

بررسی تجربی ساختار جریان گل آلود سه بعدی مغشوش

بهار فیروزآبادی^{۱*}، سید محمدرضا موسوی حکمتی^۲، منوچهر راد^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۳- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

* تهران، صندوق پستی ۹۵۱۷-۱۱۳۶۵

چکیده- در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های جریان چگال سه‌بعدی و مغشوش حاوی ذرات ریز، به روش تجربی مطالعه شده است. یکی از مهمترین مشخصه‌ها در این جریان، پروفیل سرعت است که ساختار هیدرودینامیکی جریان را نشان می‌دهد و در این تحقیق توسط دستگاه ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) اندازه‌گیری شده است. ذرات استفاده شده کائولن با D_{50} حدود ۱۱ میکرون است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان حاوی ذرات در ورودی، میزان عمق یا ارتفاع آن در امتداد عمود بر بستر همواره افزایش می‌یابد و با افزایش غلظت و شیب، میزان این کمیت عمدتاً کاهش می‌یابد. همچنین در شیبهای بالای بستر کانال، اثر غلظت و دبی ورودی بر ارتفاع جریان چگال کم می‌شود. علاوه بر آن به دلیل درون آمیختگی شدید در جهت عرضی و قائم در امتداد فصل مشترک با آب صاف، ارتفاع جریان پس از ورود به زیر آب صاف، افزایش می‌یابد. بررسی پروفیل‌های سرعت در جریان حاوی ذرات نشان می‌دهد که به دلیل وجود نیروهای اینرسی در ابتدای کانال، مقدار بیشینه و متوسط سرعت در جهت جریان در ابتدای کانال بزرگتر بوده و سریعاً از آن کاسته می‌شود. با نزدیکتر شدن به انتهای کانال، موقعیت سرعت بیشینه به سمت بالاتر از کف بستر حرکت می‌کند. جریان چگال پس از خروج از دریچه زیرگذر عریض شده و پس از مدتی تمامی عرض کانال را پر می‌کند. با وجود این پروفیل‌های سرعت نشان می‌دهد که تغییرات سرعت در جهت عرض کانال همچنان وجود دارد. بررسی عمق شاره چگال نشان می‌دهد که این جریان چگال پس از طی مسافتی، به حالت تثبیت شده می‌رسد و درون آمیختگی به مقدار ثابتی میل می‌کند.

کلید واژگان: جریان چگال، جریان حاوی ذرات، پروفیل سرعت.

۱- مقدمه

لایه‌های مختلف سیال به وجود می‌آید، جریان چگال گفته می‌شود. جریان چگال حاوی ذرات جامد معلق، جریان گل آلود نامیده می‌شود. اختلاف چگالی که محرک اصلی رانش این جریان است، می‌تواند ناشی از اختلاف درجه

هنگامی که جریان گل آلود رودخانه‌ها به مخزن سد وارد می‌شود، به علت سنگین‌تر بودن از آب مخزن، به داخل آن فرو رفته و بر روی کف در جهت شیب، جریان می‌یابد. به این پدیده که در اثر اختلاف چگالی بین

حرارت، وجود مواد محلول و وجود ذرات معلق باشد (Turner, 1973). گرادیان چگالی افقی نیروی رانش را به وجود آورده و سیال چگالترا را در زیر سیال با چگالی کمتر به حرکت در می آورد. شاید مهمترین ظهور و کاربرد جریان گل آلود در مخازن سدها باشد که یکی از روشهای مهم رسوبزدایی در مخازن نیز به شمار می رود، به طوری که (Garcia 1994) از جریان گل آلود به عنوان روش عمومی برای رسوبزدایی مخازن سدها نام می برد.

جریان گل آلود در مخزن سدها اغلب در هنگام سیلاب به وجود آمده و اگر شیب کف زیاد (بالاتر از ۰/۰۰۱) و یا پهنای آن کم باشد به حرکت خود ادامه می دهد. در این حرکت، ذرات درشت تر در ناحیه دلتا سقوط کرده و فقط جریان ذرات ریز باقی می ماند که می تواند به انتهای مخزن و ساختمان سد برسد (Firoozabadi, et al., 2003).

(Fan and Morris (1992) ذکر می کنند که جریان گل آلود می تواند ذرات لای و رس را تا چند کیلومتر با خود حمل کند. محاسبه و پیش بینی عمر مخزن، نیازمند بررسی دقیق فرسایش، حمل و ته نشینی رسوبات است و از سوی دیگر به منظور حفظ و نگهداری مخازن موجود باید دانش و اطلاعات کافی برای درک بهتر مسائل مربوط به رسوبگذاری و بهبود عملکرد مخزن وجود داشته باشد. هدایت جریان گل آلود به سمت ساختمان سد و خارج ساختن آن می تواند موجب کاهش رسوبگذاری در مخزن شود و به همین دلیل کنترل رسوبگذاری، به شناخت رفتار جریانهای گل آلود وابسته است. در این صورت با گشودن دریچه های خروجی تحتانی در زمان مناسب می توان به تخلیه حداکثر رسوبات و اتلاف حداقل آب دست یافت (Tsihrintzi and Alavian, 1996).

(Cesare et al. (2001) در بررسیهای میدانی خود به این نتیجه رسیدند که جریانهای گل آلود حاصل از سیلابهای بزرگ می توانند مقادیر زیادی از رسوبات بستر را کنده و همراه با جریان، تا نزدیک ساختمان سد حمل کنند. بررسیهای میدانی جریان گل آلود ناشی از حرکت این

جریان در عمق زیاد و در زیر حجم وسیع آب، بسیار مشکل، پرهزینه و مخرب است. همچنین به دلیل تقریبهای بسیار زیادی که در استخراج نتایج اعمال می شود، به کارگیری آنها با عدم قطعیت زیادی همراه است (Bradford and Katopodes, 1999). لذا بررسیهای جریان گل آلود بیشتر به صورت آزمایشگاهی انجام شده است. بیشتر این بررسیها به صورت دو بعدی بوده و به عنوان مثال می توان به تحقیقات (Altinakar et al., 1996)، (Yu et al., 2000)، (Lee and Yu, 1997) و (Bonnecase et al., 1993) اشاره کرد. بررسی سه بعدی جریان چگال به ویژه جریان آب نمک توسط (Alavian (1986) انجام و ویژگیهای جریان به خوبی استخراج شده است. اما بررسی آزمایشگاهی جریان حاوی ذرات سه بعدی همچنان نیازمند تحقیق و بررسی است.

(Fukushima and Hayakawa (1995) راهسازی جریان حاوی ذرات و گسترش عرضی پیشانی آن را بررسی کرده اند. اما بررسی ساختار جریان به ویژه پروفیل سرعت و اثر آن بر رسوبگذاری جریان گل آلود سابقه چندانی ندارد. ذکر این نکته لازم است که وجود ذرات، جریان را کند ساخته و استفاده از دستگاههای اندازه گیری را محدود می کند. در نتیجه استفاده از دستگاههای اندازه گیری سرعت لحظه ای مانند سیم داغ یا لیزر امکان پذیر نیست.

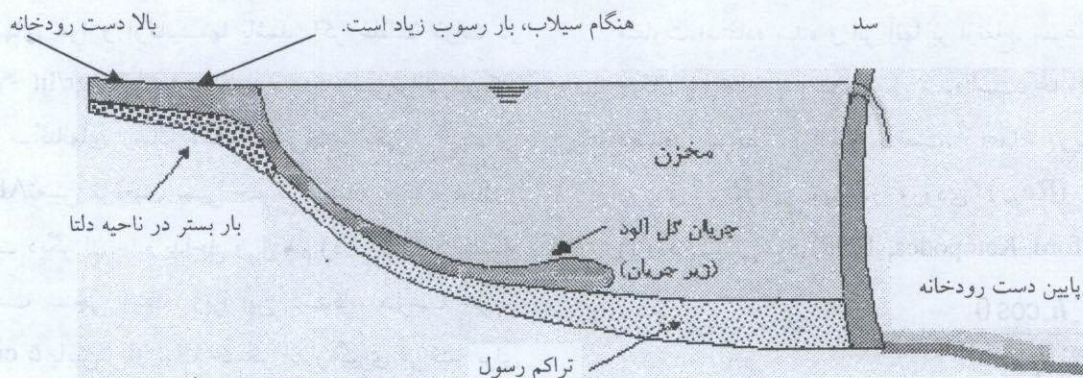
دستگاه اندازه گیری ADV به عنوان تنها ابزار دقیق قابل استفاده مطرح شده است (Best et al., 2001) و (Lemmin, Rolland, 1997). این دستگاه با ارسال امواج صوتی و دریافت بازتاب کار می کند و لذا می تواند سرعت جریان چگال حاوی ذرات را در هر نقطه به صورت لحظه ای، در سه جهت x ، y و z بر روی مانیتور به نمایش بگذارد. در این آزمایش جریان گل آلود حاوی ذرات کائولن به صورت سه بعدی و مغشوش - برای دستیابی به اهدافی مانند تاثیر عوامل مختلف بر ارتفاع

کفکش به درون مخزن کوچکتر (مخزن ایجاد هد ثابت) پمپ و بخش اضافی آن به درون مخزن تهیه مخلوط سرریز می‌شود که این عمل، همچنین موجب چرخش جریان و ممانعت از ته نشینی می‌شود. یک پمپ کفکش دیگر در درون مخزن تغذیه قرار گرفته و عمل چرخش را انجام می‌دهد. همچنین از یک همزن برای جلوگیری از ته‌نشینی ذرات استفاده شده است. جریان حاوی ذرات بعد از مخزن ایجاد هد ثابت، به قسمتی از کانال وارد می‌شود که از بقیه کانال، توسط دیوار جدا شده و آب زلال به این قسمت راه ندارد. زمانی که سطح مخلوط چگال، هم‌سطح با آب صاف کانال اصلی شود، توسط یک دریچه زیر گذر (که به صورت کشویی باز می‌شود) جریان چگال در زیر آب صاف به کانال اصلی وارد می‌شود و در انتهای کانال به صورت کفشور و سیفون تخلیه می‌شود. عرض اولیه شاره چگال ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع اولیه آن ۱/۲۵ سانتیمتر است. جریان چگال حاوی ذرات کائولن در زیر آب صاف به سمت پایین دست در عرض و طول کانال گسترش می‌یابد. طرحواره‌ای از دستگاه آزمایش در شکل ۲ دیده می‌شود. شیب کانال توسط جکهای هیدرولیکی، حداکثر تا ۳/۵٪ تغییر می‌کند. آزمایشها در سه شیب ۱، ۲ و ۳ درصد و در سه دبی ۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر دقیقه انجام شده است.

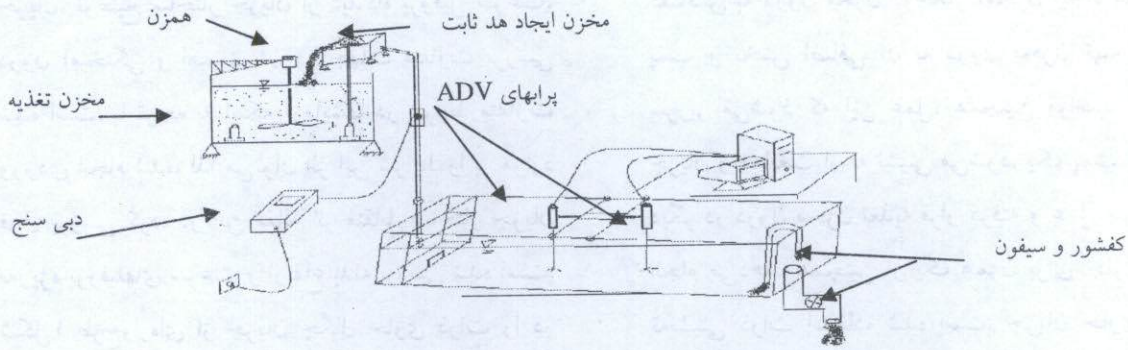
جریان، توضیح ساختار جریان از دیدگاه پروفیل سرعت، درون آمیختگی و اهمیت آن در جهات متفاوت بررسی شده است. با توجه به اینکه آزمایشها در شرایط متفاوت ورودی انجام شده، لذا می‌توان اثر این شرایط را بر موارد فوق بررسی کرد. در این مقاله اثر متقابل ساختار جریان به‌ویژه پروفیل‌های سرعت و ارتفاع بدنه بررسی شده است. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از جریان چگال حاوی ذرات را در مخزن سد نشان می‌دهد.

۲- دستگاه و روش انجام آزمایش

دستگاه آزمایش یک کانال شیب‌پذیر به طول ۱۲ متر عرض ۱/۲۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر است. مخزن تغذیه (تهیه مخلوط) به شکل استوانه‌ای از فولاد ضد زنگ و به حجم ۲ متر مکعب در بالا دست قرار می‌گیرد و حاوی مخلوط ذرات و آب است. برای ایجاد مخلوط حاوی ذرات از کائولن با چگالی مخصوص ۲۶۵۰ کیلو گرم بر متر مکعب- با اندازه متوسط ذرات حدود ۱۰-۱۵ میکرون- استفاده شده است. در این آزمایشها از سه غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ استفاده شد. به دلیل نیاز به هد ثابت در خروجی این مخزن و به منظور تنظیم دبی ثابت، در بالای این مخزن، مخزن کوچکتری به ابعاد ۳۰×۵۰×۵۰cm تعبیه شده است. ابتدا مخلوط حاوی ذرات توسط پمپ



شکل ۱ شماتیک جریان چگالی



شکل ۲ شماتیک دستگاه آزمایش

شکل پیشانی از دو دوربین فیلم برداری دیجیتال استفاده شده است. کانال، اسکلت فلزی و دیوارهای شیشه ای دارد که قابل فیلم برداری از پهلو است. در سمت پهلویی کانال یک ریل فلزی ساخته شده که ارابه فیلم برداری بر روی آن حرکت می کند و با نصب دوربین بر روی آن می توان از پخش طولی، ارتفاع بدنه و پیشانی جریان با دقت ۰/۰۱ ثانیه فیلم برداری کرد. کف کانال برای اندازه گیری پخش طولی و عرضی جریان، شبکه بندی شده است. یک دوربین دیگر در بالای کانال تعبیه شده تا از نحوه پخش عرضی جریان چگال فیلم برداری کند. چگالی شماره حاوی ذرات قبل از ورود به دریچه با نمونه گیری از آن توسط هیدرومتر با دقت ۰/۵ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شده است. در نتیجه در طول حرکت شماره چگال غلظت موضعی اندازه گیری نشده است.

در این آزمایشها از سه غلظت، سه دبی و سه شیب متفاوت استفاده شده و اثر آنها بر ارتفاع، سرعت جریان چگال و ارتفاع رسوب بررسی شده است. جدول ۱ نشان دهنده شرایط آزمایش است. اعداد ریچاردسون ورودی (Ri_{in}) و رینولدز ورودی (Re_{in}) به صورت زیر تعریف می شود (Bradford, Katopodes, 1997):

$$Ri_{in} = \frac{g'_{in} h_o \cos \theta}{u_m^2} \quad (1)$$

$$Re_{in} = \frac{u_m h_o}{\nu} \quad (2)$$

برای اندازه گیری دبی جریان از دبی سنج اولتراسونیک ساخت شرکت Greyline مدل DFM با دقت ۰/۰۱ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. این دبی سنج برای اندازه گیری دبی از پدیده داپلر در امواج استفاده می کند. جهت اندازه گیری پروفیل سرعت از سرعت سنج آکوستیک ADV، ساخت شرکت Nortek با دقت ۰/۰۱ mm/s استفاده می شود. این سرعت سنج نیز از پدیده داپلر برای اندازه گیری استفاده می کند. دو حسگر دستگاه ADV به فاصله یک متر بر روی ارابه ریل دار واقع بر روی کانال سوار شده و می توانند در هر ارتفاعی مؤلفه های سرعت لحظه ای را در نقطه مورد نظر اندازه گیری کنند. لذا، با تغییر مکان عمودی حسگرها می توان پروفیل های سرعت هر مقطع معینی را به دست آورد. وجود ذرات معلق در جریان برای کارکرد خوب دستگاه، ضروری است. این ذرات می توانند رسوب، حبابهای هوا و ارگانیسرها باشند. اگر غلظت ذرات در حدود ۵۰ gr/lit یا بیشتر باشد، دستگاه نمی تواند کار کند زیرا سیگنالهای ارسالی مستهلک می شود. یکی از مزیت های ADV تعیین موقعیت نسبی حسگر نسبت به کف کانال و مزیت دیگر آن عدم تداخل و برهم زدن جریان در هنگام سرعت سنجی است، زیرا این دستگاه، سرعت جریان را ۵ cm/s پایین تر از نوک حسگر اندازه گیری می کند. برای اندازه گیری پخش طولی و عرضی جریان و نیز مشاهده

h_0 ارتفاع و u_{in} سرعت جریان ورودی، ν لزجت سینماتیک و θ شیب کف است.

ρ_w چگالی ورودی و ρ_w چگالی آب صاف است. با توجه به اینکه غلظت‌های مورد استفاده در این آزمایشها کم است، لذا از تاثیر آن بر لزجت مخلوط آب و ذرات کائولن صرفنظر شده و بنا بر این لزجت جریان چگال برابر با

$$g' = g(\rho_{in} - \rho_w) / \rho_w$$

که g شتاب ثقل، ρ_{in} چگالی ورودی و ρ_w چگالی آب صاف است. با توجه به اینکه غلظت‌های مورد استفاده در این آزمایشها کم است،

لذا از تاثیر آن بر لزجت مخلوط آب و ذرات کائولن صرفنظر شده و بنا بر این لزجت جریان چگال برابر با

لزجت آب در نظر گرفته شده است (Garcia, 1999). جدول ۱ نشان می‌دهد که محدوده عدد رینولدز ورودی در آزمایشات از ۳۶۰ تا ۳۰۲۰ را پوشش داده است. همچنین اعداد ریچاردسون ورودی محدوده‌ای بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۶ را پوشش می‌دهد. انتخاب این محدوده وسیع به این دلیل است که بتوان اثر عوامل مختلف را در جریان بررسی کرد.

جدول ۱ مشخصات آزمایشها

RUN	S	C _{in}	Q _{in} (lit/min)	Re _{in}	Ri _{in}	T(°C)
۱	٪۳	٪۰/۵	۱۰	۱۵۳۲/۳۲۴	۰/۰۲۶۲	۱۷
۲	٪۳	٪۰/۵	۱۵	۲۲۹۷/۹۱۲	۰/۰۱۱۷۶	۱۷
۳	٪۳	٪۰/۵	۱۰	۱۵۳۲/۳۲۴	۰/۰۲۶۲	۱۷
۴	٪۳	٪۱	۲/۴	۳۶۶/۷۰۰	۰/۵۷۸۲	۱۷
۵	٪۳	٪۱	۱۵	۲۲۶۹/۹۴۰	۰/۰۱۴۷	۱۶/۵
۶	٪۳	٪۱	۱۰	۱۵۷۱/۰۴۴	۰/۰۳۳۱	۱۸
۷	٪۳	٪۱	۵	۷۸۴/۹۳۳	۰/۱۳۲۶	۱۸
۸	٪۳	٪۱	۶	۹۲۹/۹۳۴	۰/۰۹۲۱	۱۷/۵
۹	٪۳	٪۰/۵	۵	۷۶۵/۵۸۷	۰/۱۰۵	۱۷
۱۰	٪۳	٪۱/۵	۲۰	۲۹۹۰/۹۳	۰/۰۱۰۰	۱۶
۱۱	٪۳	٪۱/۵	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۷۷	۱۶
۱۲	٪۳	٪۱/۵	۱۰	۱۴۵۰/۶۵۷	۰/۰۴۰۶	۱۵
۱۳	٪۳	٪۱/۵	۲۰	۲۷۵۹/۱۴۸	۰/۰۰۹۹	۱۳
۱۴	٪۲	٪۰/۵	۱۰	۱۴۵۰/۶۵۷	۰/۰۲۶۶	۱۵
۱۵	٪۲	٪۰/۵	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۱۶۵	۱۶
۱۶	٪۲	٪۰/۵	۲۰	۲۹۹۰/۹۳۵	۰/۰۰۶۵	۱۶
۱۷	٪۲	٪۱	۱۰	۱۵۲۰/۸۲۹	۰/۰۳۳۶	۱۷
۱۸	٪۲	٪۱	۱۵	۲۱۹۱/۸۸۵	۰/۰۱۴۷	۱۵
۱۹	٪۲	٪۱	۲۰	۲۹۲۳/۲۴۵	۰/۰۰۸۲	۱۵
۲۰	٪۲	٪۱	۱۵	۲۲۶۹/۹۴۰	۰/۰۱۴۷	۱۶/۵
۲۱	٪۲	٪۱/۵	۱۰	۱۵۰۲/۳۱۶	۰/۰۴۰۶	۱۶/۵
۲۲	٪۲	٪۱/۵	۱۵	۲۲۶۹/۹۴۰	۰/۰۱۷۷	۱۶/۵
۲۳	٪۲	٪۱/۵	۲۰	۳۰۲۷/۳۴۳	۰/۰۱۰۰	۱۶/۵
۲۴	٪۱	٪۰/۵	۱۰	۱۴۸۴/۲۴۸	۰/۰۲۶۵	۱۶
۲۵	٪۱	٪۰/۵	۱۰	۱۴۸۴/۲۴۸	۰/۰۲۶۵	۱۶
۲۶	٪۱	٪۰/۵	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۱۶	۱۶
۲۷	٪۱	٪۱	۱۰	۱۴۷۷/۱۴۲	۰/۰۳۳۵	۱۵/۸
۲۸	٪۱	٪۰/۵	۲۰	۲۸۷۸/۵۵۲	۰/۰۰۶۵۴	۱۴/۵
۲۹	٪۱	٪۰/۵	۲۰	۲۷۹۷/۸۳۳	۰/۰۰۶۵۴	۱۳/۵
۳۰	٪۱	٪۱	۱۵	۲۱۲۷/۶۸۲	۰/۰۱۴۷	۱۴
۳۱	٪۱	٪۱	۲۰	۲۹۹۰/۹۳۵	۰/۰۰۸۲۶	۱۶
۳۲	٪۱	٪۱/۵	۱۰	۱۵۵۹/۲۵۸	۰/۰۴۰۶	۱۸
۳۳	٪۱	٪۱/۵	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۱۷۷	۱۶
۳۴	٪۱	٪۱/۵	۲۰	۳۰۲۷/۳۴۳	۰/۰۱۰۰	۱۶/۵

شیب و غلظت بر ارتفاع بدون بعد جریان چگال نشان داده شده است. دیده می شود که با افزایش دبی، ارتفاع جریان چگال در تمام شیبها و غلظتها افزایش می یابد. همچنین این ارتفاع در جهت جریان کاهش می یابد و در انتهای کانال تغییرات آن بسیار کم شده و تقریباً ثابت می ماند. در همه موارد حداکثر ارتفاع جریان چگال در حوالی ابتدای کانال دیده می شود که می توان گفت ناشی از تغییر رژیم جریان است. می توان تغییرات ارتفاع جریان را به درون آمیختگی ربط داد. درون آمیختگی (entrainment) میزان آب صافی است که به دلیل وجود برش در فصل مشترک، به درون جریان چگال کشیده می شود. ذکر این نکته لازم است که میزان درون آمیختگی در فصل مشترک، به پایداری فصل مشترک بستگی دارد. هر چه فصل مشترک پایدارتر باشد درون آمیختگی و شدت آشفته گی جریان کمتر است. میزان پایداری در فصل مشترک نیز تابعی از تنش برشی و گرادیان فشار هیدرواستاتیکی عمود بر فصل مشترک است. به این معنی که هر چه تنش برشی بیشتر باشد، میزان پایداری کمتر است و هر چه گرادیان فشار هیدرواستاتیکی بیشتر باشد موجب انسجام بیشتر در فصل مشترک می شود، و لذا پایداری بیشتر است.

همچنانکه در جدول دیده می شود، درجه حرارت آب نیز ارائه شده تا بتوان اثر آن را در محاسبه لزجت سینماتیک وارد کرد. در این جدول S شیب کف کانال است و C_{in} غلظت وزنی مخلوط در ورودی است که به صورت زیر تعریف می شود:

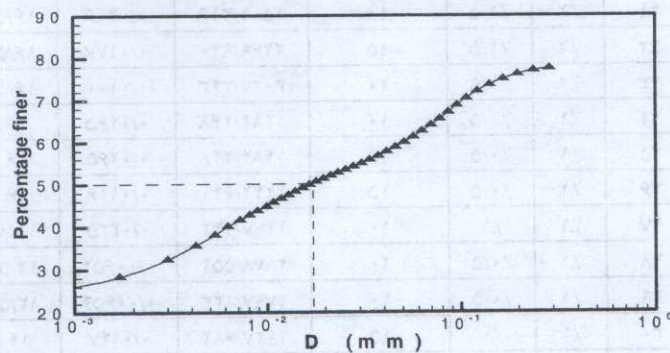
$$C_{in} = \frac{w_k}{w_w + w_k} \times 100 \quad (3)$$

w_k و w_w به ترتیب وزن آب و کائولن مخلوط شده هستند. شکل ۳ منحنی دانه بندی ذرات کائولن را نشان می دهد. در تهیه این ذرات دقت شده تا درصد ناخالصیها به حداقل برسد. چنانکه در شکل ۳ دیده می شود D_{50} ذرات حدود ۱۱ میکرون است. این محدوده ذرات رس را به خوبی پوشش می دهد.

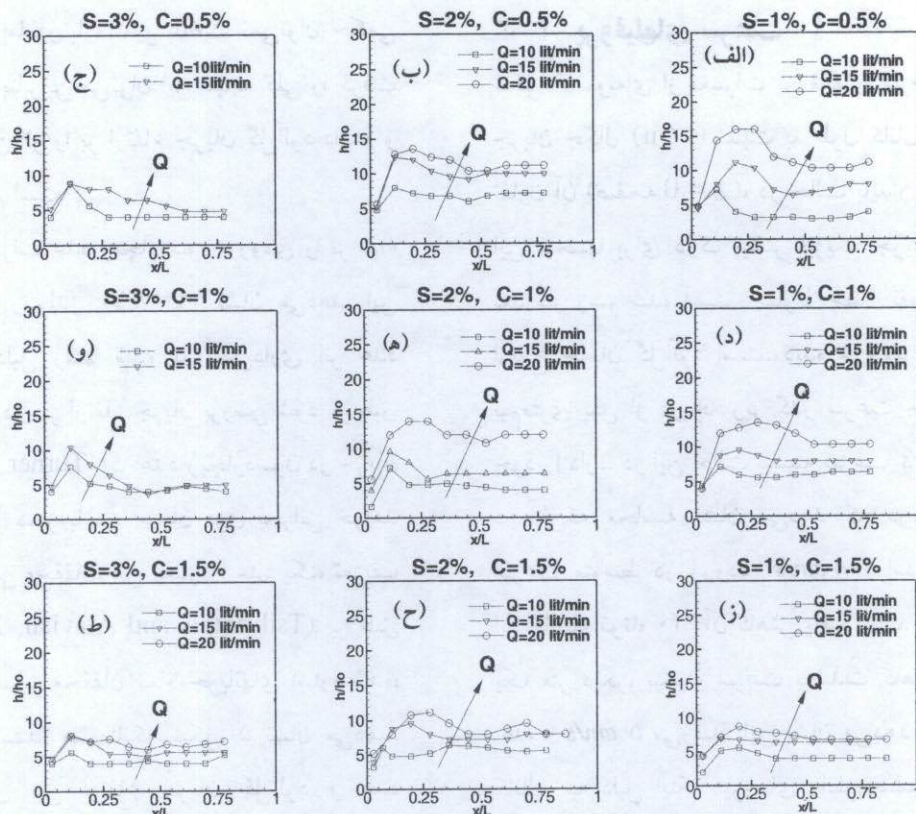
۳- نتایج حاصل از آزمایشها

۳-۱- ارتفاع بدنه جریان

در شکل ۴ ارتفاع جریان چگال برحسب ارتفاع دریچه زیر گذر، h_0 ، و موقعیت جریان چگال از ورودی، x ، برحسب طول کانال ($L=12m$) بدون بعد شده است. ارتفاع از دیوار شیشه ای کانال اندازه گیری شده و فرض می شود که ارتفاع جریان چگال در تمام عرض کانال یکسان است. در نمودارهای ۴- الف تا ۴- ط اثر دبی،



شکل ۳ منحنی دانه بندی ذرات کائولن مورد آزمایش



شکل ۴ ارتفاع جریان گل آلود در طول کانال و نسبت به تغییرات دبی، شیب و غلظت.

با وجود این همانطور که از شکل ۴ بر می آید، برای هر دبی خاص ارتفاع جریان چگال به سمت یک مقدار ثابت میل می کند. در واقع جریان چگالی در اصطلاح به حالت تثبیت شده^۱ می رسد. این امر چندان دور از واقع به نظر نمی رسد، زیرا تمام آزمایشهای انجام شده در شکل ۴ در شیبهای ملایم انجام شده است.

در هر ردیف از نمودارهای شکل ۴، اگر از راست به چپ حرکت کنیم اثر تغییرات شیب بر ارتفاع جریان مشاهده می شود. هم چنانکه دیده می شود، با افزایش شیب، ارتفاع جریان چگال کاهش می یابد. با توجه به اینکه افزایش شیب، نیروی رانش را در جهت جریان اضافه می کند، بنابراین، جریان شتاب گرفته و سرعت آن بیشتر می شود و به تبع آن، ارتفاع جریان کاهش پیدا می کند. اما هم چنانکه از شکلهای سمت چپ دیده می شود، با تغییر شیب به سه درصد، اثر تغییرات غلظت به طور محسوسی کاهش می -

یابد.

با بررسی شکلها از بالا به پایین، اثر افزایش غلظت دیده می شود. اگر چه به نظر می رسد که با افزایش غلظت ارتفاع کمتر می شود، اما نتیجه گیری کلی امکانپذیر نیست. مقایسه شکلها که با اندازه محورهای یکسان رسم شده نشان می دهد که اثر غلظت در محدوده ۱/۵٪ به طور محسوسی از ارتفاع جریان چگال می کاهد، اما در عوض، اثر دبی را - که تغییرات آن همه جا به صورت مستقیم بر ارتفاع دیده می شود - را تعدیل کرده و کاهش می دهد. همچنین نمی توان گفت که افزایش غلظت در هر حالی به افزایش ارتفاع بدنه منجر می شود. با حرکت از شکلهای بالا به پایین به نظر می رسد که غلظت، فقط در صورتی می تواند به کاهش ارتفاع جریان منجر شود که از حد معینی بالاتر باشد.

به هر حال از شکلهای بالا چنین نتیجه می شود که تأثیر دبی مشخص بوده و با افزایش دبی ارتفاع جریان چگال

1. Established-Flow

۳-۲- پروفیل‌های سرعت

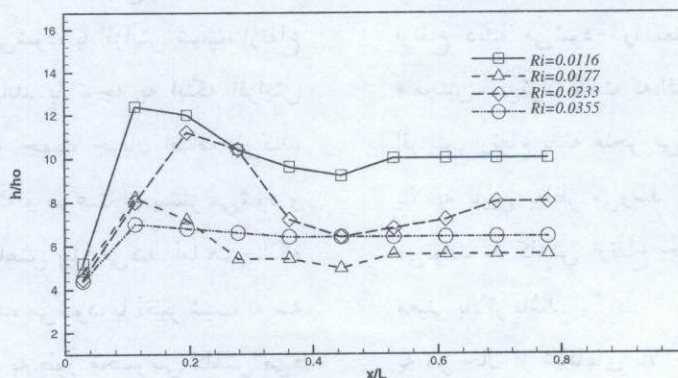
شکل ۶ نمونه‌ای از تغییرات پروفیل‌های سرعت در جهت جریان چگال (u) را نسبت به طول کانال و در صفحه تقارن آن (صفحه $Z=0$)، در حالت پایدار نشان می‌دهد. این منحنیها برای درک بیشتر فیزیک جریان به صورت بعد دار رسم شده است. خطوط خط- نقطه نشان‌دهنده ارتفاع جریان گل آلود است. دیده می‌شود که در فاصله نیم‌متری پس از دریچه زیر گذر سرعت حد اکثر مقدار خود را دارد. در این حالت بیشینه سرعت 16 cm/s است، درحالی‌که محاسبه نشان می‌دهد که در این آزمایش سرعت متوسط در ورودی $26/6 \text{ cm/s}$ است که پس از این فاصله کوتاه 40% آن کاهش یافته است. اما پس از طی یک متر دیگر، بیشینه سرعت به شدت کاهش یافته و به حدود 5 cm/s می‌رسد. این نشان می‌دهد که در ابتدای کانال- به دلیل اینکه نیروهای رانش بیشتری به جریان وارد می‌شود- جریان چگال، شتاب و سرعت بیشتری می‌گیرد.

با دور شدن هرچه بیشتر از ورودی و عریض شدن جریان چگال، به دلیل استهلاک نیروی اینرسی در تقابل با لزجت و درون آمیختگی به دلیل برش شدید از سرعت بیشینه کاسته می‌شود. در نتیجه، به غیر از منطقه ورودی، در بقیه نقاط کانال نیروهای موثر رانش، نیروی مولفه وزن ظاهری جریان چگال در جهت جریان (جهت x) خواهد بود.

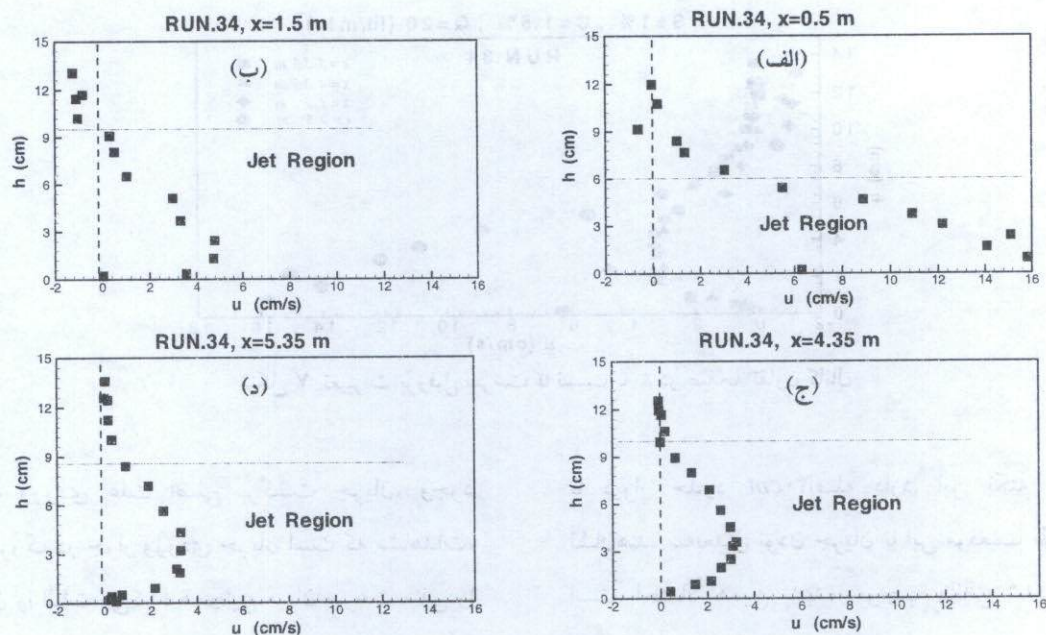
افزایش می‌یابد. اما در باره تاثیر غلظت نمی‌توان حکمی کلی صادر کرد. بنابراین می‌توان این نتیجه کلی را گرفت که دبی، بارزترین اثر را بر ارتفاع جریان گل آلود داشته و اثر آن نیز مستقیم است.

شکل ۵، اثر تغییرات عدد ریچاردسون ورودی را بر بدنه جریان در عدد رینولدز $2242/640$ نشان می‌دهد. این شکل به این دلیل رسم شده تا معنی‌داری اثر عدد ریچاردسون ورودی بر ارتفاع جریان بررسی شود. بر طبق پیشنهاد (Turner, 1973) اگر عدد ریچاردسون در جریان گل آلود از $0/25$ کمتر باشد، جریان فوق بحرانی خواهد بود، اگرچه بعضی محققان، این معیار را عدد یک، تعریف کرده اند (Tsihrintzis and Alavian, 1996). بر طبق تعریف ترنر و سایر محققان تمام جریانهای اشاره شده، فوق بحرانی هستند. هم‌چنانکه شکل ۵ نشان می‌دهد، رابطه معنی‌داری بین ارتفاع جریان گل آلود و عدد ریچاردسون ورودی دیده نمی‌شود.

این نمودار نکته دیگری را نیز آشکار می‌سازد و آن اینکه در تمام طول جریان، نمی‌توان عدد بدون بعد واحدی را بر جریان گل آلود حاکم دانست. اگرچه به دلیل عدم دسترسی به غلظتهای موضعی، امکان محاسبه عدد ریچاردسون موضعی میسر نشد، اما شاید بتوان منحنی فوق را چنین تعبیر کرد که به دلیل تغییر توازن نیروها در طی جریان از ورودی به خروجی، در هر قسمت نیروهای حاکم متفاوت است.



شکل ۵ اثر عدد ریچاردسون ورودی بر ارتفاع بدنه جریان



شکل ۶ تغییرات پروفیل‌های سرعت u نسبت به طول کانال و در صفحه تقارن آن

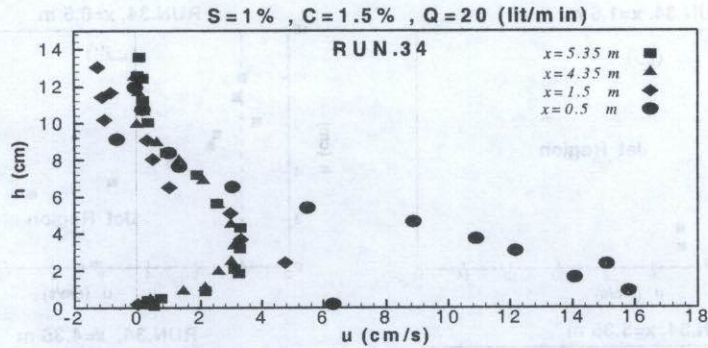
می‌دهد که در فواصل نزدیک به دریچه زیر گذر، علاوه بر بالا بودن سرعت بیشینه، مقدار سرعت منفی نیز زیاد است. جریان چگال در ورود به کانال به دلیل حرکت در زیر آب صاف، لایه برشی^۱ قوی در فصل مشترک ایجاد می‌کند. این لایه برشی موجب به درون کشیدن میزان زیادی از آب صاف بالای شاره چگال به داخل آن می‌شود. علاوه بر آن در ورود و در بالای دریچه زیر گذر، گرداب ایجاد می‌شود. وجود سرعت منفی در مولفه سرعت در جهت جریان (u) بیانگر حضور این گرداب است. همچنین با فاصله گرفتن از ورودی، محل سرعت بیشینه و متوسط به سمت بالاتر از جدار جابه‌جا شده و درون آمیختگی ناچیز می‌شود یا ثابت باقی می‌ماند.

از شکل ۷ همچنین مشاهده می‌شود که هر چه از ورودی دورتر شویم، میزان سرعت منفی یا جریان برگشتی کمتر می‌شود.

شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد که در $x = 0.5 m$ ارتفاع جریان گل‌آلود $6/1 cm$ است، در حالی که پروفیل سرعت تا ارتفاع $10/5 cm = \gamma$ کشیده شده است و این نشان از برش شدید در فصل مشترک این ناحیه دارد. این برش به درون آمیختگی در پایین دست منجر خواهد شد. به دلیل وجود برش در فصل مشترک جریان چگال و آب صاف-که ناشی از اختلاف چگالی و غلظت دو لایه است- ناپایداری در فصل مشترک زیاد شده و آب صاف به درون جریان چگال کشیده خواهد شد. هرچه سرعت جریان چگال بیشتر باشد، شدت درون آمیختگی بیشتر خواهد شد. هم‌چنانکه از شکل (۶-ب) دیده می‌شود، در $x = 1/5 m$ ارتفاع جریان گل‌آلود $9/5$ سانتیمتر بوده و پروفیل سرعت نیز تا ارتفاع بیش از 15 سانتیمتر کشیده شده است. افزایش ارتفاع جریان چگال همچنان ادامه دارد، در حالی که پروفیل سرعت به حالت تثبیت شده نزدیک می‌شود. اما در فواصل اندازه‌گیری شده بعدی، ارتفاع بدنه جریان کاهش یافته و به مقدار تثبیت شده رسیده و پروفیل سرعت نیز تغییراتی را نشان نمی‌دهد.

در شکل ۷ همه این منحنیها یکجا رسم شده و نشان

1. Shear layer



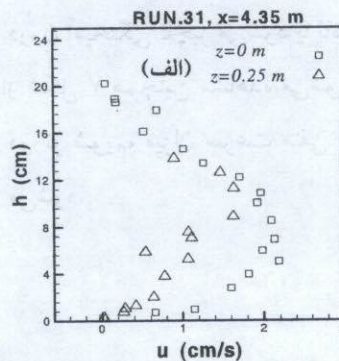
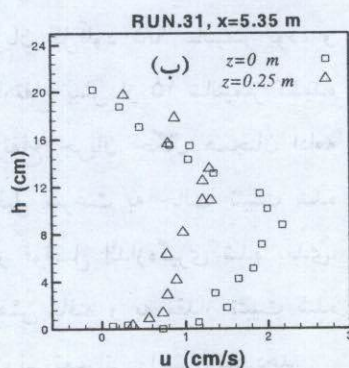
شکل ۷ تغییرات پروفیل سرعت u نسبت به x در صفحه تقارن کانال

تا دیوار حدود 40 cm اصله دارد. این نکته همچنین نشان‌دهنده سه‌بعدی بودن جریان تا این موقعیت طولی (x) است. احتمالاً همین پدیده، موجب کانالی شدن جریان می‌شود.

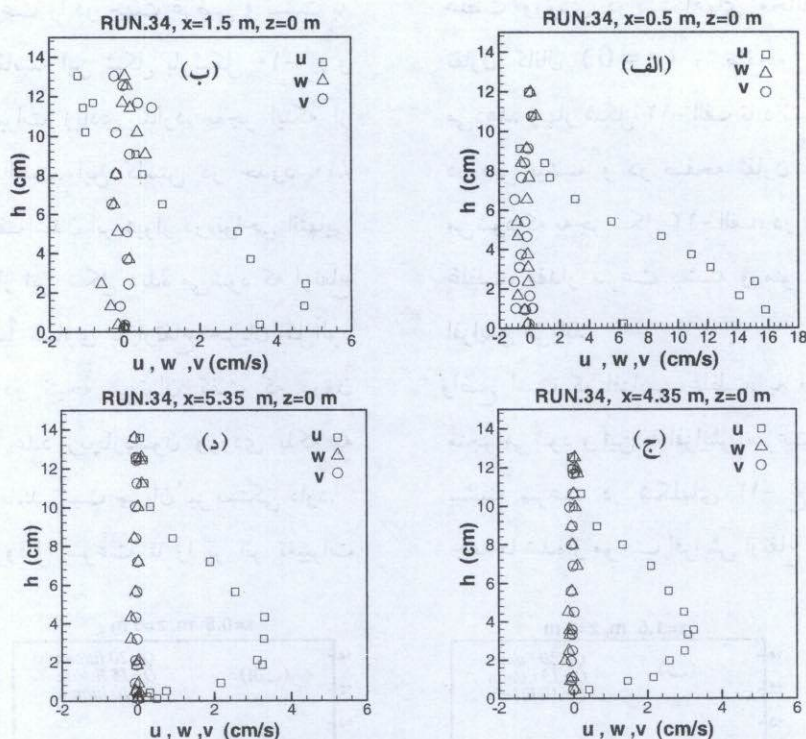
شکل ۹ تغییرات هر سه مولفه پروفیل سرعت u ، v و w را به ترتیب در جهتهای x ، y و z مقایسه می‌کند. مولفه‌های سرعت v و w در صفحه مرکزی، به جز مقطع $x = 0.5\text{ m}$ و $x = 1.5\text{ m}$ که احتمالاً ناشی از اغتشاشات ناشی از پرش هیدرولیکی است، در سایر نقاط، برابر صفر است. می‌توان گفت که به دلیل تقارن پروفیل‌های سرعت در تمام مقاطع و در صفحه تقارن کانال ($z = 0$)، $w = 0$ است. اگرچه انتظار می‌رود در سایر مقاطع در امتداد عرضی به دلیل درون آمیختگی در فصل مشترک جانبی سرعت عرضی، w ، وجود داشته باشد.

در ناحیه ورودی علت اصلی برگشت جریان، وجود گرداب بزرگ در جوار ورودی جریان است که مشاهدات، وجود آن را اثبات می‌کند؛ همچنین میزان سرعت منفی را می‌توان به پرش هیدرولیکی داخلی مربوط کرد.

شکل ۸ تغییرات پروفیل سرعت u نسبت به عرض کانال (z) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در مقطع $z = 0.25\text{ m}$ پروفیل سرعت کاسته می‌شود و مقدار سرعت بیشینه و متوسط به سمت بالا جابه‌جا می‌شود. همچنین با توجه به کم شدن شیب منحنی در نزدیکی بستر، مقدار تنش برشی در جوار بستر و در نتیجه قابلیت حمل رسوب کاهش می‌یابد. همچنین در مقطع $z = 0.25\text{ m}$ شکل پروفیل سرعت از حالت سهموی خارج می‌شود. با توجه به اینکه نصف عرض کانال 63 cm است، مشاهده شکل پروفیل سرعت در مقطع نشان داده شده، نشان از اثر جدی دیوار در این نقطه دارد. این نقطه



شکل ۸ تغییرات پروفیل سرعت u نسبت به عرض (z) و طول کانال (x).



شکل ۹ تغییرات مولفه‌های سرعت در صفحه تقارن کانال ($z = 0$) و در ایستگاههای متفاوت

می‌توان افزایش تنش برشی بستر و افزایش ارتفاع بدنه جریان چگالی دانست. در $x = 0.5$ m (شکل ۱۰-ا) هنوز سرعت منفی زیاد نشده است، در حالی که در شکل ۱۰-ب الف سرعت منفی بیشتر شده است. این حاکی از آن است که عمده درون آمیختگی در این ناحیه انجام می‌شود. از شکلهای ۱۰-ج و ۱۰-د دیده می‌شود که سرعت منفی در همه دبیها برابر صفر بوده و بنابراین تثبیت جریان در این مکانها قطعی است.

از شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب همچنین دیده می‌شود که با افزایش دبی، شدت درون آمیختگی بیشتر می‌شود و اثر برش در ارتفاعهای بالاتری دیده می‌شود.

با دقت بیشتر در شکل ۱۰-الف دیده می‌شود که سرعت بیشینه با افزایش دبی افزایش می‌یابد، اما سطوح زیر منحنیها متناسب با افزایش دبی نیست و انتگرال این سطوح نشان می‌دهد که درون آمیختگی به صورت توانی با دبی رابطه دارد که می‌تواند ناشی از افزایش برش در فصل مشترک باشد.

همچنین از شکل ۹-ب دیده می‌شود که افزایش درون آمیختگی در فصل مشترک، موجب ایجاد نوسانات شدید در سایر جهتها نیز می‌شود. از ایستگاه $x = 4.35$ m به بعد به دلیل ناچیز بودن درون آمیختگی، سرعت عمودی (v) نیز برابر صفر است.

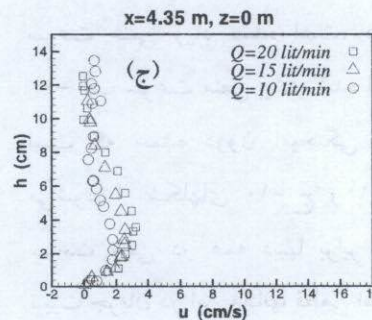
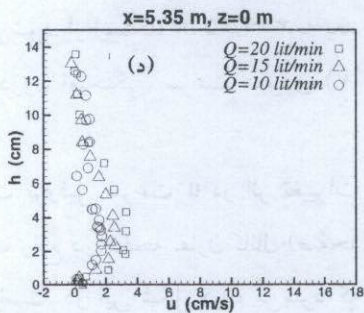
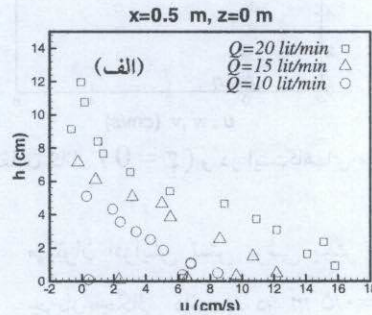
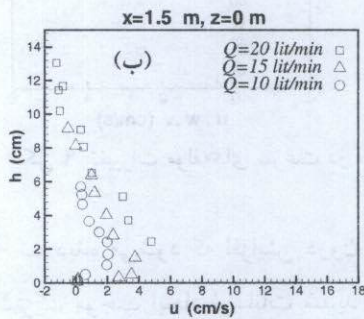
در شکل ۱۰ تغییرات پروفیل سرعت u در اثر تغییرات دبی در x های مختلف واقع در صفحه تقارن کانال (صفحه $z = 0$) ارائه شده است. در این شکل دیده می‌شود که در تمامی مقاطع، با افزایش دبی، به مقدار سرعت بیشینه و سرعت متوسط افزوده می‌شود. زیرا با افزایش دبی، نیروهای رانش (نیروی اینرسی حاصل از جریان ورودی و نیروی مولفه وزن ظاهری جریان چگال در جهت جریان) افزایش می‌یابد. شیب منحنی در نزدیک بستر با افزایش دبی افزایش پیدا می‌کند، بنابراین به مقدار تنش برشی در جوار بستر افزوده می‌شود.

با افزایش دبی، موقعیت سرعت بیشینه و متوسط به سمت بالا (y های مثبت) جابه‌جا می‌شود، دلیل این پدیده را

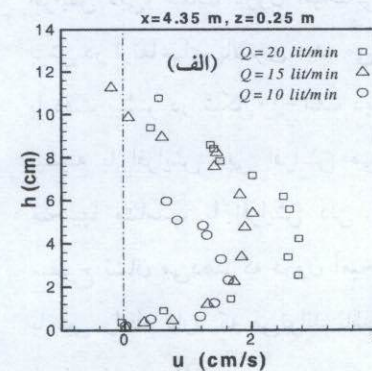
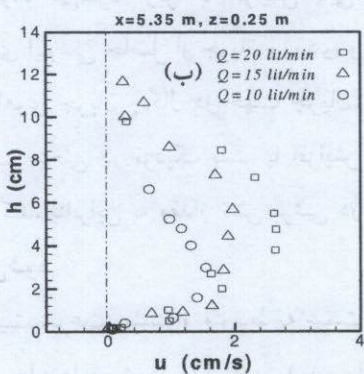
غلظت ورودی در ایستگاههای مختلف واقع در صفحه تقارن کانال ($z=0$) و صفحه $z=0.25$ m نشان می‌دهد. چهار شکل ۱۲- الف تا د نشان‌دهنده تاثیر غلظت در دبی بیشینه و در صفحه تقارن کانال است. مشاهده می‌شود که به جز شکل ۱۲- الف، در بقیه شکلها با افزایش غلظت، مقدار سرعت بیشینه و متوسط در تمامی مقاطع افزایش می‌یابد.

واضح است که افزایش غلظت، به افزایش نیروی رانش منجر می‌شود و این به افزایش سرعت می‌انجامد. همچنین بیشینه سرعت در شکلهای ۱۲- ج و د به سمت بالا جابه‌جا شده و موجب افزایش ارتفاع جریان می‌شود.

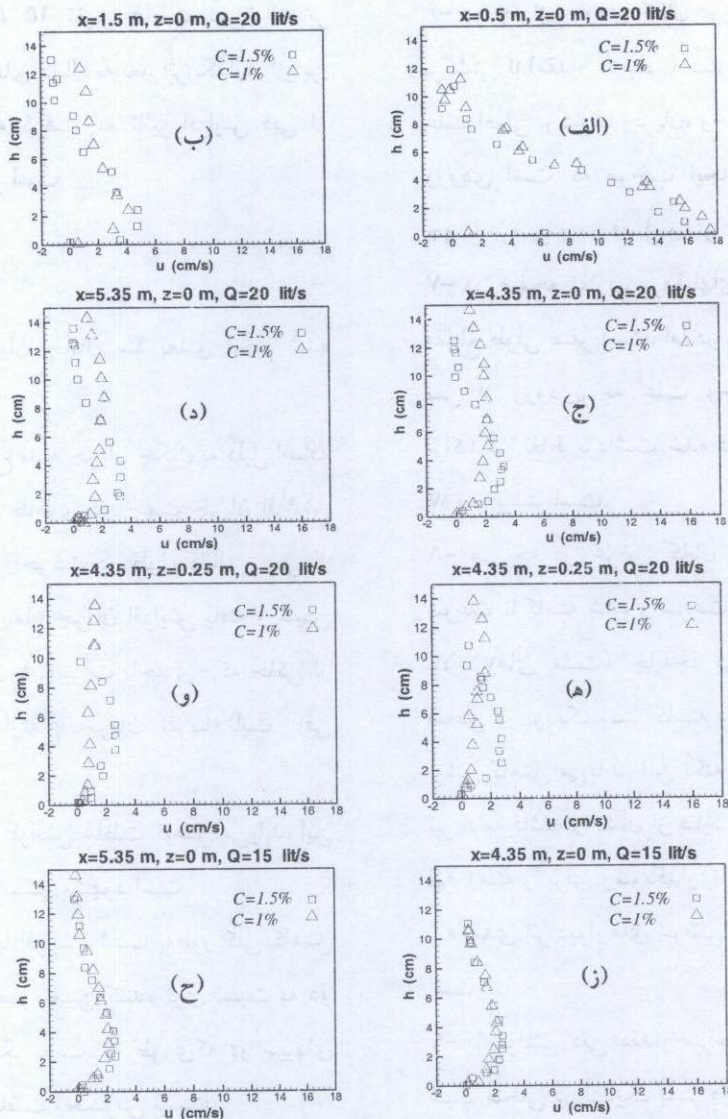
شکل ۱۱ تغییرات سرعت را در جهت عرضی و نسبت به دبی نشان می‌دهد. مقایسه این شکل با شکل ۱۰- ج و ۱۰- د نشان از تغییرات زیادی ندارد. به جز اینکه از بیشینه‌ها کاسته شده است. این کاستن در حدود ۱۰٪ است و نشان از ضعیف شدن اثر دیوار در نواحی انتهایی کانال دارد. همچنین از این شکل دیده می‌شود که ارتفاع پروفیل سرعت، تقریباً مساوی با ارتفاع جریان گل‌آلود است (شکل ۴) و در نتیجه می‌توان گفت که درون آمیختگی نه فقط به عدد ریچاردسون ورودی بلکه به حوادث درون کانال، مانند تثبیت جریان نیز بستگی دارد. شکل ۱۲ تغییرات پروفیل سرعت u را بر اثر تغییرات



شکل ۱۰ تغییرات پروفیل سرعت u بر اثر تغییرات دبی - $S=1\%$, $C=1.5\%$



شکل ۱۱ اثر تغییرات دبی بر پروفیل سرعت u در مقطع عرضی - $S=1\%$, $C=1.5\%$



شکل ۱۲ تغییرات پروفیل سرعت u در اثر تغییرات غلظت ورودی ($S=1\%$)

افزایش غلظت در همه شکلهای به افزایش سرعت جریان منجر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با حرکت از خط تقارن کانال به سمت جدار از سرعت بیشینه کاسته شده و شیب آن نیز کم می‌شود. حرکت به سمت پایین‌دست نیز این پدیده را شدت می‌بخشد و لذا هم-چنانکه ذکر شد، دیوارهای عرضی، اثر قابل توجهی بر رسوبگذاری دارد. مقایسه شکلهای ۱۲-ج، ز و ۱۲-د، ح اثرات توأم غلظت و دبی را بر پروفیل سرعت در صفحه تقارن کانال نشان می‌دهد. از این دو مقایسه دیده می‌شود که زمانی غلظت اثر خود را آشکار می‌سازد که دبی کافی

بررسی منحنی ارتفاع جریان در این دو غلظت نشان می‌دهد که افزایش غلظت در این شرایط به درون آمیختگی شدیدتری منجر می‌شود. همچنین کاهش غلظت، به افزایش ۴۰٪ ارتفاع جریان می‌انجامد. مقایسه شکلهای ۱۲-ج و د با نتایج ارتفاع جریان همچنین نشان می‌دهد که پروفیل سرعت تا ارتفاع بسیار بالاتری کشیده می‌شود و علاوه بر آن شیب سرعت را کاهش داده و زمینه را برای رسوبگذاری بیشتر آماده می‌کند. مقایسه شکلهای ۱۲-ج، د، ه و ۱۲-و اثر تغییر غلظت را در پروفیل سرعت و در عرض جریان گل‌آلود نشان می‌دهد.

۶- هر چه از ورودی کانال دورتر می‌شویم، میزان جریان برگشتی II (مقدار II منفی) کمتر می‌شود. در ناحیه ورودی علت اصلی برگشت جریان، وجود گرداب بزرگ در جوار ورودی است که موجب ایجاد درون آمیختگی در دو جهت عرضی و در فصل مشترک می‌شود.

۷- در صفحه تقارن، پروفیل‌های سرعت W ، V در بیشتر مقاطع طولی صفر است، اما در منطقه ابتدایی کانال و کمی پس از ورودی، به علت وجود اغتشاش در جریان، پراکندگی نقاط برداشت شده در مورد پروفیل‌های سرعت W و V بیشتر است.

۸- هر چه در عرض کانال پیش می‌رویم از حداکثر سرعت II کاسته شده و سرعت بیشینه و متوسط به سمت بالا (Yهای مثبت) جابه‌جا می‌شود. همچنین از شیب منحنی در نزدیک بستر کاسته می‌شود. بنابراین مقدار تنش برشی کاهش می‌یابد. این نکته حتی پس از تثبیت جریان نیز ادامه داشته و نشان از ساختار سه بعدی جریان دارد و این زمینه را برای رسوبگذاری آماده می‌کند. لذا در جریان سه بعدی اثر دیوارهای عرضی در رسوبگذاری بسیار زیاد است.

۹- با افزایش دبی مقدار سرعت بیشینه و متوسط و نیز شیب منحنی در نزدیک بستر در هر مقطع افزایش می‌یابد.
۱۰- با افزایش غلظت در دبیهای بالا، سرعت بیشینه و متوسط در تمام مقاطع غیر از منطقه ورودی افزایش می‌یابد. افزایش غلظت در دبی پایین اثری بر پروفیل سرعت ندارد.

۵- تشکر و قدرانی

بدین وسیله از کارکنان سخت‌کوش مؤسسه آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف به‌ویژه از آقای مهندس حکیم جوادی- که در ساخت بخشی از قطعات دستگاه آزمایش همکاری صمیمانه داشتند- و همچنین از قطب تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه شریف که امکان انجام آزمایشها را فراهم نموده، تشکر می‌نمایم.

باشد. در دبی 15 lit/min تغییر غلظت نمی‌تواند بر پروفیل سرعت در نیمه‌های کانال به بعد اثر بگذارد. از این شکل نیز می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر افزایش دبی از سایر متغیرها چشمگیرتر است.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایشهایی که در جریان چگال سه بعدی انجام شده نشان می‌دهد که:

۱- با افزایش دبی، ارتفاع بدنه جریان چگال به دلیل اضافه شدن مولفه نیروی وزن ظاهری در جهت جریان افزایش می‌یابد. در دبی ثابت، با حرکت در طول کانال و پس از دریچه زیر گذر، ابتدا ارتفاع جریان افزایش یافته و سپس کم می‌شود و پس از آن با تغییرات ناچیزی- که حاکی از تثبیت جریان است- ارتفاع جریان تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

۲- ارتفاع بدنه جریان با افزایش غلظت کاهش می‌یابد، این کاهش در غلظتهای بالا بیشتر مشهود است.

۳- ارتفاع بدنه جریان با افزایش شیب به‌طور کلی کاهش می‌یابد و شیب بالا، عنصر تعیین کننده تری نسبت به دو پارامتر ارزیابی شده دیگر است. به طوری که در شیبهای بالا اثر افزایش دبی و غلظت محسوس نیست.

۴- نوساناتی نسبت به زمان در فصل مشترک بدنه جریان چگال و آب صاف مشاهده می‌شود که دامنه آن در نزدیکی ورودی بیشتر است. شاید بتوان علت این پدیده را در تنش برشی ایجاد شده در فصل مشترک بین آب تمیز ساکن و جریان چگال جستجو کرد.

۵- هر چه از ورودی کانال دورتر می‌شویم، از سرعت بیشینه و متوسط کاسته می‌شود. علت این پدیده را می‌توان استهلاك نیروهای اینرسی در اثر لزجت دانست. همچنین سرعت بیشینه و متوسط به سمت بالا (Yهای مثبت) جابه‌جا می‌شود. دلیل این پدیده را نیز می‌توان در وجود تنش برشی بیشینه در بستر و کاهش نیروهای رانش جریان چگالی جستجو کرد.

[4] Bonnetcaze, R. T., Huppert, H.E., Lister, J. R.(1993). "Particle Driven Gravity Currents," J. of Fluid Mechanics, 250, 339-369.

[5] Bradford, S.F., Katopodes, N.D. (1999). "Hydrodynamics of Turbid Underflows, I: Formulation and Numerical Analysis", J. of Hydraulic Engng., ASCE, 125(10), 1006-1015.

[6] Cesare, G. D., Schleiss, A., Hermann, F. (2001). "Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation" J. of Hydraulic Engng., 127(1), 6-16.

[7] Fan, J.; Morris, G. (1992). "Reservoir Sedimentation .II: Reservoir Desiltation and Long Term Storage Capacity", J. of Hydraulic Engng., ASCE, 118(3), 370-384.

[8] Firoozabadi, B., Farhanieh, B., Rad, M. (2003). "Hydrodynamics of 2-D Laminar Turbidity Current", Journal of Hydraulic Research, 41(6), 623-630.

[9] Fukushima, Y., Hayakawa, N. (1995). "Dynamics of Three Dimensional Inclined Thermals", J. of Hydraulic Engng., ASCE, 121(8), 600-607.

[10] Garcia, M. H. (1994). "Depositional Turbidity Currents Laden with Poorly Sorted Sediment", J. of Hydraulic Engng., ASCE, 120(11), 1240-1263.

[11] Lee, H.Y., Yu, W.S. (1997). "Experimental Study of Reservoir Turbidity Current", J. of Hydraulic Engng., ASCE, 123(6), 520-528.

[12] Lemmin, U., Rolland, T. (1997). "Acoustic Velocity Profiler: Laboratory and Field Studies", J. Hydraulic Engng., ASCE, 123(12), 1089-1098.

[13] Tsihrintzis, V. A., and Alavian, V. (1996). "Spreading of Three- Dimensional Inclined Gravity Plumes", J. of Hydraulic Research, 34(5), 695-711.

[14] Turner, J. S. (1973). *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, London, U.K.

[15] Yu, W.S., Lee, H. Y., and Hsu, M.S. (2000). "Experiments on Deposition Behavior of Fine Sediment in a Reservoir", J. of Hydraulic Engng., 126(12), 912-920.

۶- علائم

C_{in} غلظت وزنی (درصد وزنی کائولن در آب) ورودی

g شتاب گرانش

$g' = g (\rho_{in} - \rho_w) / \rho_w$ شتاب ثقل کاهش یافته

h_0 ارتفاع جریان چگال در ورودی (ارتفاع دریچه ورودی)

Q_{in} دبی حجمی جریان چگال در ورودی

S شیب (درصد)

T درجه حرارت آب

u_{in} سرعت جریان چگال در ورودی

ρ_m جرم ویژه جریان چگال در ورودی

u سرعت جریان چگال در جهت محور x

v سرعت جریان چگال در جهت محور y

w سرعت جریان چگال در جهت محور z

W_k وزن کائولن به کار رفته در تهیه مخلوط

W_w وزن آب به کار رفته در تهیه مخلوط

V لزجت سینماتیکی

θ زاویه شیب کف

ρ_w جرم ویژه آب

۷- منابع

[1] Alavian, V. (1986). "Behavior of Density Currents on an Incline", J. of Hydraulic Engng., ASCE, 112(1), 27-42.

[2] Altinakar, M.S Graf, W.H and Hopfinger, E. J. (1996). "Flow Structure in Turbidity Current", J. of Hydraulic Research, 34(5), 713-718.

[3] Best, J. L., Kirkbride, A. D. and Peakall, J. (2001). "Mean Flow and Turbulence Structure of Sediment-Laden Gravity Current: New Insights Using Ultrasonic Doppler Velocity Profiling", *Spes. Pubs. Int. Ass. Sediment*, 31, 159-174.