

بررسی آزمایشگاهی ساختار سینماتیکی جریانهای چگال دو بعدی بر روی شیب کم

سید عباس حسینیⁱ; ابوالفضل شمسانیⁱⁱ

چکیده

با استفاده از یک فلوم دوبعدی به ابعاد ۱۲ متر طول، ۲۵ سانتیمتر پهنا و عمق ابتدائی ۷۵ سانتیمتر و یک تانک با هد ثابت، یک جریان چگال پیوسته در آزمایشگاه در زیر آب ساکن و تمیز ایجاد شده و مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ایجاد اختلاف چگالی از ذرات کائولن با قطر متوسط ۲۰ میکرون استفاده شد. این چیدمان برای مطالعه پروفیل‌های سرعت توسعه یافته و نیروهای درگ (نیروهای اصطکاکی کف) و ارتباط بین سرعت‌های ماکزیمم و سرعت متوسط مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای از سرعت سنج صوتی استفاده شد. نتایج بدست آمده در تحقیق نشان دادند می‌توان پروفیل سرعت بی‌بعد شده را بصورت مشابه، برای جریانهای چگال دو بعدی بدست آورده و پیشنهاد نمود. ضمناً اندازه‌گیری پروفیل سرعت و در نتیجه محاسبه سرعت متوسط جریان کمک نمود بتوان ضرایب اصطکاکی برای جریانهای چگال دو بعدی را بدست آورده و تغییرات آن با تغییر عدد رینولدز بدست آورده و با نتایج تحقیقات قبلی مقایسه نمود.

کلمات کلیدی: جریان گل‌آلود، سرعت سنج صوتی، مدل آزمایشگاهی، پروفیل سرعت، ضرایب اصطکاکی

ⁱ استادیار دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران abbas_hoseyni@yahoo.com

ⁱⁱ استاد دانشگاه صنعتی شریف shamsai@sharif.edu

۱- مقدمه

نیروی رانش بواسطه ذرات معلق است، که آب‌کدر^۱ را سنگین‌تر از جریان آب‌زال^۲ می‌گرداند. این جریان‌ها جزء جریان‌های غیرپایستار^۳ می‌باشند و در آنها چگالی در جهت عمق متغیر است. این‌گونه جریان‌ها می‌توانند رسوبگذار و یا فرسایشی باشند [۱]. یک دسته دیگر از جریان‌های چگالی^۴، جریان حاوی مواد محلول مثل جریان چگالی آب‌نمک در زیر آب زلال می‌باشد که پایستار بوده و در آنها چگالی در عمق ثابت است و فرض می‌شود که اختلاط از آب محیط و رسوب کف ناچیز باشد.

جریانهای چگال یک کلاس عمومی از جریانها می باشند که بواسطه تفاوت چگالی بین دو سیال بوجود می‌آیند. در این جریان‌ها نیروی رانش در اثر تفاوت چگالی بین یک سیال و سیال دیگر بوجود می‌آید. اختلاف در چگالی ممکن است ناشی از اختلاف درجه حرارت، وجود ذرات جامد و یا مواد محلول باشد. آنچه که در این تحقیق بیشتر مدنظر می‌باشد، جریان‌های ثقلی حاوی ذرات جامد معلق و یا مواد رسوبی چون گل و لای (جریان‌های گل‌آلود) است که عامل اصلی انتقال رسوب بر روی زمین، در دریاچه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها می‌باشد. در این جریان‌ها

1-Turbid water

4-Clear Water

5 -Non Conservative

6-Density Current

جریانهای ثقیلی و تاثیر آن بر رسوبگذاری در پیش روی ما قرار داده است. کاربرد تکنیکهای اندازه گیری جدید این امکان را مهیا ساخته است تا بتوان ضمن اندازه گیری سرعت لحظه‌ای، به مدلسازی پروفیل‌های سرعت و ساختار سینماتیکی این جریانها پرداخت [۱۶، ۱۵]. تکنیک استفاده از سرعت سنج صوتی برای مطالعه جریانهای گل‌آلود برای اولین بار توسط حسینی و همکاران برای مطالعه بررسی جریانهای چگال سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت [۱۷]. با توجه به تجربه موفق استفاده از این تکنیک مؤلف این روش را برای مطالعه جریانهای چگال دو بعدی مورد استفاده قرار داد که نتایج حاصله در این مقاله برای اولین بار ارائه شده‌اند.

۲- معرفی چیدمان آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایشات

آزمایشات دو بعدی در بخشی از یک کانال به عرض ۲۰ سانتیمتر انجام می‌گردد که توسط دیواره‌ای سنگی، از قسمت عریض کانال جدا شده است. ابعاد و اندازه‌های این کانال در شکل (۱) ارائه گردیده است. در ابتدای این بخش از کانال، محفظه‌ای به طول ۱۵ سانتی متر توسط دیواره‌ای فلزی از بقیه طول کانال جدا شده است. در داخل این محفظه یک دریچه کشویی تحتانی از جنس شیشه پلکسی گلاس به عرض ۲۰ سانتی متر (عرض کانال) نصب شده است. دریچه زیر گذر به گونه‌ای تعبیه شده است که ارتفاع بازشدگی آن به حداکثر یک سانتی متر محدود گردد. بعبارت دیگر عمق جریانی که از آن خارج می‌شود حداکثر یک سانتی متر می‌باشد.

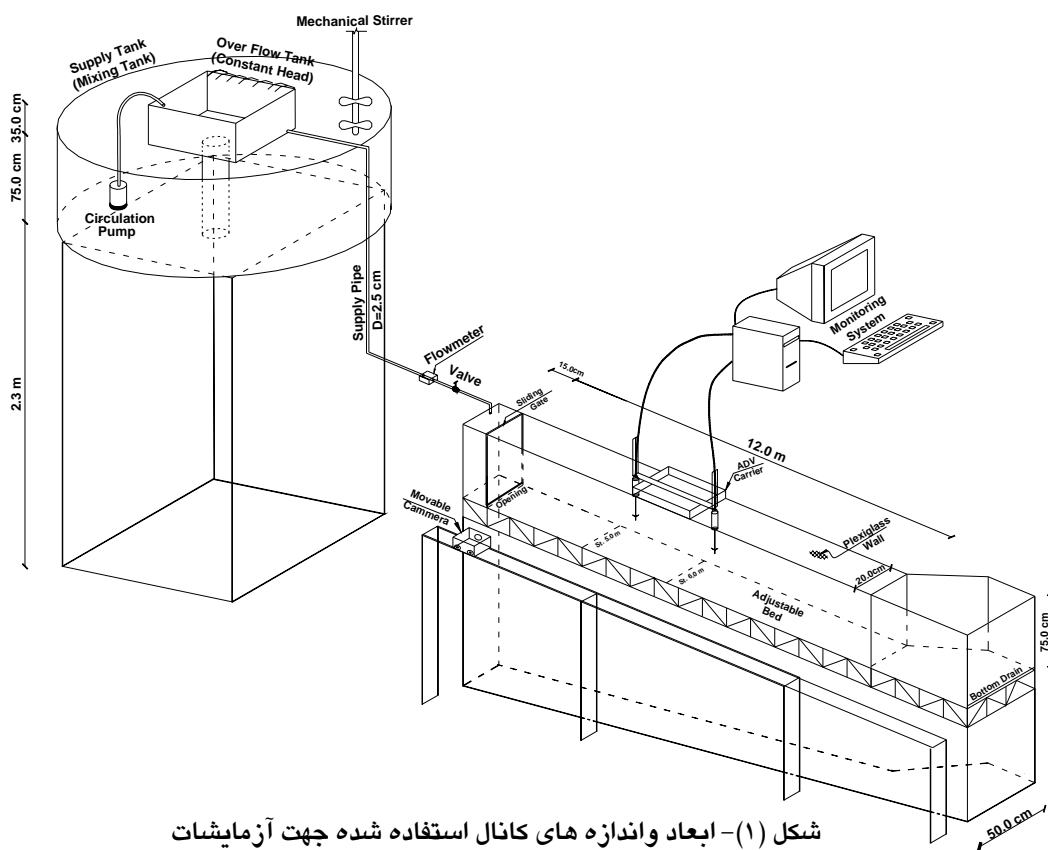
جهت انجام آزمایشات ابتدا منبع آب زیرزمینی که در آزمایشگاه و در نزدیکی کانال قرار گرفته است، شب هنگام، قبل از انجام آزمایش پر می‌شود تا درجه حرارت آن با درجه حرارت محیط آزمایشگاه یکسان شده و اختلاف دانسیته ناشی از حرارت وجود نداشته باشد. ۱۲ ساعت پس از پر نمودن این منبع زیر زمینی، آزمایش با پر کردن کانال اصلی و مخزن تغذیه از آب این منبع آغاز می‌گردد. آب توسط پمپ نصب شده در نزدیکی منبع بدخل کانال و مخزن تغذیه پمپ می‌گردد. همزمان با پر شدن

مطالعه و مروری بر تحقیقات انجام شده قبلی نشان می‌دهد در مقایسه با جریانهای ثقیلی کانسرواتیو، توجه کمتری به مطالعه و تحقیق در مورد جریانهای گل‌آلود شده است. این بواسطه مشکلاتی است که وجود ذرات معلق در جریان ایجاد می‌کنند. متأسفانه در موارد فراوانی، نتایج مربوط به جریانهای ثقیلی کانسرواتیو، بدون هیچگونه ملاحظاتی، به جریان گل‌آلود حاوی ذرات تعمیم داده می‌شود. بر این اساس ضرورت یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی جریانهای چگال حاوی ذرات معلق احساس گردید. لذا این تحقیق عمدتاً بر روی جریانهای غیرپایستار معطوف گردیده و به بررسی ساختار هیدرودینامیکی و سینماتیکی این جریانها شامل پروفیل‌های سرعت، ضرایب اصطکاکی، سرعت متوسط جریان و ... در دو بعد پرداخته است. بسیاری از مشاهدات و مباحث ارائه شده در این تحقیق مربوط به جریانهای گل‌آلودی می‌گردد که اغلب در هیدرولیک رودخانه مطرح می‌شوند و در هنگامیکه یک جریان حاوی رسوب وارد یک مخزن می‌گردد، بوجود می‌آیند.

تا کنون مطالعات آزمایشگاهی فراوانی بر روی جریانهای چگال انجام شده است [۴، ۳، ۲]. اغلب این بررسیهای آزمایشگاهی بر روی جریانهای چگال پایستار بر روی بسترهای افقی و شیبدار بوده است [۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵]. اما جریانهای گل‌آلود غیر پایستار بوده و رسوبات می‌توانند ته‌نشین و یا از یستر جدا شده وارد جریان گردند. وجود ذرات و رسوبات در جریان باعث گردیده مطالعه و بررسی این جریانها در آزمایشگاه به سختی انجام شود. اگرچه پیشرفتهای قابل توجهی در شناخت ساختار جریانهای گل‌آلود در گذشته انجام شده است اما عمده آنها با استفاده از وسایل و تجهیزات فرورونده در جریان بوده که دقت کافی را برای اندازه‌گیریهای دقیق نداشته‌اند [۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۴]. امروزه پیشرفتهای رو به افزایش تکنولوژیکی، مدلسازیهای مفید و سودمند از رفتار جریانهای چگالی را بصورت آزمایشگاهی آسان نموده‌اند. اندازه گیری تغییرات دقیق مکانی و زمانی مشخصات جریانهای ثقیلی دارای ذرات تاحدود زیادی مشکل است. با وجود این تکنیکهای اندازه گیری جدید، افق امیدوار کننده‌ای برای پیشرفت و پیش برد فهم و شناخت ساختار

آب زلال مخلوط می‌گردد. جهت تهیه یک سیال چگال همگن، از دو پمپ کف کش، سیستم هوای فشرده و چندین همزن دستی استفاده می‌شود تا ذرات کائولن بخوبی در آب شفاف حل شده و از ته نشینی آنها در حین انجام آزمایش خودداری شود.

کانال اصلی از آب زلال و تمیز، مخزن تغذیه پر شده و سپس آماده سازی سیال چگال با اختلاط حجم مشخصی کائولن متناسب با غلظت های ۰/۵، ۱/۰ و ۱/۵ درصد در مخزن تغذیه آغاز می‌گردد. برای غلظت ۰/۵ درصد ۷/۵ کیلوگرم کائولن و برای غلظتهای ۱/۰ و ۱/۵ درصد به ترتیب ۱۵ و ۲۲/۵ کیلوگرم کائولن در داخل ۱/۵ مترمکعب



شکل (۱) - ابعاد و اندازه های کانال استفاده شده جهت آزمایشات



شکل (۲) - یک نمونه بدنه جریان چگال ایجاد شده در آزمایشگاه برای انجام تحقیق

پس از پر شدن کانال از آب شفاف و آماده شدن سیال چگال در مخزن تغذیه، درجه حرارت آب کانال و سیال چگال اندازه گیری می شود که معمولا حداکثر حدود یک درجه سانتیگراد اختلاف را نشان می دهد. این اختلاف درجه حرارت علاوه بر آنکه باعث ایجاد گرادیان وابسته ناشی از اختلاف درجه حرارت می گردد بر روی اندازه گیریهای پروفیل سرعت بوسیله دستگاه سرعت سنج صوتی که تابعی از درجه حرارت سیال نیز می باشد تاثیر خواهد گذاشت

با باز شدن دریچه کشویی عملا آزمایش شروع می شود. در طول کانال ارتفاع سنجهایی با دقت 0.1 mm و با فواصل ۲۵ سانتی متری نصب شده اند. این اندازه گذاریها بر روی کف کانال و دیواره های مقابل ادامه یافته اند. این ارتفاع سنجها جهت اندازه گیری ارتفاع و مشخصات پیشانی و بدنه جریان چگال و همچنین اندازه گیری سرعت پیشرفت پیشانی جریان مورد استفاده قرار می گیرند. همزمان با خروج سیال چگال از زیر دریچه یک دوربین فیلمبرداری که بر روی یک پایه نصب شده و بر روی ریلهای کنار کانال و به همراه پیشانی جریان چگال حرکت می کند، زمان رسیدن پیشانی جریان در محل های ارتفاع سنج را ثبت می نماید که سپس با بازنگری فیلم ضبط شده زمان رسیدن پیشانی به محل های ارتفاع سنجها بدست آمده و با محاسبه فاصله زمانی بین دو ارتفاع سنج متوالی، سرعت متوسط حرکت پیشانی جریان بدست خواهد آمد.

علاوه بر ثبت و ضبط حرکت پیشانی توسط دوربین، با استفاده از دو دستگاه سرعت سنج صوتی که در فواصل ۵ و ۶ متری از ورودی بر روی پایه های ثابت نصب شده اند تغییرات سرعت لحظه ای در سه جهت اصلی (V_x , V_y , V_z) توسط این دستگاه هنگام عبور پیشانی جریان ثبت و ضبط می گردد [۱۷].

در این تحقیق مجموعا ۴۲ آزمایش دو بعدی انجام شد که ۸ تا از آزمایشات ناموفق بوده و حذف گردیدند. آزمایشات در سه شیب ۱ و ۲ و ۳ درصد و برای سه غلظت ۰/۰۵، ۱/۰ و ۱/۵ درصد و اغلب در دبی های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر دقیقه انجام شده است. اغلب

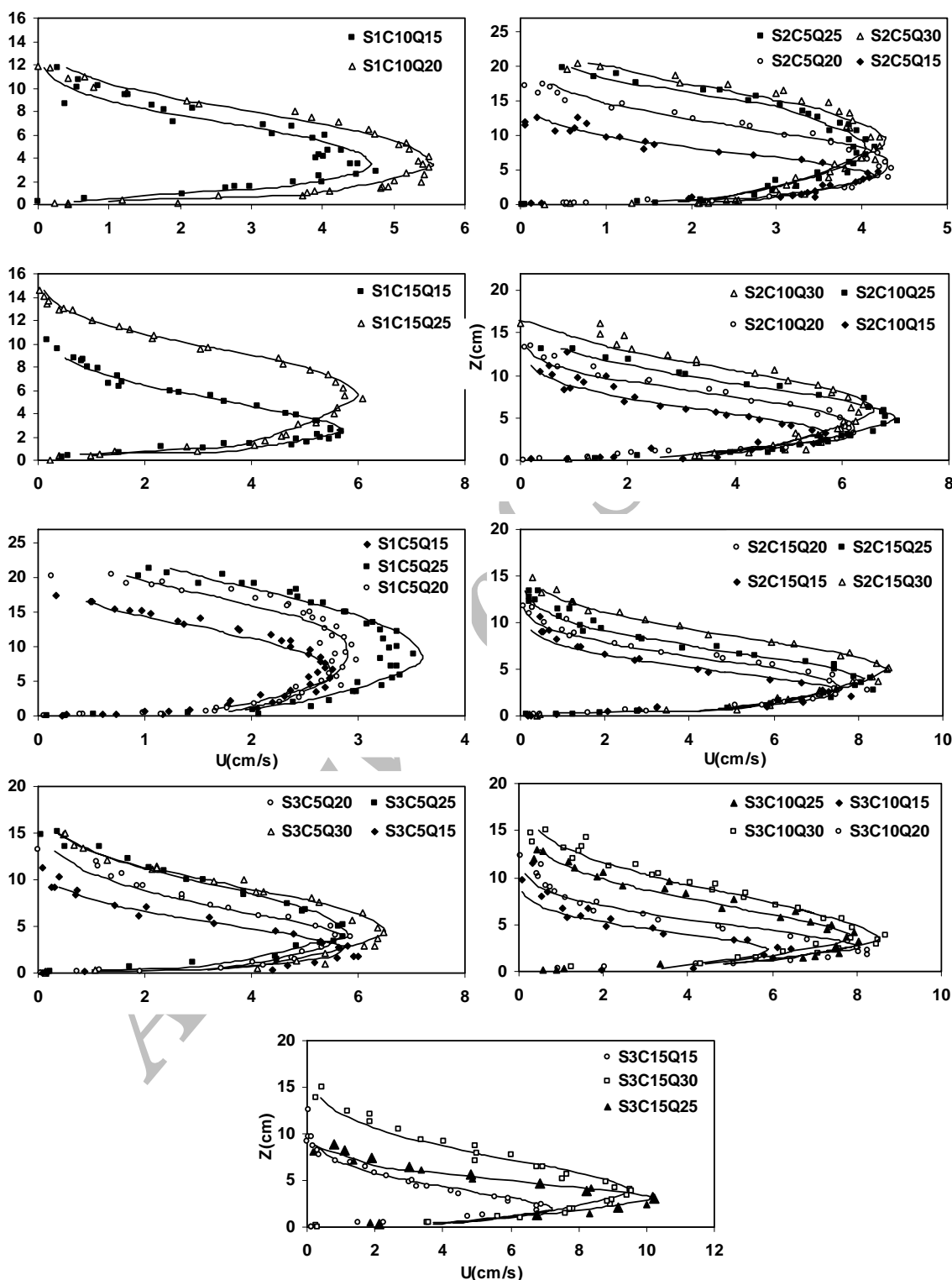
جریانهای ثقلی در طبیعت در شیبهای کم روی می دهند لذا علت انتخاب این شیبها بر این اساس بوده است. غلظت جریانهای ثقلی نیز با توجه به تعاریف ارائه شده در مورد جریانهای گل آلود که معمولا چگالی در حدود $1.02-1.03$ دارا می باشند انتخاب گردید. دبی های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر دقیقه نیز با توجه به محدودیتهای تجهیزات آزمایشگاهی و پوشش دادن رینولدزهای محدوده جریان آرام تا جریان آشفته انتخاب گردید. عدد رینولدز آزمایشات انجام شده در محدوده ۳۰۰ تا ۳۵۰۰ قرار گرفته لذا هم جریان لایه ای و هم جریان آشفته را پوشش می دهد. عدد ریچاردسون جریان نیز بیانگر فوق بحرانی بودن جریان در ورودی جریان می باشد و شرایط تشکیل یک پرش هیدرولیکی مهیاست.

۳- نتایج آزمایشگاهی مشخصه های هیدروینامیکی جریان گل آلود

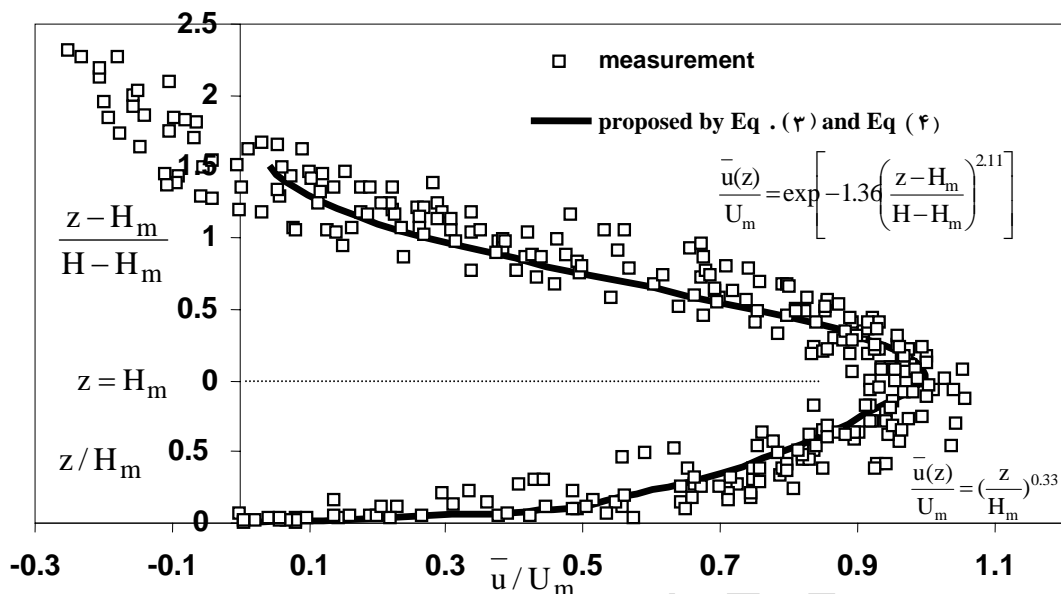
۳-۱- پروفیل سرعت

اندازه گیریهای سرعت لحظه ای در بدنه جریان چگال پس از گذشت چند دقیقه از عبور پیشانی جریان، و پس از آنکه پیشانی به انتهای کانال رسیده و ارتفاع بدنه تقریبا ثابت و بدون تغییر ماند، در راستای خط مرکزی کانال و در فواصل ۵ و ۶ متری از ورودی انجام می پذیرد. در هر مقطع در ۱۵ الی ۲۵ نقطه در راستای عمودی و در فواصل مختلف از کف و بستر جریان، با توجه به میزان ارتفاع بدنه، اندازه گیری سرعت انجام می پذیرد. در آزمایشات دو بعدی سرعتهای لحظه ای در راستای عرضی و عمودی اندکی تحت تاثیر دیواره ها می باشند. یک نمونه جریان چگال در آزمایشگاه در شکل (۲) نشان داده شده است.

با توجه به آنکه اندازه گیری سرعت در راستای خط مرکزی انجام می شود سرعت جریان در جهت عمودی به سمت سطح آب و یا کف کانال (W) و در جهت عرضی به سمت دیواره های کانال (V) تقریبا ناچیز می باشد مگر آنکه بواسطه حرکت های عرضی ناشی از برخورد شار چگال به دیواره ها در برخی از آزمایشات سرعت های عرضی و عمودی نیز مشاهده



شکل (۳) - نتایج پروفیل سرعت متوسط طولی در آزمایشات دوبعدی



شکل (۴) - پروفیل سرعت بی بعد شده در جریانهای گل آلود دوبعدی

فراوان در این ناحیه می باشد. این موضوع در سری زمانی سرعتهای لحظه ای در این ناحیه، نیز قابل مشاهده گردید.

برای توزیع سرعت در ناحیه درونی جریان (حد فاصل کف تا ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیمم)، از یک توزیع توانی به شکل زیر استفاده می گردد:

$$\frac{\bar{u}(z)}{U_m} = \left(\frac{z}{H_m}\right)^{\alpha_v} \quad (1)$$

و برای توزیع سرعت در ناحیه بیرونی نیز یک توزیع شبه گاسین به شکل زیر مناسب می باشد:

$$\frac{\bar{u}(z)}{U_m} = \exp\left[-\beta_v \left(\frac{z-H_m}{H-H_m}\right)^{\gamma_v}\right] \quad (2)$$

برای تعیین ضرایب β_v و γ_v و α_v معادلات (۱) و (۲) به پروفیلهای سرعت اندازه گیری شده در ناحیه داخلی و بیرونی جریان برای آزمایشات صورت گرفته، برازش داده می شوند و بهترین برازش با توجه به بالاترین ضریب همبستگی (R^2) برای آزمایشات مختلف بدست آمده و ضرایب β_v و γ_v و α_v بدین وسیله تعیین می گردند. بر این اساس می تواند یک معادله کلی به شکل زیر برای پروفیل سرعت در ناحیه

شکل پروفیلهای سرعت و تغییرات آن در شیبهها و دبی های مختلف در شکل (۳) آورده شده است. در شکل (۳) مشاهده می گردد با افزایش دبی ورودی جریان، پروفیلهای سرعت پهن شده و گسترش بیشتری پیدا می کنند و ارتفاع جریان و سرعت ماکزیمم جریان افزایش می یابد.

بر اساس تحقیقات قبلی از سرعت ماکزیمم (U_m) بعنوان یک سرعت مشخصه و ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیمم (H_m) و ارتفاع متوسط عمقی جریان (H) بعنوان مقیاسهای طولی و طولهای مشخصه جهت بی بعد سازی پروفیلهای سرعت استفاده می گردد تا صحت و دقت پروفیلهای سرعت اندازه گیری شده مورد بررسی قرار گیرد [۱۴، ۱۱]. بر این اساس پروفیل سرعت بی بعد شده بدست آمده و در شکل (۴) ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می گردد پروفیل سرعت برای کلیه آزمایشات می تواند به شکل مطلوب و مناسبی بوسیله یک پروفیل بی بعد شده یا پروفیل تشابهی نمایش داده شود. پروفیلهای سرعت بی بعد شده در شکل (۴) در لبه بالائی جریان پراکندگی بیشتری را نشان می دهند که این موضوع بواسطه رفتار غیر دائمی جریان و همچنین وجود خیزابهای

بیرونی و درونی جریان ارائه نمود:

$$\frac{\bar{u}(z)}{U_m} = \left(\frac{z}{H_m}\right)^{0.33} \quad (3)$$

$$\frac{\bar{u}(z)}{U_m} = \exp\left[-1.36\left(\frac{z-H_m}{H-H_m}\right)^{2.11}\right] \quad (4)$$

در شکل (۴) نتایج بی بعد شده توزیع سرعت در آزمایشات مختلف با روابط (۳) و (۴) در ناحیه بیرونی و درونی جریان مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می گردد تطابق خوبی بین سرعت های اندازه گیری شده با روابط پیشنهادی وجود دارد. همچنین شکل بی بعد شده پروفیل سرعت تشابه زیادی با شکل پیشانی جریان چگال دارد.

در صورتیکه از ارتفاعیکه سرعت به نصف

سرعت ماکزیم (U_m) می رسد یا همان $H_{1/2}$ بجای H_m برای بی بعد سازی پروفیلهای سرعت استفاده گردد پراکندگی کمتری در داده های بی بعد شده مشاهده شده و تشابه بین پروفیلهای بی بعد شده مشهودتر می باشد. بررسی ضریب پراکندگی سرعت های بی بعد شده در شکل (۵) موید این موضوع می باشد لذا استفاده از $H_{1/2}$ برای بی بعد سازی پروفیلهای سرعت در جریانهای چگال دو بعدی معقول تر و مناسب تر می باشد. بر این اساس و همانطور که در شکل (۵) مشاهده می گردد گسترش جریان در راستای قائم در حدود دو برابر $H_{1/2}$ می باشد:

$$H_t = 2H_{1/2} \quad (5)$$

با جایگزینی ارتفاع متوسط جریان (H) با ارتفاع سرعت ماکزیم (H_m) بوسیله رابطه (۶)، معادله (۴) می توان آن را اندکی ساده تر نمود و به شکل زیر نوشت:

$$H = 2.5H_m \quad (6)$$

$$\frac{\bar{u}(z)}{U_m} = \exp\left[-0.58\left(\frac{z}{H_m} - 1\right)^{2.11}\right] \quad (7)$$

۲-۳- مشخصه های متوسط عمقی

پروفیلهای سرعت اندازه گیری شده در راستای خط مرکزی کانال در هر یک از آزمایشات جهت تعیین

ارتفاع (H) و سرعت (U) متوسط لایه ای (عمقی) در هر مقطع اندازه گیری بوسیله روابط (۸) و (۹) مورد استفاده قرار می گیرد. سرعت ها و ارتفاع های متوسط جریان بوسیله روابط فوق برای آزمایشات مختلف محاسبه شده و در جدول (۱) آورده شده اند. مقادیر بدست آمده برای محاسبه عدد رینولدز جریان (Re) و عدد ریچاردسون کلی جریان چگال دو بعدی مورد استفاده قرار گرفته اند.

$$UH = \int_0^{\infty} \bar{u}(z) dz = \int_0^{H_t} \bar{u}(z) dz \quad (8)$$

$$U^2H = \int_0^{\infty} \bar{u}^2(z) dz = \int_0^{H_t} \bar{u}^2(z) dz \quad (9)$$

۳-۳- ارتباط بین سرعت و ارتفاع متوسط با

سرعت ماکزیم و ارتفاع متناظر

عموما در جریانهای چگال سه بعدی ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیم بوسیله نسبت نیروهای درگ در مرزهای بالائی و پائینی کنترل می شود. مقادیر زیاد درگ در مرز بالائی (همانند جت های دیواری و جریانهای فوق بحرانی) تمایل دارند ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیم را کاهش دهند در حالیکه مقادیر زیاد درگ در مرز پائینی (بعنوان مثال جریانهای گل آلود در حال حرکت بر روی دیون ها و یا سایر اشکال بستر) تراز و ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیم را افزایش خواهند داد.

نسبت بین ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیم (H_m) با ضخامت و ارتفاع کل جریان (H_t) برای آزمایشات مختلف این تحقیق در جدول (۱) بدست آمده و ارائه گردیده اند که مقدار متوسط آن:

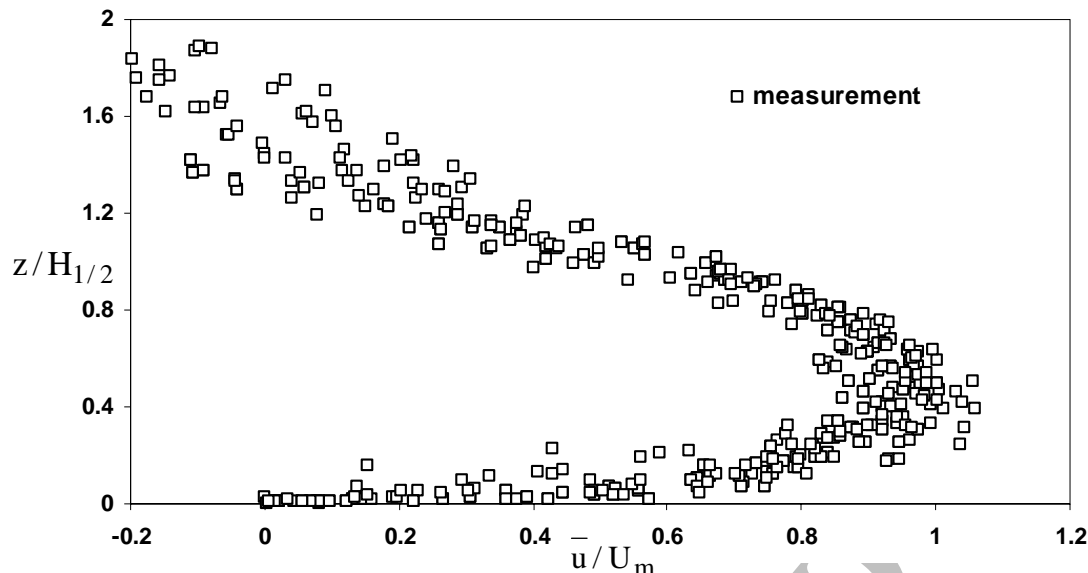
$$\frac{H_m}{H_t} = 0.31 \quad (10)$$

$$\frac{U_m}{U} \cong 1.275 \quad (11)$$

$$\frac{H_t}{H} \cong 1.33 \quad (12)$$

$$\frac{H_m}{H_{1/2}} \cong 0.48 \quad (13)$$

مقایسه نسبتهای فوق با تحقیقات آزمایشگاهی پیشین تطابق نسبتا خوبی را نشان می دهد [۱۸، ۱۹].



شکل (۵) - نتایج بی بعد سازی سرعت‌های اندازه گیری شده بر اساس $H_{1/2}$

جدول (۱) - نتایج سرعت، ارتفاع متوسط، عدد رینولدز و عدد ریچاردسون در جریانهای گل آلود دوبعدی

شماره آزمایش	توصیف	H_t (cm)	U_m (cm/s)	H_m (cm)	U (cm/s)	H (cm)	Re_c	Ri	Re_t	Fr'	U_m/U	H_t/H	H_m/H_t
No.30	S1C10Q15	11.2	4.7	3.05	3.6	8.4	2881.4	3.90	3864.93	0.51	1.30	1.34	0.27
No.31	S1C10Q20	13.2	5.2	3.7	3.8	10.6	4079.4	4.55	5104.10	0.47	1.38	1.25	0.28
No.32	S1C10Q25	18.1	4.7	4.85	3.9	15.0	5912.8	6.19	7147.32	0.40	1.22	1.21	0.27
No.33	S1C10Q30	23	4.7	7.95	3.9	18.1	7248.4	7.22	9236.15	0.37	1.20	1.27	0.35
No.34	S1C15Q15	9	5.72	3.1	4.2	7.3	3116.8	3.79	3832.12	0.51	1.36	1.23	0.34
No.35	S1C5Q15	18	2.76	5.55	2.3	14.9	3432.6	8.90	4145.70	0.34	1.22	1.21	0.31
No.36	S1C5Q25	24.1	3.6	7.7	2.9	18.7	5494.1	6.86	7080.63	0.38	1.25	1.29	0.32
No.37	S1C5Q20	22.5	3.2	9.3	2.5	17.5	4450.3	8.37	5721.79	0.35	1.26	1.29	0.41
No.38	S1C5Q30	23.15	3.65	7.7	3.0	19.5	5952.9	6.58	7085.28	0.39	1.21	1.19	0.33
No.39	S1C15Q25	16	5.9	6.3	4.7	12.1	5779.9	4.97	7642.86	0.45	1.25	1.32	0.39
No.40	S1C15Q25	15.6	5.9	6	4.6	11.9	5428.3	5.24	7116.13	0.44	1.29	1.31	0.38
No.41	S2C5Q25	20.74	4.05	7.6	3.4	17.7	5820.3	4.78	6837.70	0.46	1.20	1.17	0.37
No.42	S2C5Q30	24	4.3	8.8	3.5	19.3	6624.1	4.82	8237.23	0.46	1.23	1.24	0.37
No.43	S2C5Q20	21.7	4.1	7.7	3.4	15.6	5153.1	4.13	7168.04	0.49	1.21	1.39	0.35
No.44	S2C10Q30	17.56	6.6	5.75	5.8	13.4	7618.7	2.45	9954.68	0.64	1.14	1.31	0.33
No.45	S2C10Q25	14.28	7	4.7	5.5	11.0	5932.4	2.21	7705.35	0.67	1.27	1.30	0.33
No.46	S2C10Q20	13.2	6.22	3.72	4.9	9.6	4726.9	2.42	6491.81	0.64	1.26	1.37	0.28
No.47	S2C10Q15	11.7	5.68	3.17	4.2	8.1	3391.1	2.77	4898.32	0.60	1.34	1.44	0.27
No.48	S2C15Q25	11.7	7.6	2.8	6.1	7.9	4730.1	1.99	6987.69	0.71	1.26	1.48	0.24
No.49	S2C15Q15	10.2	7.6	2.4	5.6	6.5	3507.4	1.90	5533.32	0.73	1.36	1.58	0.24
No.50	S2C5Q15	12.4	4.17	4.05	3.3	10.3	3330.8	2.94	4009.87	0.58	1.27	1.20	0.33
No.51	S2C15Q30	14.6	8.66	4.78	6.7	10.5	6824.1	2.14	9516.41	0.68	1.29	1.39	0.33
No.52	S3C5Q20	13.5	5.83	3.72	4.4	10.0	4457.2	1.61	5998.10	0.79	1.33	1.35	0.28
No.53	S3C5Q25	15.5	5.7	4.2	4.7	11.6	5180.5	1.65	6895.92	0.78	1.23	1.33	0.27
No.54	S3C5Q30	15.47	6.5	4.2	5.1	12.2	5899.9	1.46	7481.28	0.83	1.29	1.27	0.27
No.55	S3C5Q15	9.8	5.86	2.1	4.3	7.1	2912.7	1.17	4031.83	0.92	1.36	1.38	0.21
No.56	S3C10Q25	13	7.9	3.42	6.2	9.6	5677.8	1.55	7649.94	0.80	1.28	1.35	0.26
No.57	S3C10Q15	8.2	6	2	4.5	5.8	2514.7	1.75	3545.18	0.76	1.33	1.41	0.24
No.58	S3C10Q30	14.9	8	4	6.5	11.1	6805.6	1.62	9110.86	0.79	1.23	1.34	0.27
No.59	S3C10Q20	9	8.1	2.5	5.9	7.1	4003.7	1.26	5075.08	0.89	1.38	1.27	0.28
No.60	S3C15Q15	8.1	7.39	2.3	6.1	5.6	3202.5	1.36	4673.91	0.86	1.21	1.46	0.28
No.61	S3C15Q30	13.43	9.6	3.7	7.7	9.7	6497.1	1.51	9042.05	0.81	1.25	1.39	0.28
No.62	S3C15Q25	8.9	10.25	3	7.5	6.3	4172.7	1.04	5866.80	0.98	1.37	1.41	0.34
No.63	S3C15Q20	9	9.6	3.3	7.3	6.2	3799.5	1.06	5560.24	0.97	1.32	1.46	0.37

جدول (۲) - نتایج مربوط به تعیین سرعت برشی u_* ، ارتفاع زبری و ضریب اصطکاک برای آزمایشات دوبعدی

شماره آزمایش	توصیف	C_f	$U_*(\text{cm/s})$	$Z_0(\text{cm})$	f_0+f_i
No.30	S1C10Q15	0.0585	0.8752	0.3710	0.0390
No.31	S1C10Q20	0.0238	0.5822	0.0584	0.0455
No.32	S1C10Q25	0.0232	0.5869	0.1894	0.0619
No.33	S1C10Q30	0.0123	0.4350	0.0613	0.0722
No.34	S1C15Q15	0.0196	0.5895	0.1881	0.0379
No.35	S1C5Q15	0.0151	0.2784	0.0985	0.0890
No.36	S1C5Q25	0.0133	0.3331	0.0893	0.0686
No.37	S1C5Q20	0.0122	0.2799	0.0888	0.0837
No.38	S1C5Q30	0.0140	0.3564	0.1159	0.0658
No.39	S1C15Q25	0.0309	0.8314	0.1545	0.0497
No.40	S1C15Q25	0.0338	0.8404	0.2534	0.0524
No.41	S2C5Q25	0.0095	0.3280	0.0506	0.0957
No.42	S2C5Q30	0.0100	0.3496	0.0328	0.0965
No.43	S2C5Q20	0.0119	0.3706	0.0375	0.0825
No.44	S2C10Q30	0.0082	0.5257	0.0372	0.0489
No.45	S2C10Q25	0.0148	0.6716	0.0665	0.0442
No.46	S2C10Q20	0.0137	0.5780	0.1750	0.0484
No.47	S2C10Q15	0.0292	0.7230	0.1451	0.0555
No.48	S2C15Q25	0.0470	1.3130	0.2305	0.0397
No.49	S2C15Q15	0.0670	1.4490	0.2932	0.0379
No.50	S2C5Q15	0.0101	0.3296	0.0269	0.0589
No.51	S2C15Q30	0.0207	0.9650	0.1224	0.0428
No.52	S3C5Q20	0.0135	0.5080	0.0329	0.0483
No.53	S3C5Q25	0.0346	0.8656	0.2638	0.0495
No.54	S3C5Q30	0.0234	0.7734	0.0977	0.0439
No.55	S3C5Q15	0.0415	0.8763	0.1047	0.0352
No.56	S3C10Q25	0.0433	1.2838	0.2092	0.0465
No.57	S3C10Q15	0.0270	0.7416	0.0549	0.0525
No.58	S3C10Q30	0.0335	1.1884	0.2013	0.0485
No.59	S3C10Q20	0.0740	1.5965	0.2208	0.0379
No.60	S3C15Q15	0.0463	1.3188	0.2566	0.0407
No.61	S3C15Q30	0.0284	1.2881	0.1617	0.0454
No.62	S3C15Q25	0.0412	1.5210	0.1750	0.0311
No.63	S3C15Q20	0.0594	1.7789	0.3294	0.0318
متوسط		0.0284	0.8039	0.1469	0.0538
ماکزیمم		0.0740	1.7789	0.3710	0.0965
مینیمم		0.0082	0.2784	0.0269	0.0311
واریانس		0.0003	0.1827	0.0086	0.0003

۳-۴- سرعت برشی و ضریب اصطکاکی

با استفاده از قانون توزیع لگاریتمی پروفیل سرعت یا همان معادله پیشنهادی توسط Altinakar می توان سرعت برشی یا همان u_* و ضریب اصطکاک در آزمایشات بدست آورد [۱۹].

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (14)$$

نتایج مربوط به تعیین سرعت برشی u_* و ارتفاع زبری برای کلیه آزمایشات در جدول (۲) ارائه گردیده است. سرعت برشی تعیین شده با استفاده از قانون دیوار برای تعیین ضریب اصطکاک در جریانهای گل آلود دوبعدی بوسیله رابطه پیشنهادی Parker به شکل زیر مورد استفاده قرار گیرد [۱۳، ۱۴].

$$C_f = \frac{u_*^2}{U^2} \quad (15)$$

بر این اساس ضریب اصطکاک برای آزمایشات دوبعدی در این تحقیق بدست آمده و در جدول (۲) ارائه گردیده است.

در جدول (۲) مشاهده می گردد مقدار متوسط ضریب اصطکاک در آزمایشات دوبعدی $C_f = 0.028$ می باشد. عدم اطمینان در مورد میزان دقیق ضریب وان کارمن در جریانهای حاوی رسوبات و تاثیر آن بر سرعت برشی و به تبع آن ضریب اصطکاکی باعث می شود ضرایب اصطکاک از رابطه شزی نیز کنترل شوند. با توجه به محاسبه و تعیین سرعت و ارتفاع متوسط جریان، می توان از رابطه (۱۶) یا همان رابطه پیشنهادی توسط Middleton [۱۱] استفاده نموده و میزان کل ضریب اصطکاکی را که شامل ضریب اصطکاک در مرز پائینی (C_f یا همان f_0) و ضریب اصطکاک در سطح مشترک شماره چگال با سیال بالائی (f_i) می باشد، تعیین نمود. نتایج مربوط به ضریب کل اصطکاک ($f_i + f_0$) که بر اساس این روش بدست آمده است، در جدول (۲) ارائه گردیده و در شکل (۶) با نتایج آزمایشات Parker & Fukushima [۱۹] و [۱۳] Garcia & Parker مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می گردد مقدار کل ضریب اصطکاکی اندکی بیشتر از نتایج آزمایشات و تحقیقات قبلی می باشد اما

مقدار متوسط تقریباً منطبق بر تحقیقات قبلی می باشد ضمناً مقایسه نتایج بدست آمده از رابطه شزی و رابطه (۱۵) تفاوت قابل توجهی را نشان نداده و بیانگر این موضوع قسمت عمده نیروی مقاوم در مقابل جریان یا همان نیروی اصطکاکی مربوط به اصطکاک کف یا همان C_f یا همان f_0 می باشد.

$$U^2 = 8g'H \frac{\sin \theta}{f_i + f_0} \quad (16)$$

۴- نتیجه گیری

بواسطه مشکلات و پیچیدگیهایی که برای اندازه گیری و مشاهده مستقیم جریانهای گل آلود طبیعی وجود دارد، تجهیز کردن و مونیتور کردن این جریانهای طبیعی در دریاها عمیق، مخازن سد و... یکی از چشم اندازهای آینده محسوب میگردد. لذا مدلسازی آزمایشگاهی و تئوری در حال حاضر تنها راه بررسی جریانهای گل آلود می باشد، تا بتوان بطور کامل حرکت این جریانها و رژیم رسوبگذاری آنها را شناخت.

با توجه به تفاوتها در ساختار و ساختمان جریانهای چگال با جریانهای جت و کانالهای باز، مطالعه و بررسی جریانهای چگال، تعاریف خاص خود را می طلبد. امروزه پیشرفتهای تکنولوژیکی، بطور فزاینده، مدلسازیهای مفید و سودمند از رفتار جریانهای چگال را، هم آزمایشگاهی و هم عددی، آسان کرده اند.

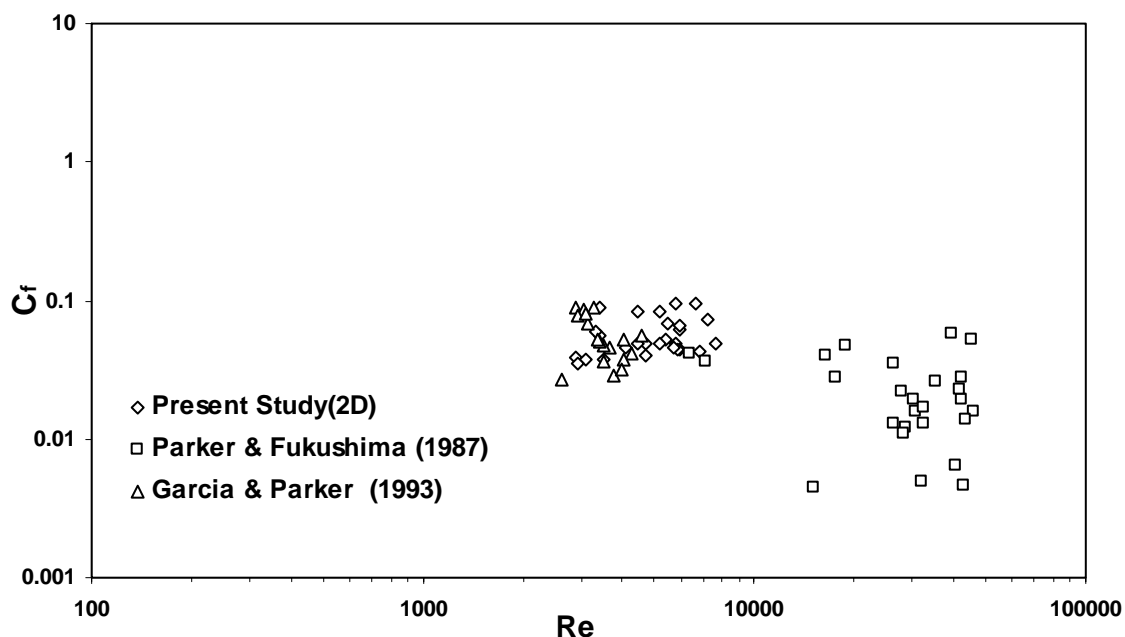
پروفیلهای سرعت متوسط بدست آمده در این تحقیق در بدنه جریان چگال، با جت های دیوار خنثی (بدون وجود ذرات معلق) تطابق نسبتاً خوبی دارند در حالیکه یک جت دیوار خنثی کاهش خطی سرعت را در ناحیه بالای سرعت ماکزیمم نشان می دهد، نتایج این آزمایشات برای یک جت طبقه ای و لایه بندی شده یک انحنا با توزیع شبه گاسین را در ناحیه بیرونی نشان می دهد. ولیکن بخش پائینی یا ناحیه درونی پروفیل سرعت تطابق خوبی را با جت های خنثی نشان داده و از یک توزیع لگاریتمی (توانی) پیروی می کند. با استفاده از این توزیع لگاریتمی سرعت، ضریب اصطکاکی در مرز پائینی در آزمایشات مختلف محاسبه گردید. با توجه به آنکه سرعت متوسط در بدنه جریان چگال تابعی از شیب کف، ضریب اصطکاک در مرز بالائی و

بین کمیت‌های سرعت و ارتفاع جهت استفاده در تحقیقات آتی پیشنهاد گردید.

در جریان‌های آزمایشگاهی این تحقیق یک مشخصه طولی جدید ($H_{1/2}$) که معمولاً در جریان‌های جت مورد استفاده قرار می‌گیرد برای بی بعد سازی مورد استفاده قرار گرفتند. سرعت‌های بی بعد شده در این حالت همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده‌است، پراکندگی کمتری را نشان دادند.

پائینی جریان و شتاب ثقل بوده و بوسیله یک رابطه از نوع شزی (فرمول (۱۶)) قابل پیش بینی است، ضرایب اصطکاکی از رابطه شزی نیز بدست آورده شده و نحوه و چگونگی تغییر آنها با عدد رینولدز بررسی گردید (جدول (۲)). نتایج بدست آمده با تحقیقات آزمایشگاهی قبلی تطابق خوبی را در این بخش نشان می‌دهد.

در این تحقیق مقایسه بین سرعت و ارتفاع متوسط با سرعت ماکزیمم و ارتفاع متناظر انجام شده و ارتباط



شکل (۶) - مقایسه ضریب اصطکاک در مقابل عدد رینولدز جریان در تحقیقات آزمایشگاهی مختلف

[7] Heezen, B. C., and Ewing, M., (1952), "Turbidity currents and submarine slumps", Am. J. Sci., Vol.250, 849-873
 [8] Middleton, G. V., (1970), Experimental studies related to problems of flysch sedimentation. In Flysch Sedimentology in North America, ed. J. Lajoie, Geol. Assoc. Can. Spec. Pap. Vol.7, 253-72
 [9] Hopfinger, E. J., (1983), Snow avalanche motion and related phenomena. Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.15, 47-76
 [10] Pyc, K., (1994), "Sediment transport and depositional processes", Blackwell scientific publ.
 [11] Middleton, G. V., (1966a), "Small scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension", J. Sediment. Petrol. Vol.36: 202-8
 [12] Britter, R. E., Simpson, J. E., (1978), "Experiments on the dynamics of a gravity current head", J. Fluid Mech., Vol.88, 223-240
 [13] Garcia, M. H., and Parker, G., (1993), "Experiments on the entrainment of sediment into suspension by dense bottom current", J. Geoph. Res., Vol. 98, 4793-4807.

۵- مراجع

[۱] - بهار فیروزآبادی، "بررسی تجربی و تئوری جریان‌های مطابق و تهیه مدل ریاضی از جریان چگالی حاوی ذرات"، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، بهمن ۱۳۷۸
 [2] Miles, J., (1990), Richardson's number revisited. In Stratified Flows, Proc. Third Int. Symp. On Stratified Flows, Feb. 3-5, 1987, Pasadena CA, Am. Soc. Civil Eng., ed. E. J. List, G. H. Jirka, 1-7.
 [3] Hay, A. E., Burling, R. W., and Murray, J. W., (1982), "Remote acoustic detection of a turbidity current surge", Science, Vol.217, 833-835.
 [4] Turner, J. S., (1973), Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press, London, U. K.
 [5] Turner, J. S., (1979), Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge Univ. Press. 368pp. 2nd ed.
 [6] Mulder, T., Savoye, B., and Syvitski, J. P. M., (1997a), "Numerical modeling of mid-sized gravity flow", Sedimentology, Vol.44, 305-326.

سنج صوتی^۱، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۸۵

[18] Parker, G. Fukushima, Y., (1987), "Experiments on turbidity currents over an erodible bed", J. Hydr. Res. Vol.25, 123-147.

[19] Parker, G., Fukushima, Y., and Pantine, H. M., (1986), "Self-accelerating turbidity currents", J. Fluid Mech., Vol.171, 145-181.

[20] Altinakar, M. S., Graf, W. H., and Hopfinger, E. J., (1996), "Flow structure in turbidity currents", J. Hydr. Res., No.34, 713-718.

[14] Garcia, M., Parker, G., (1991), "Experiment of bed sediment into suspension", J. Hyd. Eng. Vol.117, 414-435.

[15] Kneller, B., and Buckee, C., (2000), "The structure and fluid mechanics of turbidity current", sedimentology, Vol.47, 62-94.

[16] Best, J., Kirkbride, A. D., and Peakall, J., (2001), "Mean flow and turbulence structure of gravity currents", Sediment transport and deposition by particulate gravity currents, Spec. Publ. Int. Assoc. Sediment, 159-173.

[۱۷] - سید عباس حسینی، "مطالعه آزمایشگاهی ساختار

هیدرودینامیکی جریانهای گل آلود با استفاده از دستگاه سرعت

Archive of SID