Archive of SID

بررسی تجربی ساختار هیدرودینامیکی جریان چگالی سه بعدی

سیدمحمدرضا موسوی حکمتی مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر ری دانشجوی دکترای مکانیک علوم و تحقیقات
بهار فیروزآبادی دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف
منوچهر راد استـــاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در ایـن مقاله تأثیـر عـوامل مختلـف در مشخصـه‌های جـریان چگالی حاوی ذرات به صـــورت سه‌بعـــدی و مغشـــوش بطـور تجـربی مـورد بررســی قرار گرفته است. این عوامل شامل ارتفاع جریان، ارتفاع رسوبگذاری، سرعت پیشروی پیشانی و پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) می‌باشد. آزمایشات در شیب، غلظت و دبی‌های متفاوت انجام شده و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی مقدار ارتفاع بدنه همواره افزایش یافته و با افزایش غلظت و شیب کاهش می‌یابد، مگر در مواقعی که درون کشیدگی بیشتر شود. همچنین به دلیل درون کشیدگی شدید طولی و عرضی در ابتدای کانال ارتفاع بدنه افزایش می‌یابد، اما با پیشروی جریان از ارتفاع کاسته شده و عمدتاً به حالت تثبیت شده می‌رسد. بررسی پروفیل رسوبگذاری نشان می‌دهد که در عمده دبی‌ها، شیب‌ها و غلظت‌ها در امتداد کانال مقدار رسوب کاهش می‌یابد. شکل پروفیل سرعت در جریان حاوی ذرات نشان می‌دهد که به دلیل وجود نیروهای اینرسی در ابتدای کانال، مقدار ماکزیمم و متوسط سرعت در جهت جریان همیشه در ابتدای کانال از انتهای آن بزرگتر است. علاوه بر آن در ابتدای کانال به دلیل کمی اصطکاک، مقدار ماکزیمم از مقدار متوسط سرعت به مراتب زیادتر بوده و به سرعت از مقدار ماکزیمم کاسته می‌شود. با نزدیک شدن به انتهای کانال، به دلیل درون کشیدگی، موقعیت سرعت ماکزیمم در جهت جریان بالاتر از سطح بستر قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: جریان چگالی، جریان حاوی ذرات، رسوبگذاری در مخازن سدها.

Experimental Investigation of Velocity Profiles of Turbulent Turbidity Currents

S.M.R. Moossavi Hekmati Branch of shahr-e-rey, Islamic Azad University
B. Firoozabadi Mechanics Department Sharif University of Technology
M. Rad, Mechanics Department Sharif University of Technology

Abstract

In this investigation, the effect of different parameters has been studied experimentally on behavior specialties of three-dimensional, turbulent and steady inclined turbidity currents. One of the important specialties that show the structure of hydrodynamics of turbidity currents is velocity profile and in this investigation, it has been measured by ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). In all of the experiments, kaolin with specific gravity of 2.65 kg/m^3 was used as suspended materials. The mean particle diameter is D_{50} =20 micron approximately. The experimental results show an increase in the entrance volume flux of turbidity current into the tank of fresh water, is increased always the depth or height of turbidity current and an increase in entrance concentration and slop, is decreased often the height of turbidity current. In addition to, for the reason that intense entrainment in the lateral and the longitudinal directions, along the interface of water and turbidity current is increased height of turbidity current after enter under of fresh water. Investigation of velocity profiles in this turbidity current is showed for the reason that, existing of inertia forces in the beginning of traveling of current into the tank. The rate of maximum and average velocity always is more than the end of tank. While we are traveling to the end of tank, is observed always the location of maximum and average velocity is shifted to up. Increase in volume flux, is increased rate of maximum and average velocity and I Increase in entrance concentration with the exception of the entrance regime, in other regions is increased rate of maximum and average velocity. After coming into under of fresh water, turbidity current spreads and then arrives to the state established flow and the entrainment is at least rate.

Key words: Turbulent Turbidity Current -Velocity Profile, Sedimentation.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

جریان چگالی به علت اختلاف چگالی بین لایه‌های سیال به وجود می آید. این اختلاف چگالی که محرک اصلی رانش این جریان است می تواند ناشی از اختلاف درجه حرارت، وجود مواد محلول و یا ذرات نامحلول (ذرات معلق) باشد [۱]. گرادیان چگالی افقی نیروی رانش را بوجود آورده و سیال چگال تر را در زیر سیال با چگالی کمتر به حرکت در می‌آورد.

جریان چگالی حاوی ذرات معلق را اصطلاحاً جریان گل‌آلود (turbidity current) نیز می‌نامند. این جریان در زمینه‌های مختلفی از علوم با تعاریف متفاوت مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است، که می‌توان از ژئوفیزیک، هیدرولیک، هواشناسی نام برد. لایه مرزی، انتقال جرم و حرارت، اقیانوس‌شناسی، مکانیزم حرکت بهمن، زدودن آلودگی‌های نفتی و جوی، حشره‌شناسی و کنترل آفات و تکنولوژی گازهای متراکم از مواردی است که جریان چگالی در آنها بررسی می‌شود [۲]. در زمینه هیدرولیک ظهور و کاربرد این جریان در مخازن سدها می‌باشد که خود یکی از روش‌های مهم رسوبزدایی در مخازن به شمار می‌رود، بطوری که گارسیا [۳] از جریان گل‌آلود به عنوان روش عمومی جهت رسوب‌زدایی مخازن سدها نام می‌برد. در اقیانوس‌ها، جریان چگالی در اثر اختلاف شوری و درجه حرارت ایجاد می‌شود و یا به صورت جریان‌های گل‌آلود دیده می‌شوند [۴]. در زمینه هواشناسی، جریان‌های چگالی، هوای متراکم نسبتاً سردی هستند که سبب ایجاد نسیم و باد می‌شوند. جریان چگالی در مخزن سدها، اغلب در هنگام سیلاب بوجود آمده و اگر شیب کف زیاد (بالاتر از ۰/۰۰۱) و یا پهنای آن کم باشد به حرکت خود ادامه می‌دهد. در این حرکت ذرات درشت‌تر در ناحیه دلتا سقوط کرده و فقط ذرات ریز باقی می‌مانند که می‌توانند به انتهای مخزن و ساختمان سد برسند. مشاهدات و آزمایشات بر روی جریان‌های چگالی واقعی در مخازن نشان می‌دهد که ۹۰٪ ذرات معلق در جریان چگالی قطری زیر ۱۵-۱۰ میکرون داشته و ۵۰٪ قطری کمتری از ۳-۲ میکرون دارند. همچنین این جریان‌ها به ندرت غلظتی زیر kg/m^3 ۳-۱ (۰/۱ تا ۰/۳درصد) داشته‌اند [۵].

در بررسی‌های تجربی، به کمک دستگاه‌های اندازه‌گیری، اطلاعات مفیدی از ابعاد جریان مانند ارتفاع بدنه، ساختار دماغه و پروفیل سرعت و پخش طولی و عرضی حاصل می‌شود. در این جریان‌ها استفاده از وسایل اندازه‌گیری دقیق و لحظه‌ای مانند سیم داغ و لیزر با محدودیت‌های زیادی روبروست. وجود ذرات و کدورت جریان باعث شده استفاده از وسایل فوق امکان‌پذیر نباشد. لذا باید از وسایلی که انعکاس صوت را میسر می‌سازد استفاده شود. همچنین اندازه‌گیری غلظت که در جریان‌های رودخانه به وسیله نمونه‌گیری و آنالیز نمونه انجام می‌شود، در این جریان‌ها با محدودیت روبروست. وجود گرادیان غلظت در امتداد قائم و همچنین در امتداد جریان باعث می‌شود که نمونه‌گیری نتواند غلظت دقیق را بنمایاند. در اندازه‌گیری ارتفاع رسوب که توسط رویج و دالزیل [۶] انجام پذیرفت از تکنیک جدیدی استفاده شده است، بدین گونه که با نصب یک الکترود مرجع در بالای کانال و در آب تمیز و نیز نصب ۶۶ عدد الکترود در کف کانال در سه ستون و ۲۲ ردیف، توانستند با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی عمودی، میزان جرم رسوب در واحد سطح را با دقت mg/cm^2 ۰/۵ در فواصل مختلف، بصورت منحنی‌هایی در فواصل زمانی ۳۵ ,۱۰ , ۶ ثانیه بدست آورند. یو و همکاران [۷] به بررسی تجربی رفتار ته‌نشینی رسوبات ریز در مخازن پرداختند و بیان می‌کنند که رفتار ته‌نشینی رسوبات بطور تنگاتنگ با اندازه ذرات رسوب در ارتباط است. به دلیل اینکه نیروی رانش، نیروی گرانش مؤثر است و پروفیل سرعت بطور تنگاتنگ با پروفیل غلظت در ارتباط است، لذا هیدرودینامیک جریان و پروفیل سرعت از عوامل بسیار تعیین کننده در رسوبگذاری است. در ادبیات جریان گل آلود رسوبات از نظر امکان ته نشینی به چهار دسته تقسیم بندی می شود:

۱- ذرات درشت که در دلتا هستند ۲- رسوبات ریز که در منطقه شبه همگن (منطقه قبل از ناحیه فروروی) ته‌نشین می‌شوند. ۳- ذرات خیلی ریز که در منطقه جریان گل‌آلود (منطقه بعد از فرو روی) وجود دارند. ۴- ذرات خیلی ریز که در منطقه دریاچه گل‌آلود ته نشین می‌شوند. یو و همکاران [۷] مقادیر رسوبات ته‌نشین شده و نیز تفاوت مواد ته‌نشین شده، بین بالا دست و پائین دست منطقه فروروی را با هم دیگر مقایسه کرده و نتیجه می‌گیرند که بیشتر ذرات ریز در ناحیه شبه همگن و عمده ذرات چسبنده ریز در ناحیه گل‌آلود ته‌نشین می‌شوند؛ در جهت جریان شبه همگن و گل‌آلود نرخ ته‌نشینی ذرات چسبنده ریز افزایش می‌یابد و با توجه به تعریفی که از عدد ریچارسون موضعی ارائه کرده ذکر می‌کنند که اگر از عدد ریچارسون موضعی بزرگتر از ۰/۲۵ باشد، میدان جریان در جوار فصل مشترک جریان گل‌آلود و آب صاف پایدار می‌باشد. همچنین، ضخامت بدنه جریان را

www.SID.ir

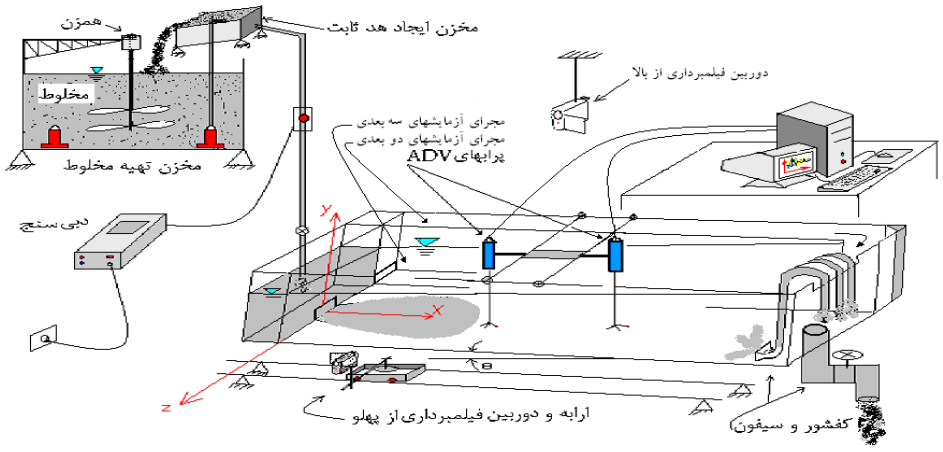
Archive of SID

مکانی درنظر می‌گیرند که در آن عدد ریچارسون موضعی حداقل باشد [۷]. صلاح الدین و همکاران [۸] دریافتند که رسوبات ریز در جریان چگالی، ظرفیت حمل ذرات درشت‌تر را افزایش می دهند، همچنین خاک رس از گل‌ولای ریز و درشت در نگهداری مومنتوم و هویت جریان، مؤثرتر است.کسل و کراننبرگ [۹] به بررسی آزمایشگاهی جریان گل‌آلود بسیار غلیظ به کمک خاک چینی برروی سطح شیبدار پرداختند و با توجه به تعریفی که از عدد رینولدز مؤثر ارائه می‌دهند، گذر ازحالت لایه‌ای به مغشوش را در عدد رینولدز مؤثر ۲۰۰۰ بیان می‌کنند. آلتیناکار و همکاران [۱۰] با استفاده از دو نوع مختلف رسوب، آزمایش‌هایی با جریان گل‌آلود انجام دادند و پروفیل سرعت و غلظت را در سه جهت، بطور همزمان اندازه گرفتند. نتایج، نشان می‌دهد که پروفیل سرعت بدون بعد نسبت به تغییرات بزرگ توزیع غلظت غیرحساس است. بست و همکاران [۱۱] به بررسی ساختار اصلی جریان مغشوش حاوی ذرات با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری پروفیل سرعت (ADV) پرداختند و نشان دادند که مکان سرعت ماکزیمم در پیشانی جریان حدود ۰/۳ ارتفاع آن می‌باشد.

بررسی پروفیل‌های سرعت توسط دستگاه ADV و تأثیر متقابل ارتفاع بدنه جریان در میزان رسوبگذاری از اهداف این مقاله است که به صورت تجربی و آزمایشگاهی بررسی شده است.

۲- دستگاه آزمایش و روش انجام آزمایشات

دستگاه آزمایش یک کانال شیب‌پذیر به ابعاد ۱۲ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع می‌باشد. یک مخزن تغذیه (مخزن تهیه مخلوط) به شکل استوانه از فولاد ضد زنگ و به حجم ۲ متر مکعب در بالا دست قرار می‌گیرد که حاوی مخلوط ذرات و آب است. جهت ایجاد مخلوط حاوی ذرات از کائولن با چگالی $2650\,kg/m^3$ استفاده شده است و اندازه متوسط ذرات حدود ۲۰ میکرون می‌باشد. به دلیل نیاز به هد ثابت در خروجی مخزن، جهت تنظیم دبی ثابت، در بالای این مخزن یک مخزن کوچکتر به ابعاد ۳۰×۵۰×۵۰cm تعبیه شده است. ابتدا مخلوط حاوی ذرات توسط یک پمپ کف‌کش به درون مخزن کوچکتر (مخزن ایجاد هد ثابت) پمپ می‌شود و اضافه آن از به درون مخزن تهیه مخلوط سرریز می‌شود که این عمل همچنین باعث سیرکولاسیون و ممانعت از ته‌نشینی می‌گردد. یک پمپ کف‌کش دیگر نیز در درون مخزن تغذیه قرار گرفته و عمل سیرکولاسیون را انجام می‌دهد. همچنین از یک همزن نیز جهت ممانعت از ته‌نشینی ذرات استفاده شده است. جریان حاوی ذرات پس از عبور از یک دریچه زیرگذر (که به‌صورت کشویی باز می‌شود) به ابعاد ۱۰ سانتیمتر طول و ۱/۲۵ سانتیمتر ارتفاع و در زیر آب صاف وارد کانال اصلی می‌گردد و در انتهای کانال به‌صورت کفشور و سیفون تخلیه می‌شود. شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل (۱) دیده می‌شود. شیب کانال توسط جک‌های هیدرولیکی حداکثر تا ۳/۵٪ تغییر می‌کند. آزمایشات در سه شیب ۱، ۲ و ۳ درصد انجام شده است.



شکل ۱- طرح شماتیک دستگاه آزمایش

www.SID.ir

Archive of SID

جهت اندازه‌گیری دبی جریان از یک دبی سنج اولتراسونیک ساخت شرکت Greyline، از کشور کانادا، مدل DFM ، با دقت ۰/۰۱ لیتر بر دقیقه استفاده شده است. این دبی سنج جهت اندازه‌گیری دبی از روش داپلر در امواج استفاده می‌کند. برای اندازه‌گیری ارتفاع رسوب از ارتفاع سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلیمتر، استفاده شده که ارتفاع سنج بر روی کالسکه‌ای ریل‌دار سوار می‌شود و می‌تواند ارتفاع رسوب را در هر نقطه اندازه‌گیری نماید. آزمایشات در سه دبی ۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر دقیقه انجام شده است.

اندازه‌گیری پروفیل سرعت با استفاده از سرعت سنج آکوستیک 10 MHz ساخت شرکت Nortek انجام می‌شود. این سرعت‌سنج نیز از پدیده داپلر جهت اندازه‌گیری استفاده می‌کند. دو عدد سنسور این وسیله به فاصله یک متری بر روی کالسکه ریل‌دار واقع بر روی کانال سوار شده‌اند و می‌توانند در هر ارتفاعی مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای را در نقطه مورد نظر مشخص نمایند. لذا، با تغییر مکان عمودی سنسورها می‌توان پروفیل‌های سرعت مقطع معینی را بدست آورد. جهت اندازه‌گیری پخش طولی و عرضی کانال و نیز مشاهده شکل پیشانی از دو دوربین فیلم برداری دیجیتال استفاده می‌شود. کانال، اسکلت فلزی و دیواره‌های شیشه‌ای دارد که قابل فیلم‌برداری از پهلو می‌باشد. در سمت پهلویی کانال یک ریل فلزی ساخته شده که کالسکه فیلم‌برداری بر روی آن حرکت می‌کند و با نصب دوربین بر روی آن می‌توان از پخش طولی، ارتفاع بدنه و پیشانی جریان با دقت ۰/۰۱ ثانیه فیلم برداری کرد. کف کانال جهت اندازه‌گیری پخش طولی و عرضی جریان، شبکه‌بندی شده است. یک دوربین دیگر در بالای کانال تعبیه شده تا از نحوه پخش عرضی جریان چگالی فیلم‌برداری نماید. در این آزمایش از سه غلظت، سه دبی و سه شیب متفاوت استفاده شده و اثر آنها بر ارتفاع، سرعت جریان چگالی و ارتفاع رسوب اندازه‌گیری شده است. جهت اندازه‌گیری ارتفاع رسوب، پس از یکنواخت و دائمی شدن جریان و بستن شیرهای ورودی و خروجی، مدت ۲۴ ساعت، زمان سپری شده است. جدول (۱) نشان دهنده شرایط آزمایش می‌باشد. با توجه به تعریف عدد ریچاردسون و رینولدز به صورت زیر[۳]:

$$Ri = \frac{g'h\cos\theta}{u^2} \qquad (۱)$$

$$\mathrm{Re}=\frac{uh}{\nu} \qquad (۲)$$

دراین فرمول‌ها ،h، ارتفاع بدنه جریان چگالی،u، سرعت جریان چگالی در جهت جریان، θ، زاویه شیب کف کانال و، ν، لزجت سینماتیکی می‌باشد. با توجه به اینکه غلظت‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها تأثیر چندانی بر لزجت آب مخلوط شده ندارد، لذا لزجت جریان چگالی برابر آب مخلوط شده درنظر گرفته شده است [۲]. جدول (۱) نشان می‌دهد که محدوده عدد رینولدز در آزمایشات از ۳۶۰ تا۳۰۲۰ را پوشش داده است. همچنین اعداد ریچاردسون توانسته است محدوده‌ای بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۶ را پوشش دهد. انتخاب این محدوده وسیع به این دلیل است که بتوان اثر عوامل مختلف را در جریان بررسی کرد. چنانکه در جدول دیده می‌شود، درجه حرارت آب نیز یادداشت شده تا بتوان اثر آن را در محاسبه لزجت سینماتیک وارد کرد.

۳- نتایج حاصل از آزمایشات

در این بخش مشخصه‌ای جریان گل‌آلود که در آزمایشات بدست آمده بررسی می‌شود.

الف) سرعت پیشروی

شکل (۲) سرعت پیشروی جریان چگالی را در طول کانال تا x=۱۱/۱۵ m را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در ابتدای کانال (در ۳/۳۵ متری اول) شبکه بندی‌ها به ابعاد ۵ سانتیمتر و در بقیه نقاط ۱۰ سانتیمتر می‌باشد لذا، سرعت پیشروی، متوسط سرعت در هر ۵ و ۱۰ سانتیمتر است. همانطور که مشاهده می‌شود با پیشروی پیشانی جریان، سرعت آن کمتر می‌شود. زیرا در ابتدا نیروی رانش، نیروی اینرسی و نیروی مؤلفه وزن ظاهری در جهت جریان می‌باشد و نیروی مقاوم (نیروی پسا) ناچیز است. با دور شدن از ورودی کانال و با تبادل مومنتمی که جریان چگالی با سیال ساکن محیط انجام می‌دهد، از نیروی رانش کاسته شده و به ابعاد پیشانی اضافه می‌شود، لذا نیروی پسا افزایش می‌یابد و در نهایت تنها نیروی رانش، نیروی مؤلفه وزن ظاهری در جهت جریان است که باعث حرکت جریان چگالی می‌شود. بنابراین، در ابتدا به دلیل وجود نیروی رانش بزرگتر سیال چگال شتاب و سرعت می‌گیرد و در منطقه‌ای دورتر از ورودی از شتاب و سرعت جریان چگالی به دلیل کم شدن نیروی رانش کاسته خواهد شد. در شکل اخیر در انتهای کانال سرعت

www.SID.ir

Archive of SID

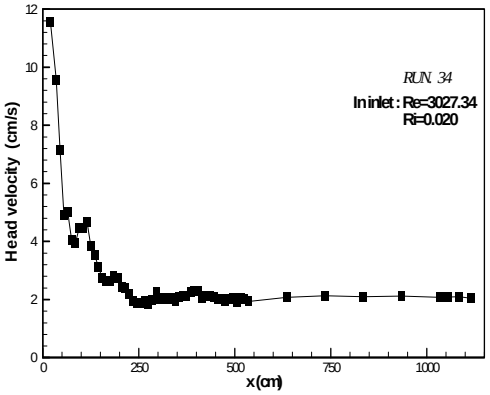
پیشروی به یک مقدار ثابتی میل می‌کند که نشان از عدم تغییرات نیروهای رانش و مقاوم دارد و به حالتی می‌رسد که به آن جریان تثبیت شده (established flow) گویند. به این ترتیب دیده می‌شود که در جریان مغشوش سه‌بعدی بعد از طول کوتاهی به حالت تثبیت شده می‌رسد. در سایر آزمایشات چنین روندی تکرار می‌شود.

جدول ۱- مشخصات اجراهای مختلف آزمایش

RUN	S	C_{in}	Q_{in} (lit/min)	Re_{in}	Ri_{in}	T(^oC)
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	۰/۰۱۰۵	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	۱۵۰۲/۳۱۶	۰/۰۴۰۶	۱۶/۵
۲۴	۱٪	۰/۵٪	۱۰	۱۴۸۴/۲۴۸	۰/۰۵۳۲	۱۶
۲۵	۱٪	۰/۵٪	۱۰	۱۴۸۴/۲۴۸	۰/۰۵۳۲۴	۱۶
۲۶	۱٪	۰/۵٪	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۲۳۳	۱۶
۲۷	۱٪	۱٪	۱۰	۱۴۷۷/۱۴۲	۰/۰۶۷۲	۱۵/۸
۲۸	۱٪	۰/۵٪	۲۰	۲۸۷۸/۵۵۲	۰/۰۱۳۱	۱۴/۵
۲۹	۱٪	۰/۵٪	۲۰	۲۷۹۷/۸۳۳	۰/۰۱۳۱	۱۳/۵
۳۰	۱٪	۱٪	۱۵	۲۱۲۷/۶۸۲	۰/۰۲۹۴	۱۴
۳۱	۱٪	۱٪	۲۰	۲۹۹۰/۹۳۵	۰/۰۱۶۵	۱۶
۳۲	۱٪	۱/۵٪	۱۰	۱۵۵۹/۲۵۸	۰/۰۸۱۲۹	۱۸
۳۳	۱٪	۱/۵٪	۱۵	۲۲۴۲/۶۴۰	۰/۰۳۵۵	۱۶
۳۴	۱٪	۱/۵٪	۲۰	۳۰۲۷/۳۴۳	۰/۰۲۰۰۱	۱۶/۵

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- سرعت پیشروی جریان چگالی

ب) ارتفاع بدنه جریان

در شکل (a۳ تا i۳) ارتفاع بدنه جریان گل‌آلود در طول کانال دیده می‌شود. در این شکل‌ها اثر دبی، شیب، و غلظت بر ارتفاع جریان چگالی نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش دبی، ارتفاع جریان چگالی در هر حال افزایش می‌یابد. همچنین ارتفاع بدنه در جهت جریان کاهش می‌یابد و در انتهای کانال تغییرات ارتفاع خیلی کم شده و تقریباً ثابت می‌ماند. در همه موارد حداکثر ارتفاع جریان چگالی در ابتدای کانال دیده می‌شود که می‌توان گفت به علت پرش هیدرولیکی و تغییر رژیم جریان می‌باشد. شدت این امر در جریان چگالی سه‌بعدی به دلیل محدودیت عرضی در ناحیه ورودی بیشتر است. در واقع در جهت عرضی نیز درون کشیدگی وجود دارد. ذکر این نکته لازم است که میزان درون‌کشیدگی (Entrainment) و شدت توربولانس در فصل مشترک وابسته به پایداری فصل مشترک می‌باشد (هر چه فصل مشترک پایدارتر باشد T درون‌کشیدگی و شدت توربولانس کمتر است و برعکس) میزان پایداری در فصل مشترک نیز تابعی از تنش برشی و گرادیان فشار هیدرواستاتیکی عمود بر فصل مشترک است. بدین معنی که هر چه تنش برشی بیشتر باشد، میزان پایداری کمتر است و هر چه گرادیان فشار هیدرواستاتیکی بیشتر باشد چون باعث انسجام در فصل مشترک می‌شود، پایداری بیشتر است. از طرفی، فشار هیدرواستاتیکی عمود بر فصل مشترک خود تابعی از مؤلفه شتاب ثقل کاهش یافته در جهت عمود بر جریان یعنی عبارت $g' \cos \theta$، است، $g' = g \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$) که g شتاب ثقل و ρ_0 و ρ بترتیب چگالی مخلوط و آب صاف است) لذا هرچه این جمله بیشتر باشد گرادیان فشار هیدرواستاتیکی عمود بر جریان بیشتر، در نتیجه پایداری بیشتر خواهد بود و لذا درون‌کشیدگی و شدت توربولانس کمتر است. همچنین میزان تنش برشی در فصل مشترک وابسته به مؤلفه شتاب ثقل کاهش یافته در جهت جریان یعنی جمله $g' in\theta$ می‌باشد. هرچه این جمله بیشتر باشد، جریان چگالی شتاب بیشتری به طرف پایین دست می‌گیرد، بنابراین تغییر سرعت ایجاد شده در فصل مشترک به تنش برشی می‌افزاید و باعث ایجاد ناپایداری و شدت توربولانس و درون‌کشیدگی بیشتر می‌شود.

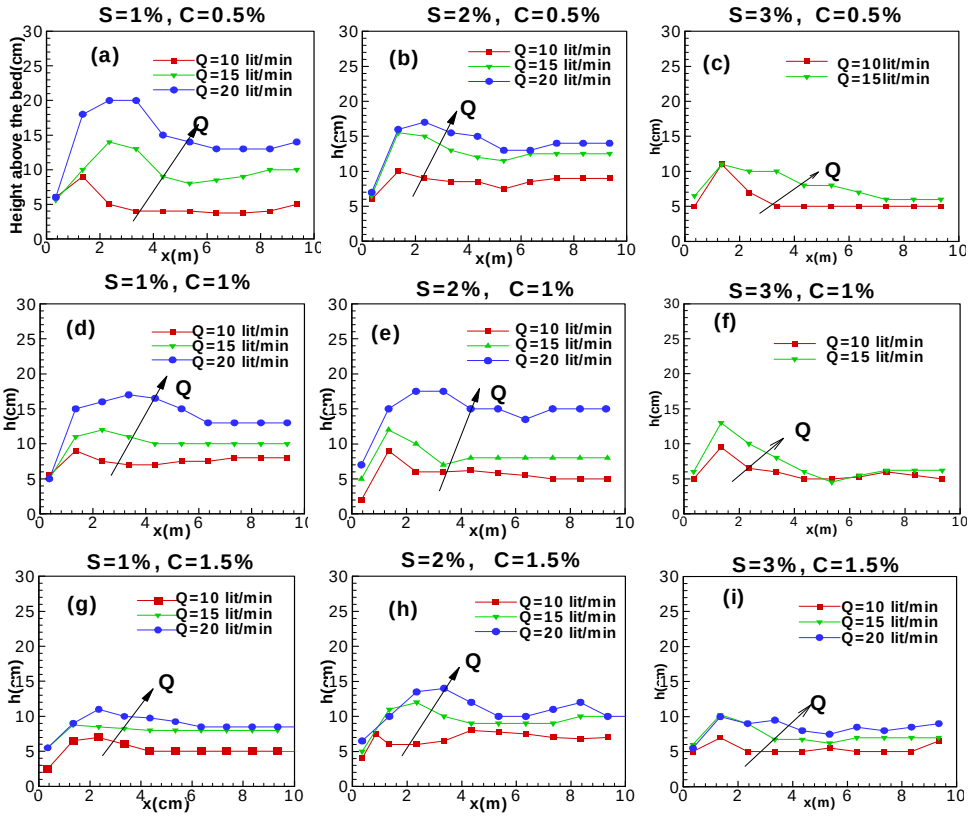
مع‌الوصف همانطور که از شکل (۳) بر می‌آید برای هر دبی خاص ارتفاع جریان چگالی به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. در واقع جریان چگالی اصطلاحاً به حالت تثبیت شده می‌رسد که در بخش سرعت پیشانی نیز ذکر شد. این امر چندان دور از واقع به نظر نمی‌رسد، زیرا آزمایش‌های انجام شده در شکل (۳) همگی در شیب‌های ملایم انجام شده‌اند.

در شکل‌های (۳) هرچه از سمت چپ به راست برویم اثر تغییرات شیب بر ارتفاع جریان دیده می‌شود. چنانکه دیده می‌شود، با افزایش شیب ارتفاع جریان چگالی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه افزایش شیب به میزان نیروی رانش در جهت جریان اضافه می‌کند، بنابر این، جریان شتاب گرفته و سرعت آن بیشتر می‌شود و به تبع آن ارتفاع جریان کاهش پیدا می‌کند.

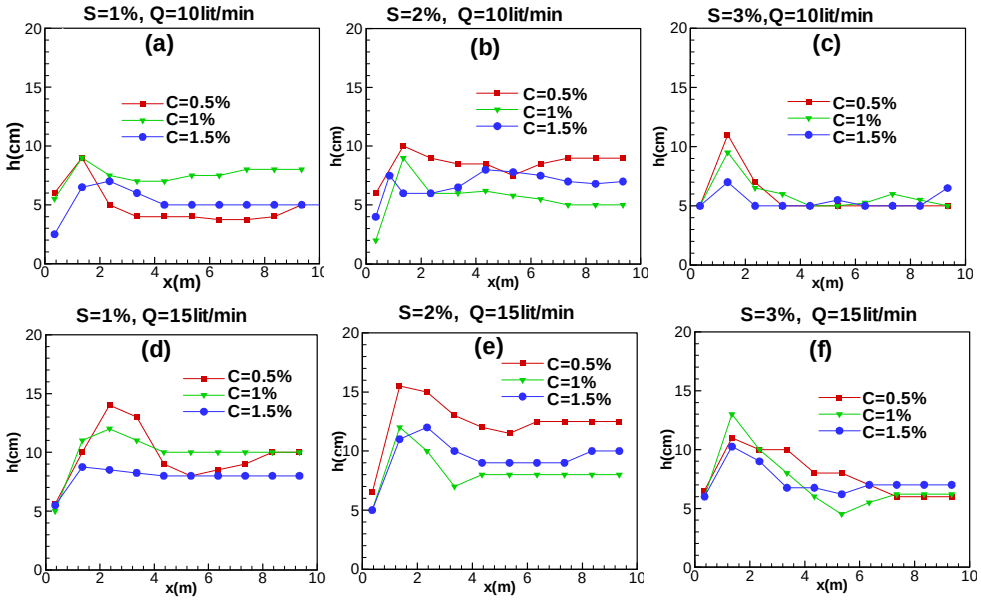
همچنین هرچه از بالا به پایین حرکت کنیم، اثر افزایش غلظت را می‌توان مشاهده کرد. اگر چه به نظر می‌رسد که با افزایش غلظت ارتفاع کمتر می‌شود، اما نتیجه‌گیری کلی نمی‌توان کرد. مقایسه شکل‌ها که با اندازه‌های محورهای یکسان رسم شده، نشان می‌دهد که در غلظت ۱/۵٪ به گونه محسوسی از ارتفاع جریان چگالی کاسته می‌شود ولی در عوض، اثر دبی را کاهش داده و تعدیل می‌کند. لازم به ذکر است که تغییرات دبی همه جا به صورت مستقیم بر ارتفاع دیده می‌شد. به هر حال از شکل‌های (۳) نتیجه می‌شود که اولاً تأثیر دبی در همه حال واضح بوده و با افزایش دبی ارتفاع جریان چگالی افزایش می‌یابد. اما درباره تأثیر غلظت نمی‌توان حکم کلی داد. با حرکت از بالا به پایین دیده می‌شود که غلظت زمانی می‌تواند به کاهش ارتفاع جریان منجر شود که از حد معینی بالاتر باشد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳- ارتفاع جریان گل‌آلود در طول کانال و نسبت به تغییرات دبی، شیب و غلظت



شکل ۴- اثر تغییرات شیب و دبی و غلظت برارتفاع جریان چگالی

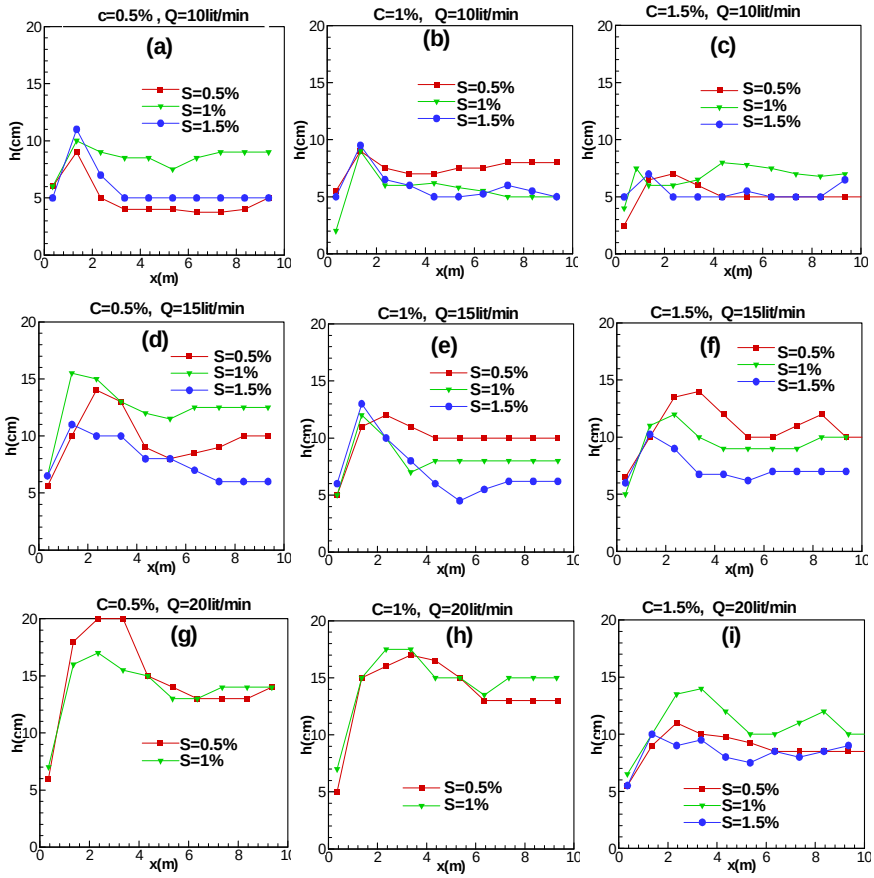
www.SID.ir

Archive of SID

اما چنانکه از شکل (۴) دیده می‌شود، با تغییر شیب به سه درصد، اثر تغییرات غلظت به صورت محسوسی کاهش می‌یابد. از شکل‌های c۴ و f۴ دیده می‌شود که در هر دو حالت شیب ۳٪ ، با وجود تغییر دبی ارتفاع جریان در قسمت تثبیت شده یکسان است. علاوه برآن تغییر غلظت نیز نتوانسته است که تغییری در ارتفاع به وجود آورد. لذا دیده می‌شود که رفتار جریان در این دو شیب با هم متفاوت است. همچنین نمی‌توان گفت که افزایش غلظت در هر حالی به افزایش ارتفاع بدنه منجر می‌شود.

شکل (۵) بررسی ارتفاع جریان گل‌آلود از منظر دیگر است. در هر منحنی اثر شیب دیده می‌شود. با نظر اجمالی می‌توان گفت که افزایش شیب در عمده حالات به کاهش ارتفاع منجر شده است. حرکت از چپ به راست در دو ردیف اول رابطه معنی داری را نشان نمی‌دهد. اما در ردیف سوم و در دبی ۲۰ لیتر بر دقیقه با افزایش غلظت ارتفاع کاهش می‌یابد. حرکت از بالا به پایین نمایشگر افزایش ارتفاع جریان گل‌آلود است. بنابر این می‌توان نتیجه کلی گرفت که دبی بارزترین اثر را در ارتفاع جریان گل‌آلود داشته و اثر آن نیز مستقیم است.

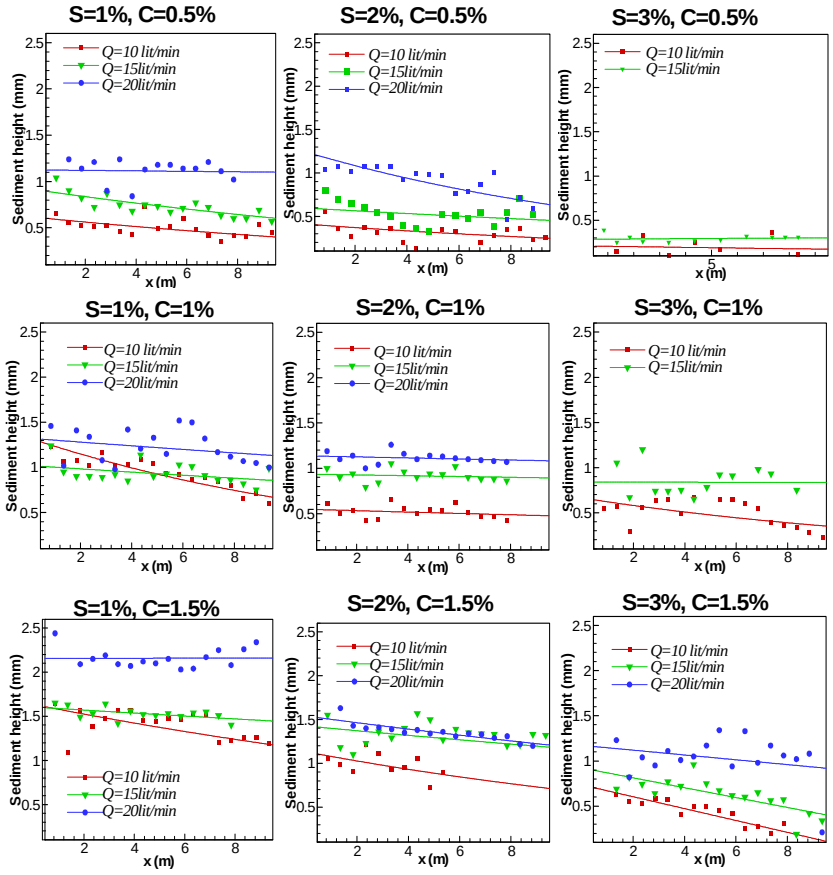
شکل (۶) اثر تغییرات عدد ریچاردسون ورودی را بر بدنه جریان در عدد رینولدز ۲۲۴۲/۶۴۰ نشان می‌دهد. این شکل به این دلیل رسم شده تا معنی داری عدد ریچاردسون ورودی در ارتفاع جریان بررسی شود. طبق پیشنهاد ترنر [۱] اگر عدد ریچاردسون در جریان گل آلود از ۰/۲۵ کمتر باشد، جریان مافوق بحرانی خواهد بود. اگرچه بعضی دیگر، این معیار را عدد یک، تعریف کرده‌اند. طبق تعریف ترنر و سایر محققین تمام جریان‌های فوق، بالای حد بحرانی است. چنانکه شکل (۶) نشان می‌دهد، رابطه معنی داری بین ارتفاع جریان گل‌آلود و ارتفاع جریان دیده نمی‌شود.



شکل ۵- تغییرات ارتفاع جریان گل‌آلود از یک منظر دیگر

www.SID.ir

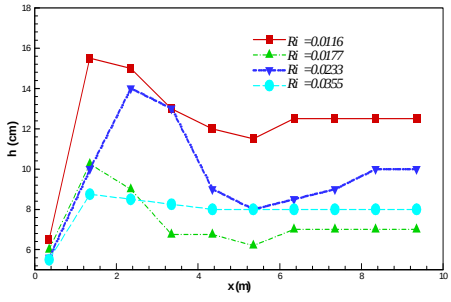
Archive of SID



شکل ۷- اثر تغییرات دبی بر ارتفاع رسوبگذاری

ج) رسوبگذاری

در شکل (۷) اثر تغییرات دبی بر ارتفاع رسوبگذاری ارائه شده است. منحنی گذرانیده شده از نقاط به صورت خطی می‌باشد تا متوسط حجم رسوب را نیز نشان دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی، تقریباً در تمام شیب‌ها و غلظت‌ها ارتفاع رسوبگذاری بیشتر می‌شود



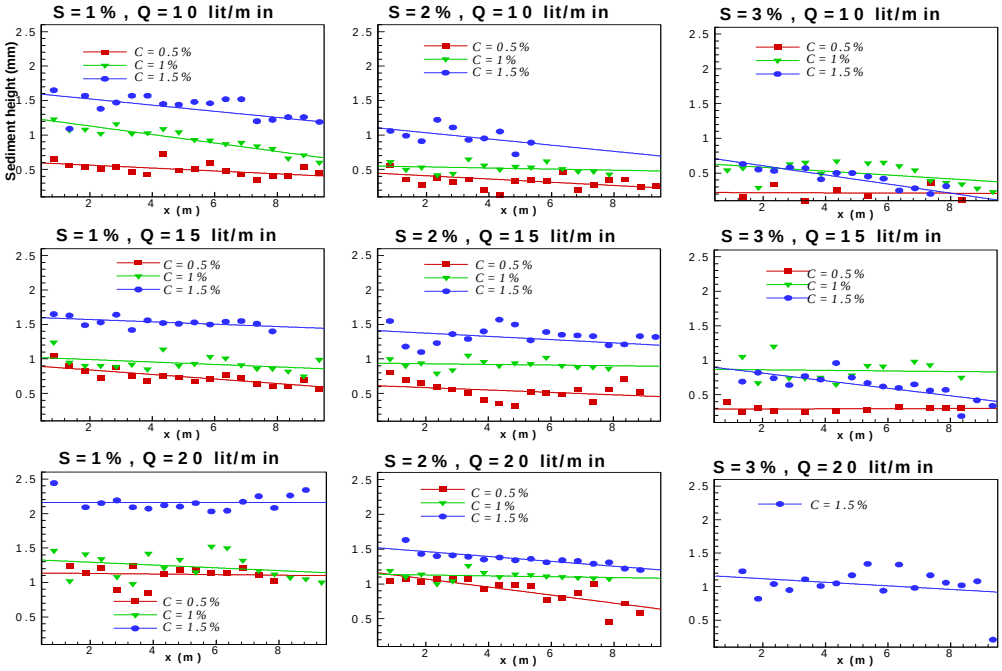
شکل ۶- اثر عدد ریچاردسون در ارتفاع بدنه جریان

رسوبات درشت‌تر در خروج از دریچه زیرگذر رسوب کرده و فقط ذرات ریز باقی‌مانده که می‌توانند به انتهای کانال برسند، لذا همیشه در ابتدای کانال میزان رسوبگذاری برای هر دبی خاص بیشتر است. همان طور که در نمودارهای بدنه جریان چگالی مشاهده شد افزایش دبی باعث افزایش ارتفاع بدنه شده و در نتیجه سرعت کمتر خواهد شد ولی به دلیل افزایش مقدار رسوبات وارد شده، بر میزان رسوب می‌افزاید و لذا، ارتفاع رسوب افزایش می‌یابد . به همین ترتیب با حرکت از چپ به راست شکل (۷) که شیب افزایش می‌یابد، دیده می‌شود که ارتفاع رسوب کم می‌شود. شکل (۸) اثر تغییرات غلظت بر ارتفاع رسوبگذاری را نمایش می‌دهد. بطوری که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت ارتفاع رسوبگذاری بیشتر شده است. زیرا در زمان معین تراکم ذرات بیشتری از یک مقطع مشخص عبور می‌کند. لذا، میزان سقوط و ته‌نشینی در غلظت بالاتر بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که در شیب‌های کمتر افزایش غلظت تأثیر بیشتری در افزایش میزان رسوبگذاری دارد.

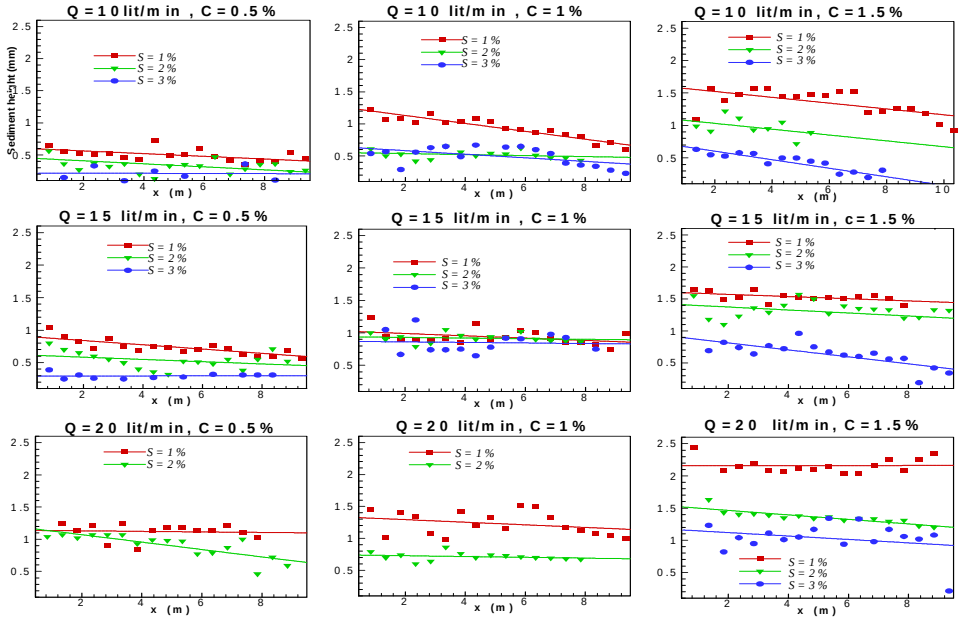
www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۹) اثر تغییرات شیب، در ارتفاع رسوبگذاری ارائه شده است. بطور کلی، با افزایش شیب، ارتفاع رسوبگذاری کاهش می‌یابد، زیرا به مؤلفه رانش یا نیروی وزن ظاهری در جهت جریان اضافه شده و لذا مؤلفه افقی شتاب کاهش یافته در جهت جریان ($g' \sin\theta$) افزایش می‌یابد و در نتیجه جریان چگالی در طول کانال با سرعت بیشتری حرکت می‌کند و میزان بار معلق و بار بستر بیشتری را از کانال عبور می‌دهد، بنابر این، ارتفاع رسوبگذاری کمتر خواهد شد. افزایش غلظت در همه حالات به افزایش حجم رسوبات منجر می‌شود و افزایش دبی نیز چنین نقشی دارد



شکل ۸- اثر تغییرات غلظت بر ارتفاع رسوبگذاری



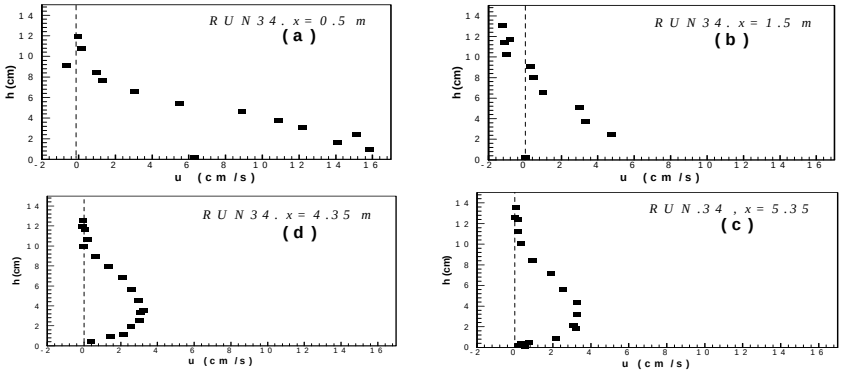
شکل ۹- اثر تغییرات شیب بر ارتفاع رسوبگذاری

www.SID.ir

Archive of SID

د) پروفیل‌های سرعت

در شکل (۱۰) یک نمونه از تغییرات پروفیل سرعت u (مؤلفه سرعت در جهت جریان) نسبت به مکان‌های مختلف در شیب، غلظت و دبی ثابت و در حالت جریان پایدار با هم مقایسه می‌شود. در ابتدای کانال به دلیل اینکه نیروی رانش بیشتری به جریان چگالی وارد می‌شود (نیروی اینرسی و نیروی مؤلفه وزن ظاهر در جهت جریان)، جریان چگالی شتاب و سرعت بیشتری می‌گیرد. بیشترین سرعت (ماکزیمم و متوسط) در نمودار (a۱۰) مشاهده می‌شود که پروفیل سرعت در فاصله x =۰/۵ m را از ورودی نشان می‌دهد. هر چه از ورودی دورتر شویم، بعلت کمتر شدن نیروهای رانش از میزان سرعت ماکزیمم و متوسط کاسته می‌شود و همچنین، موقعیت سرعت ماکزیمم و متوسط هر چه از ورودی دورتر می شویم به طرف بالا شیفت پیدا می‌کند، زیرا با دور شدن از ورودی از نیروی رانش کاسته می‌شود و ارتفاع جریان به دلیل پدیده درون‌کشیدگی افزوده می‌شود و با توجه به اینکه بر روی سطح بستر ماکزیمم تنش برشی ایجاد می‌شود، لذا مقدار ماکزیمم و متوسط به سمت بالا شیفت پیدا می‌کند. در جوار ورودی یک گردابه بزرگ ایجاد می‌شود و بنابر این سرعت منفی شده و جریان برگشتی دیده می شود. ولی در فواصل دورتر به دلیل عبور گردابه پیشانی اثرات آن کمتر می‌شود . با توجه به شکل (۵) و شیب ۱٪که در آنجا ارتفاع بدنه RUN34 در x های مختلف رسم شده، مشاهده می‌شود که در مقطع x=۰/ ۵m ارتفاع بدنه حدود ۷cm است یعنی، کمتر از ارتفاعی که سرعت در جهت جریان در آنجا صفر است ولی در شکل(b۱۰) ارتفاع بدنه بیشتر و حدود ۹ سانتیمتر است. در شکل‌های (c و d) نیز ارتفاع بدنه کمتر از ارتفاع سرعت صفر می‌باشد. علت این پدیده را چنین می‌توان بیان کرد که در مقطع x=۰/۵ m به دلیل نیروی رانش بزرگتر و به تبع آن سرعت بیشتر، جریان فرصت دیفیوژن و درون‌کشیدگی کمتری دارد، لذا ارتفاع بدنه کمتر از ارتفاع مذکور است. اما در مقطع x=۱/ ۵ m به دلیل وجود پرش هیدرولیکی، دیفیوژن و درون‌کشیدگی بیشترشده و لذا ارتفاع بدنه بیشتر می‌شود. در مقاطع x=۴/۳۵ m و x=۵/۳۵ m به دلیل وجود نیروی رانش کمتر و به تبع آن سرعت کمتر، درون‌کشیدگی کمتر و در نتیجه ارتفاع بدنه کمتر از ارتفاع مذکور است. مشاهده شکل‌های (c و d) همچنین نشان می‌دهد که حتی در جریان مغشوش جریان می‌تواند به حالت تثبیت شده برسد. مقایسه حداکثر سرعت در شکل‌های (۹) نشان می‌دهدکه از عدد ۱۶ cm/s در x=۰/۵ m به ۴/۵ cm/s در x=۱/۵ m و سپس به ۴ cm/s در شکل‌های بعد می‌رسد. این اعداد نشان از شدت درون‌کشیدگی در ابتدای کانال و پرش هیدرولیکی داخلی است.



شکل ۱۰- تغییرات پروفیل سرعت در جهت x و نسبت به مکان

۴- نتیجه‌گیری

آزمایشاتی که در جریان چگالی سه بعدی انجام شده است نشان می دهد که :

- سرعت پیشانی در ابتدای ورودی جریان به دلیل وجود نیروهای اینرسی زیاد بوده، سپس کاهش یافته و بعد از مدتی ثابت می‌شود. این سرعت می‌تواند جریان تثبیت شده را نشان دهد.
- با افزایش دبی، ارتفاع بدنه به دلیل اضافه شدن مؤلفه نیروی وزن ظاهری در جهت جریان و در هر حالت افزایش می‌یابد.
- انتظار می‌رود که ارتفاع بدنه جریان با افزایش غلظت کاهش داشته باشد. اما نتیجه کلی نمی‌توان گرفت. کاهش ارتفاع بدنه در غلظت‌های بالا مشهود است.
- ارتفاع بدنه نسبت به افزایش شیب بطور کلی کاهش می‌یابد که بدلیل اضافه شدن مؤلفه شتاب کاهش یافته در جهت جریان

www.SID.ir

Archive of SID

یعنی عبارت $g'\cos\theta$ می‌باشد. شیب عنصر تعیین کننده‌تری نسبت به دو پارامتر ارزیابی شده دیگر می‌باشد. به طوریکه در شیب‌های بالا اثر افزایش دبی و غلظت محسوس نیست.

- نوساناتی بطور سینوسی، نسبت به زمان در سطح بدنه جریان مشاهده می‌شود که دامنه آن نزدیک ورودی بیشتر است علت این پدیده را می‌توان در تنش برشی ایجاد شده در فصل مشترک بین آب تمیز ساکن و جریان چگالی جستجو کرد.
- ارتفاع رسوبات در همه حالات با افزایش دبی زیادتر می‌شود، زیرا سطح مقطع جریان بیشتر و سرعت آن کمتر و در نتیجه نرخ ته‌نشین شدن ذرات بیشتر می‌شود. همچنین جریان حجم رسوبات بیشتری را با خود حمل می‌کند.
- افزایش غلظت نیز در همه حالات بر میزان ارتفاع رسوبگذاری می‌افزاید. همچنین ارتفاع رسوب در جهت کانال کاهش می‌یابد که نشان از کاهش متوسط در جهت جریان دارد.
- ارتفاع رسوب با افزایش شیب کاهش می‌یابد که به دلیل اضافه شدن مؤلفه رانش وزن ظاهری در اثر اضافه شدن عبارت $g'\cos\theta$ می‌باشد، در نتیجه با سرعت گرفتن جریان ، توانایی حمل رسوبات آن بیشتر می‌شود.
- بررسی پروفیل سرعت نشان می‌دهد که در ابتدای کانال به دلیل وجود نیروهای اینرسی، سرعت ماکزیمم و متوسط بیشتری خواهیم داشت، ولی هر چه از ابتدای کانال دورتر می‌شویم از سرعت ماکزیمم و متوسط به دلیل استهلاک نیروهای اینرسی در اثر لزجت و درون‌کشیدگی کاسته می‌شود.

با توجه به نتایج فوق می‌توان مدل‌های تحلیلی از جریان چگالی مغشوش را با نتایج تجربی این آزمایش مقایسه و ضرایب مدل را کالیبره نمود و با ضریب اطمینان بالاتری از این مدل‌ها جهت تخمین حجم رسوبات در کانال‌ها و مخازن پشت سد استفاده نمود.

تشکر و قدرانی

بدین وسیله از پرسنل سخت کوش انستیتو آب و انرژی دانشگاه صنعتی شریف به ویژه از آقای مهندس حکیم جوادی که درساخت بخشی از قطعات دستگاه آزمایش همکاری صمیمانه داشتند و همچنین از قطب تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف که امکان انجام آزمایشات را فراهم نموده است، کمال تشکر را می‌نمایم.

مراجع

[1] Turner, J. S., Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press London, U. K., (1973).
[2] Firoozabadi, B., Farhanieh, B., Rad, M.," Hydraudynamics of 2-D laminar turbidity current, Journal of Hydraulic Research, V. 41, N. 6, (2003).
[3] Garcia, M. H., "Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediment", J. of Hydraulic Eng. ASCE, V. 120, N.11, (1994).
[4] Firoozabadi, B., "Propagation of three dimensional density currents" BSME-ASME Conferences in Mechanical Eng., Bangladesh University of Technology, Bangladesh, 1-4 January, (2004).
[5] Mukhamedov, A. M., et. al, "Origin and movement of the bottom current in the reservoir of Nurek power satiation and effect on the silting of the reservoir", International symposium on stratified Flow, Novosibrisk, (1972).
[6] DE Rooij, F., Dalziel, B., "Time –and space – resolved measurements of deposition under turbidity currents", Spec. publs int. Ass sediment, V. 31, (2001).
[7] Yu, W. S., Lee, H. Y., and Hsu, M. S., "Experiments on deposition behavior of fine sediment in a reservoir", J. of Hydraulic Engineering, V.126, N.12, December, (2000).
[8] Salaheldin, T. M., Imran, J., Chaudhry, M.H., Reed, C., "Role of fine grained sediment in turbidity current flow dynamics and resulting deposits", Marine Geology V. 171 (2000).
[9] Kessel, T., Kranenburg, C., "Gravity Current of Fluid on Sloping Bed" J. of Hydraulic Engineering, V.122, N.12, December, (1996).
[10] Altinakar, M. S., Graf, W. H. and Hopfinger, E. J., "Flow structure in turbidity current", J. of Hydraulic Research, V.34, N.5, (1996).
[11] Best, J. L., Kirkbride, A. D. and Peakall, J., "Mean flow and turbulence structure of sediment-laden gravity current: New insights using ultrasonic Doppler velocity profiling", Spes. Publs. int. Ass. Sediment, V. 31, (2001).
[12] Alavian, V., et. al, "Density currents entering lakes and reservoirs", J. of Hydraulic Eng. ASCE, V. 118, N. 11, (1992).

www.SID.ir