfinger EJ, 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. Journal of Hydraulic Research 28(1): 153-168
- Buckee CM, Kneller BC and Peakall J, 2001. Turbulence structure in steady, solute-driven gravity currents. Sediment transport and deposition by particulate gravity currents, Specific Publication International Association Sediment, 31(2):173-188.
- De Cesare G and Schleiss A, 1999. Physical and numerical modelling of turbidity currents, Proceedings XXVIII IAHR Congress, Graz, Austria.
- Garcia MH and Parker G, 1993. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. Journal of Geophysical Research 98(C3): 4793-4807.
- Graf WH and Altinakar MS, 1998. Fluvial Hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry. John Wiley and Sons, England, 681 pages.

Horsch GM, 2004. The structure of two-dimensional, steady, miscible laminar density currents flowing down an Incline. *Journal of Hydraulic Research* 42(2):78-88.

Turner JS, 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, London, England.