علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۱، شماره‌ی۳، پاییز ۹۷، ص. ۷۴-۶۱

بررسی آزمایشگاهی ارتفاع بدنه جریان غلیظ رسوبی میان‌گذر در نقطه جداشدگی از بستر

لیلا هاشمی[۱] و مهدی قمشی[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. m.ghomeshi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۳

چکیده

زمانی که جریان غلیظ زیرگذر در سیالی با لایه‌بندی چگالی حرکت می‌کند، با رسیدن به نقطه‌ی هم‌چگالی خود از بستر جداشده و به صورت میان‌گذر درون توده سیال پیرامون حرکت می‌کند. این نقطه که نقطه جداشدگی جریان غلیظ نامیده می‌شود، مرز بین جریان غلیظ زیرگذر و میان‌گذر می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از یک مدل فیزیکی به بررسی آزمایشگاهی اثر تغییرات دبی، غلظت و شیب بر روی ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی پرداخته شد. تعداد ۴۸ آزمایش در غلظت‌ها و دبی‌های مختلف در فلومی شیب پذیر انجام پذیرفت. بررسی نتایج نشان داد که ارتفاع متوسط بدنه جریان غلیظ در نقطه جداشدگی با افزایش دبی و شیب بستر، افزایش و با افزایش غلظت، کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی استخراج شد.

کلید واژه‌ها: جریان غلیظ میان‌گذر، نقطه جداشدگی، ارتفاع جریان.

مقدمه

جریان‌های غلیظ یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در رسوب‌گذاری مخازن می‌باشند. هنگامی‌که سیالی با جرم مخصوص مشخص به درون توده‌ی سیال دیگری با جرم مخصوص متفاوت جریان یابد، پدیده جریان غلیظ اتفاق می‌افتد. عامل حرکت این‌گونه جریان‌ها اعمال شتاب ثقل بر اختلاف چگالی دو سیال می‌باشد که بر اساس اختلاف چگالی سیال غلیظ با سیال پیرامون به سه دسته روگذر، زیرگذر و میان‌گذر تقسیم‌بندی می‌شوند. این اختلاف چگالی که محرک اصلی حرکت این جریان است، می‌تواند ناشی از اختلاف درجه حرارت، وجود مواد محلول و یا ذرات نامحلول (ذرات معلق) باشد. به عبارت دیگر اعمال نیروی ثقل روی اختلاف چگالی دو سیال باعث شکل‌گیری این نوع جریان‌ها می‌گردد، ازاین‌رو جریان غلیظ را جریان ثقلی نیز می‌نامند.

شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به‌عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد، شتاب ثقل کاهش یافته نام دارد که به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$g' = g\frac{\Delta\rho}{\rho_a} = g\frac{(\rho_d - \rho_a)}{\rho_a} \qquad (۱)$$

در این رابطه g' شتاب ثقل کاهش یافته، g شتاب ثقل ، ρ_α و ρ_d به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ می‌باشد (Sarvari Nezhad et al., 2012). از آنجائی که عامل حرکت جریان‌های غلیظ نیروی ثقل می‌باشد، همانند جریان در کانال‌های باز از عدد فرود جهت تشابه مدلی و بررسی رژیم جریان استفاده می‌گردد، با این تفاوت که شتاب ثقل به دلیل اختلاف چگالی، کاهش یافته است که آن را عدد فرود دنسیمتریک (Densimetric Froude Number) می‌نامند و از رابطه‌ی (۲) حاصل می‌شود.

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h\cos\theta}} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق Fr_d عدد فرود دنسیمتریک، U سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ، h ضخامت بدنه جریان و θ زاویه بستر با افق می‌باشد (Sarvari Nezhad et al., 2012). پارامتر بسیار مهم دیگری که در مطالعات جریان‌های غلیظ به کار برده می‌شود فلاکس شناوری (Buoyancy Flux) یا جریان رسوب مؤثر در واحد عرض است که به‌صورت زیر بیان می‌گردد (Alavian, et al., 1992).

$$B = g'hU = gR(C_sUh) = g'q \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، q دبی در واحد عرض در جریان‌های غلیظ، U و h به ترتیب سرعت و عمق متوسط جریان، c_s غلظت رسوبات غیر چسبنده و R ضریب کاهشی $\Delta\rho/\rho_a$ می‌باشد.

از پدیده‌های مهم دیگر در جریان غلیظ، شدت اختلاط است که با E نشان داده می‌شود و ناشی از ناپایداری‌ها در حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن می‌باشد (Turner, 1979).

وقتی جریان غلیظ وارد سیال لایه‌بندی شده با چگالی متفاوت در عمق می‌شود، به طوری‌که چگالی جریان غلیظ ورودی بیشتر از چگالی لایه‌های بالایی سیال باشد، جریان ورودی، آب پیرامون خود را جابه‌جا می‌کند و اصطلاحاً آب را پس می‌زند تا جایی که اندازه حرکت جریان ورودی با نیروی فشاری ناشی از اختلاف چگالی جریان ورودی و آب ساکن به تعادل برسند (Turner, 1979). در نقطه‌ی تعادل، جریان غلیظ زیرگذر به زیر سطح آب فرو می‌رود که این نقطه را نقطه‌ی غوطه‌وری می‌گویند. پس از آن جریان غلیظ ابتدا به شکل زیرگذر عمل کرده و به زیر لایه‌های سیال فرو می‌رود تا جایی که چگالی آن برابر با چگالی لایه‌ی سیال شود. وقتی‌که جریان زیرگذر به نقطه‌ای برسد که در آن، چگالی جریان غلیظ زیرگذر و لایه‌ی سیال اطراف برابر باشد، جریان میان‌گذر اتفاق می‌افتد که در این نقطه جریان غلیظ کف را ترک خواهد کرد و به صورت تقریباً افقی به حرکت خود ادامه می‌دهد. به نقطه‌ای که جریان غلیظ بستر را ترک می‌کند و به صورت تقریباً افقی امتداد می‌یابد، نقطه‌ی جداشدگی (Separation point) می‌گویند. فاکتورهای مؤثر در جداشدگی جریان غلیظ از بستر، مشابه فاکتورهای مؤثر در نقطه غوطه‌وری می‌باشند (Alavian et al., 1992). شکل (۱) رژیم جریان غلیظ در سیال لایه‌بندی شده را نشان می‌دهد.

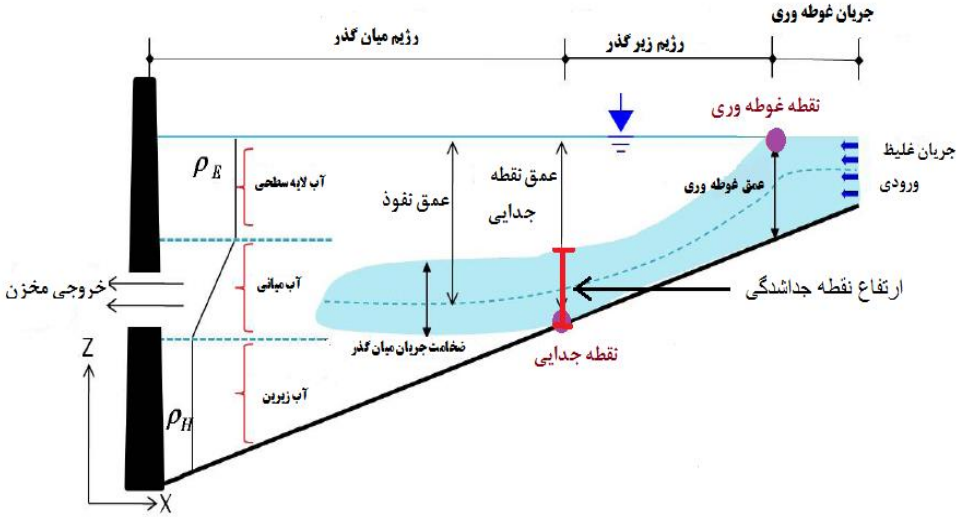
یک جریان غلیظ درون محیط لایه‌بندی شده، جریان غلیظ نفوذی (Intrusive Gravity Current) نیز نامیده می‌شود که به اختصار با IGC معرفی می‌شود، که مدتی بعد از انتشار به صورت افقی با سرعت تقریباً ثابت U در محیط لایه‌بندی شده حرکت می‌کند (Nokes et al., 2008).

Zhang et al. (2015) برای تعیین تأثیر لایه‌بندی، پارامتر فرکانس شناوری N را به صورت زیر تعریف کردند.

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\overline{\rho}}\frac{d\rho}{dz}} \qquad (۴)$$

در رابطه فوق $\overline{\rho}$ چگالی متوسط سیال پیرامون و $\frac{d\rho}{dz}$ تغییرات چگالی در عمق می‌باشد.

خصوصیات نقطه جداشدگی جریان غلیظ از بستر و ارتفاع بدنه جریان غلیظ معادل آن تاکنون توسط محققان مورد بررسی قرار نگرفته است. عمده تحقیقات صورت گرفته در مورد جریان‌های غلیظ زیرگذر و میان‌گذر به‌صورت مجزا بوده و به بررسی خصوصیات جریان در مرز بین سیال زیرگذر و میان‌گذر پرداخته نشده است. در خصوص جریان غلیظ زیرگذر، برای چندین دهه گذشته بسیاری از دانشمندان تلاش کردند تا موقعیت نقطه غوطه‌وری (که مشابه نقطه جداشدگی در جریان میان‌گذر می‌باشد) را با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و تئوری بر اساس عدد فرود دنسیمتریک در نقطه غوطه‌وری F_p، دبی واحد عرض و شتاب ثقل کاهش یافته تعیین کنند. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده به‌وسیله محققین نشان می‌دهد که غوطه‌وری جریان در محدوده‌ی F_p از ۰/۰۳ تا ۰/۷۸ در شیب ملایم اتفاق می‌افتد.



شکل ۱- نمایی از رژیم جریان غلیظ در سیال لایه‌بندی شده

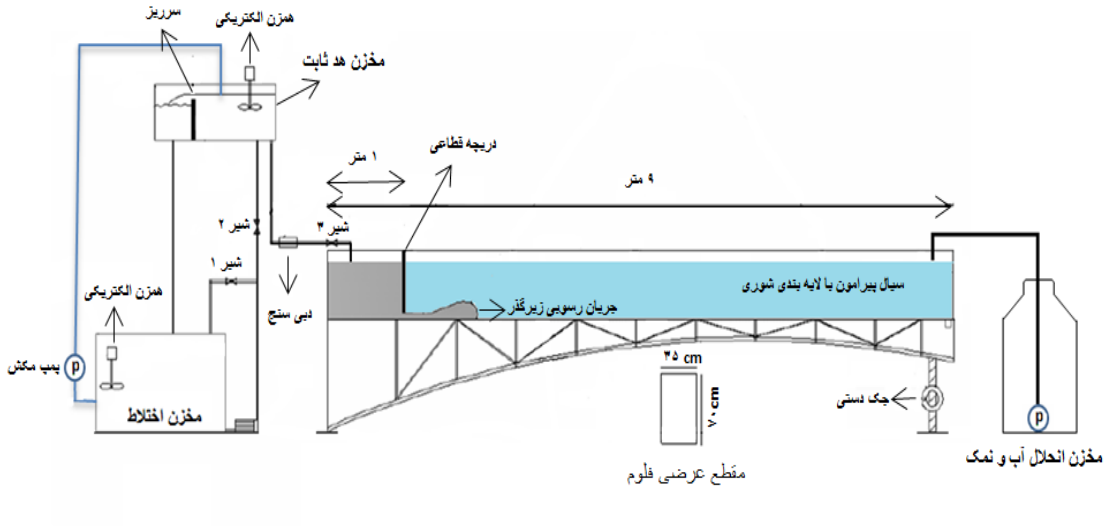
Singh و Shah (1971) مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از یک فلوم شیب دار انجام دادند و با انجام تحلیل ابعادی و با توجه به نتایج مطالعات خود رابطه‌ای را برای عمق تشکیل نقطه غوطه‌وری ارائه نمودند. آن‌ها همچنین F_p =۰/۶۷ را به دست آوردند که به‌وسیله Lee و Yu (1997) و Farrell و Stefan (1986) تائید شد. Lee و Yu (1997) نشان دادند که نقطه غوطه‌وری می‌تواند برای رسیدن به شرایط پایدار با زمان به پایین دست حرکت کند (F_p =۱ در ابتدا نقطه غوطه‌وری و F_p =۰/۶ در شرایط پایدار پایین دست). Savage و Brimberg (1975) از دو روش، پدیده غوطه‌وری را مورد بررسی قرار دادند. روش اول مبتنی بر معادله بقا انرژی و روش دوم مبتنی بر تغییرات تدریجی جریان در دو لایه می‌باشد. Goleij (2014) تأثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ و همچنین شیب بستر سیال ساکن بر نقطه غوطه‌وری را بررسی کرد و نتیجه گرفت که شیب اثر چندانی بر روی ارتفاع نقطه غوطه‌وری ندارد و با افزایش دبی ورودی جریان غلیظ، مقدار ارتفاع نقطه غوطه‌وری برای شیب‌های مختلف افزایش می‌یابد. وی همچنین با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و تحلیل ابعادی رابطه‌ای را برای محاسبه عمق نقطه غوطه وری پیشنهاد نموده است. در مطالعاتی که تاکنون در خصوص جریان‌های میان‌گذر انجام شده است، عمدتاً سرعت پیشانی و عمق نفوذ جریان غلیظ میان‌گذر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در اکثر تحقیقات، به منظور ایجاد جریان غلیظ میان‌گذر، سیالی متشکل از دولایه جریان با چگالی متفاوت به عنوان سیال پیرامون استفاده شده و کمتر به بررسی جریان غلیظ میان‌گذر در سیالی با لایه‌بندی تدریجی چگالی پرداخته شده است. Kao (1977) سرعت انتشار پیشروی در طول یک سطح مشترک (تیز) بین دو سیال همگن بر پایه تئوری برنولی را استنتاج کرد. Wells و Nadarajah (2009) تحقیقات آزمایشگاهی و تئوری برای توصیف عمق جایی که جریان غلیظ وارد یک لایه آب طبقه‌بندی شده خطی می‌شود، انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عمق نفوذ تابعی از نرخ اختلاط (E)، فلاکس شناوری جریان غلیظ و فرکانس شناوری (N) می‌باشد و یک رابطه خطی برای عمق نفوذ ارائه دادند. An و Julien (2014) دینامیک نفوذ جریان‌های غلیظ به درون مخزن ایمها واقع در کره شمالی را به روش عددی مورد بررسی قراردادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اگر غلظت جریان‌های رسوبی بیشتر از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد، جریان‌های رودخانه در طول ماه‌های تابستان می‌توانند به‌صورت میان‌گذر شکل بگیرند. Zhang et al. (2015) تأثیر لایه‌بندی حرارتی ایجاد شده در یک مخزن را روی زمان حرکت آلاینده میان‌گذر بررسی کردند. آن‌ها با انتشار ناگهانی جریان غلیظ به درون یک مخزن لایه‌بندی شده، نشت آلودگی به درون مخزن را شبیه‌سازی کردند و سرعت جریان میان‌گذر را از طریق تحلیل ابعادی بر اساس قانون بقای انرژی پیش‌بینی کردند و درنهایت یک رابطه خطی بین زمان حرکت و فرکانس شناوری ارائه دادند.

در سد گتوند علیا که از مرداد سال ۱۳۹۰ بهره‌برداری از آن شروع شده است، مشکل وجود سازند نمکی در مخزن سبب تجمع شوری در لایه‌های پایینی مخزن سد شده است و باعث شده یک لایه‌بندی شوری در مخزن سد ایجاد شود (Ghomeshi and Haghbin, 2013). بنابراین ممکن است با ورود سیلاب با رسوب زیاد به مخزن سد، جریان غلیظ پس از طی مسافتی که به صورت زیرگذر ادامه مسیر می‌دهد، با رسیدن به لایه‌بندی شوری از بستر جدا شده و به صورت میان‌گذر به درون لایه‌های شور مخزن حرکت کند و تغییراتی در لایه‌بندی سیال و ارتفاع شوری در مخزن سد ایجاد کند. بنابراین در پژوهش حاضر به کمک یک مدل فیزیکی و با استفاده از محلول آب و نمک به منظور تشکیل لایه‌بندی شوری در سیال پیرامون و مخلوط آب و رسوب به منظور ایجاد جریان غلیظ رسوبی برای ایجاد شرایطی مشابه با شرایط مخزن سد گتوند، به بررسی رفتار جریان غلیظ درآستانه میان‌گذر شدن در سیالی با لایه‌بندی شوری پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تغییرات ارتفاع جریان غلیظ در محل جداشدگی، از یک فلوم با شیب بستر متغیر به طول نه متر، عرض ۰/۳۴ متر و ارتفاع ۰/۷۰ متر از جنس شیشه و پلاکسی گلاس در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده گردید. دریچه‌ای کشویی در فاصله‌ی یک متری از ابتدای فلوم از جنس پلکسی تعبیه شده بود که طول فلوم را به دو قسمت مجزا تقسیم می‌کرد. از قسمت پشت دریچه به‌عنوان محفظه ورود جریان غلیظ رسوبی و از قسمت جلوی دریچه به‌عنوان مخزن سیال ساکن پیرامون استفاده شد. نمایی شماتیک از فلوم و تجهیزات موجود در شکل (۲) نشان داده شده است.

آزمایش‌ها به این صورت انجام شد که ابتدا برای ایجاد سیالی با لایه‌بندی شوری در فلوم، آب شور غلیظی با استفاده از محلول آب و نمک در مخزنی از جنس پلی‌اتیلن تهیه شد. پس از آن با اندازه‌گیری EC (واحد هدایت الکتریکی برای سنجش شوری) آب نمک تهیه شده در مخزن، سیال آب شور به درون فلوم تا فاصله‌ی یک متری از دریچه پمپ شد و سپس آب زلال شهری روی آن با سرعت کم رها شد. با ورود آب زلال، شوری در کف ثابت نمی‌ماند و تحت پدیده‌ی دیفیوژن به سمت بالا حرکت می‌کرد. بنابراین بعد از گذشت زمان مشخصی، یک سیال لایه‌بندی شده از شوری ایجاد می‌شد به نحوی که غلظت شوری در کف زیاد و به



شکل ۲- تصویر شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده و تجهیزات آن



شکل ۳- نمایش نقطه جداشدگی جریان غلیظ و ارتفاع نظیر آن هنگام نفوذ به درون سیال پیرامون لایه‌بندی شده

سمت سطح آب کاهش می‌یافت. بعد از تشکیل لایه‌بندی شوری، مقدار EC در هفت مقطع مختلف از فلوم به فواصل یک متری از ابتدای دریچه توسط EC سنج دیجیتال برداشت شد. در فاصله‌ی کوتاهی بعد از برداشت مقادیر شوری، جریان غلیظ رسوبی که متشکل از ذرات رسوبی سیلیس غیر یکنواخت با قطر متوسط ۶/۸۸ میکرون، Gs برابر با ۲/۶۷ و σ_g برابر با ۴/۸، به صورت مخلوط در آب بود؛ در مخزنی مجزا در پشت فلوم تهیه می‌شد و با دبی مشخص از طریق شیر ورودی وارد محفظه پشت دریچه می‌گردید. هنگامی‌که ارتفاع سیال غلیظ در محفظه با ارتفاع سیال لایه‌بندی در فلوم برابر می‌شد، دریچه کشویی برای ورود جریان غلیظ رسوبی به درون سیال لایه‌بندی شوری به‌طور ناگهانی باز می‌گردید.

لازم به ذکر است که برای ایجاد جریان غلیظ رسوبی از مخزنی به حجم سه مترمکعب از جنس پلی‌اتیلن استفاده شد که درون آن همزنی برای اختلاط آب و رسوب تعبیه شده بود که توسط پمپ متصل به مخزن، جریان رسوبی از طریق لوله به مخزن دیگری از جنس گالوانیزه در ارتفاع بالاتر از مخزن اولیه هدایت می‌شد که می‌توانست حجمی معادل ۴۰۰ لیتر را با هد ثابت، در خود نگه دارد. درنهایت جریان رسوبی به وسیله‌ی لوله‌ی متصل به مخزن گالوانیزه از آن خارج می‌شد و سپس از فلومتر مغناطیسی که در مسیر لوله نصب شده بود عبور می‌کرد و توسط شیر متصل به انتهای لوله وارد محفظه پشت دریچه می‌شد. پس از باز کردن دریچه، جریان غلیظ رسوبی به دلیل سنگین‌تر بودن از لایه‌های سیال پیرامون، ابتدا به‌صورت زیرگذر حرکت می‌کرد تا اینکه در نقطه‌ای هد جریان غلیظ رسوبی از کف فلوم جدا شده و به همراه بدنه متصل به آن، به درون سیال پیرامون نفوذ می‌کرد و به‌صورت جریان غلیظ میان‌گذر به حرکت خود ادامه می‌داد. شکل (۳) جدا شدن جریان غلیظ رسوبی از بستر و چگونگی حرکت جریان غلیظ میان‌گذر درون سیال پیرامون را نشان می‌دهد. عمق جریان رسوبی در نقطه جداشدگی جریان غلیظ میان‌گذر از بستر فلوم با hs معرفی شده است. جدول (۱) خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

تعداد	غلظت (گرم بر لیتر)				دبی (لیتر بر ثانیه)				شیب (درصد)
۱۶	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۲/۵	۲	۱/۵	۱	۲/۵
۱۶	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۲/۵	۲	۱/۵	۱	۳/۲۵
۱۶	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۲/۵	۲	۱/۵	۱	۴

جدول ۲- درصد افزایش ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی به ازای افزایش دبی از ۱ لیتر بر ثانیه به ۲/۵ لیتر بر ثانیه

افزایش دبی از ۱ تا ۲/۵ (لیتر بر ثانیه)	غلظت ورودی جریان غلیظ (گرم بر لیتر)	شیب ۲/۵ درصد	شیب ۳/۲۵ درصد	شیب ۴ درصد
	۵	۲۴	۲۶	۲۷
۱ – ۲/۵	۱۰	۲۷	۲۹	۳۴
	۱۵	۳۴	۳۸	۴۷
	۲۰	۴۲	۴۶	۵۰

تحلیل ابعادی

از آنجایی‌که هدف این پژوهش بررسی ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی جریان غلیظ از بستر می‌باشد، بنابراین پارامترهای حاکم را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$f(S, \rho_d, \rho_a, \rho_s, q, , h_s, g) = 0 \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، S شیب بستر فلوم، ρ_d چگالی جریان غلیظ رسوبی، ρ_a چگالی سیال پیرامون جریان غلیظ زیرگذر، ρ_s چگالی سیال پیرامون زیر جریان غلیظ در محل جداشدگی، q دبی ورودی در واحد عرض، h_s ارتفاع متوسط بدنه جریان غلیظ در نقطه جداشدگی و g شتاب ثقل می‌باشد. با استفاده از تحلیل ابعادی به روش π باکینگهام، سه پارامتر بی‌بعد مطابق رابطه (۶) حاصل شد که بر اساس پارامتر h_s مرتب شده و رابطه (۷) استخراج گردید.

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho_d}, \frac{q^2}{h_s^3 g'}, S\right) = 0 \qquad (۶)$$

$$h_s = f\left(\frac{\rho_s}{\rho_d}, s\right)\left(\frac{q^2}{g'}\right)^{1/3} \qquad (۷)$$

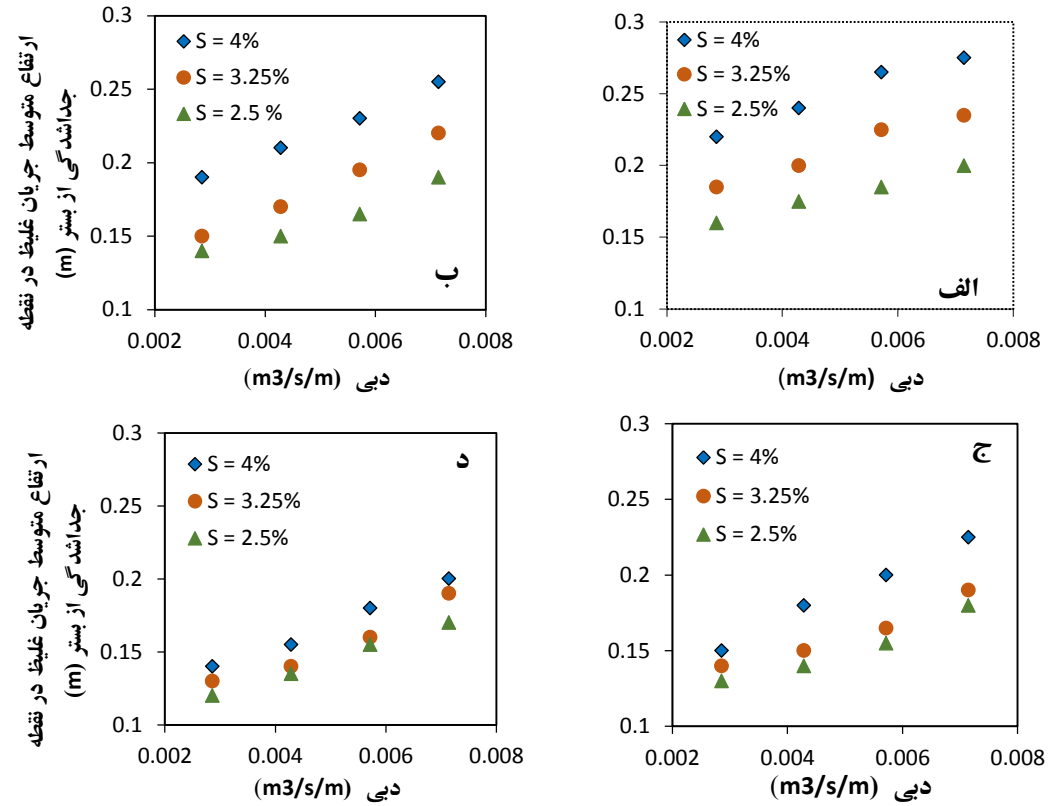
نسبت غلظت جریان غلیظ رسوبی (C_s) به غلظت سیال شور پیرامون (C_l) در نقطه جداشدگی جریان غلیظ از بستر، ازنظر ماهیت با نسبت چگالی‌ها در این نقطه برابر است. لذا می‌توان عبارت $\frac{C_l}{C_s}$ را جایگزین عبارت $\frac{\rho_s}{\rho_d}$ در رابطه (۷) کرد و به رابطه (۸) رسید.

$$h_s = f\left(\frac{C_l}{C_s}, s\right)\left(\frac{q^2}{g'}\right)^{1/3} \qquad (۸)$$

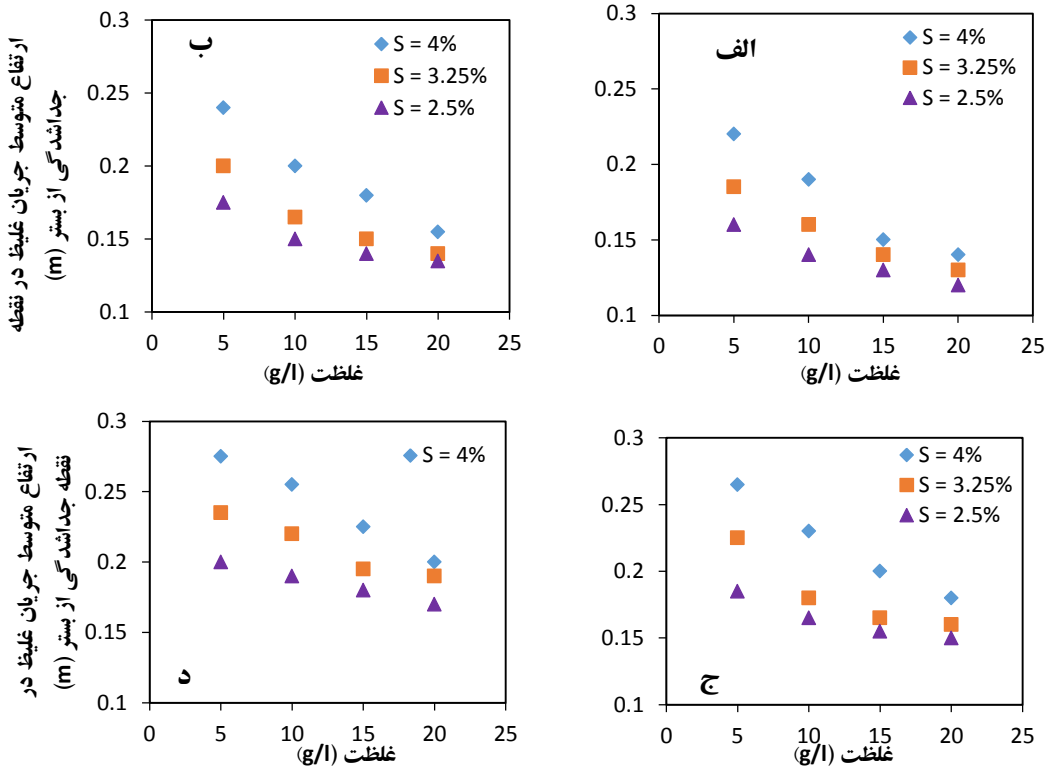
نتایج و بحث

در مطالعات انجام شده توسط محققین، تاکنون ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش سعی شد ضمن بررسی تغییرات ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی تحت تأثیر تغییر پارامترهای هیدرولیکی چون دبی و غلظت ورودی جریان غلیظ و همچنین شیب بستر، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ارتفاع جریان غلیظ در محل برخاستگی از بستر تحت تأثیر شرایط مختلف استخراج شود. بدین منظور تعداد ۴۸ آزمایش بر اساس مشخصات ذکر شده در جدول (۱) صورت پذیرفت.

به منظور بررسی اثر دبی جریان بر روی ارتفاع مذکور، مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر (h_s) در مقابل تغییرات دبی در شرایط شیب‌های متفاوت، برای تمام غلظت‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در یک غلظت ثابت برای تمامی شیب‌ها با افزایش مقدار دبی ورودی جریان غلیظ، مقدار ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی با روند خطی افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش فلاکس شناوری جریان تحت اثر افزایش دبی می‌باشد. به‌طور میانگین با افزایش دبی از یک لیتر بر ثانیه به ۲/۵ لیتر بر ثانیه، میزان ارتفاع جریان در نقطه جداشدگی ۳۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. در جدول (۲) درصد افزایش ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی به ازای افزایش دبی در تمامی شیب‌ها و غلظت‌ها آورده شده است.

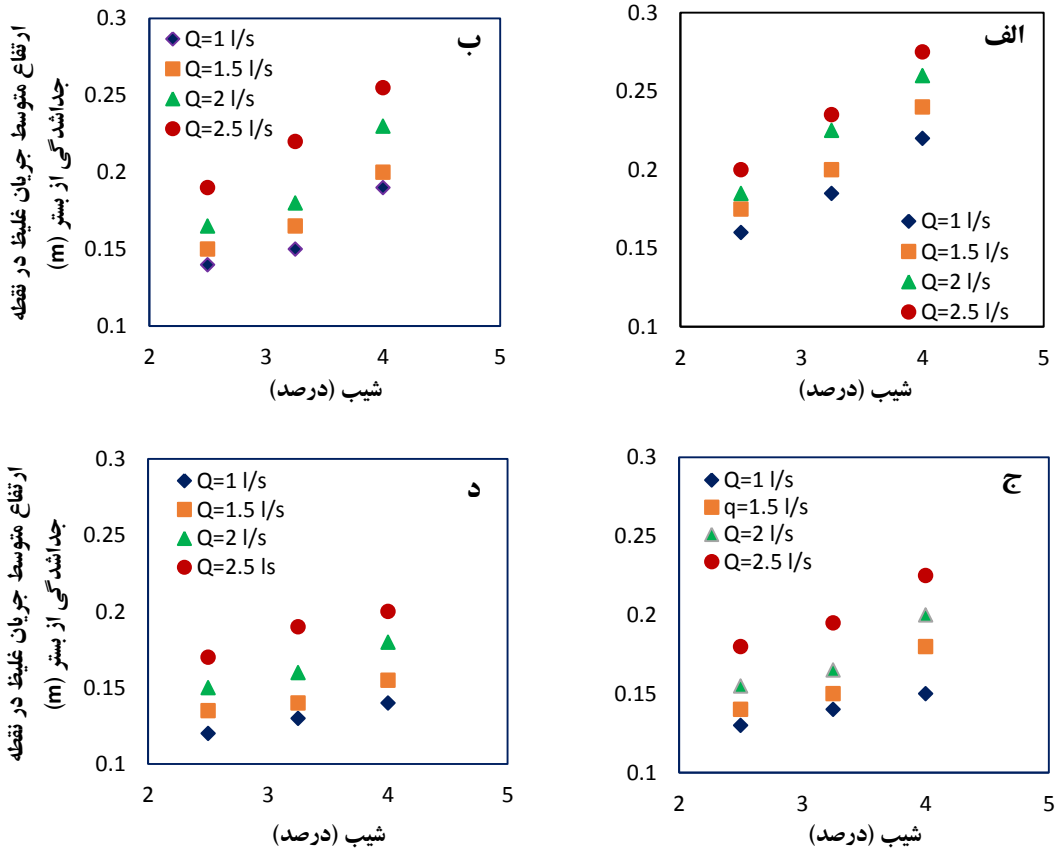


شکل ٤- مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در مقابل دبی ورودی جریان غلیظ رسوبی الف) غلظت ۵ گرم بر لیتر، ب) غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، ج) غلظت ۱۵ گرم بر لیتر، د) غلظت ۲۰ گرم بر لیتر



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در مقابل غلظت ورودی جریان غلیظ الف) دبی ۱ لیتر بر ثانیه، ب) دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، ج) دبی ۲ لیتر بر ثانیه، د) دبی ۲/۵ لیتر بر ثانیه

شکل (۵) محدوده تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در مقابل تغییرات غلظت ورودی جریان غلیظ را در تمامی شیب‌ها و دبی‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در یک دبی ثابت در تمامی شیب‌ها با افزایش غلظت ورودی جریان غلیظ، ارتفاع جریان در نقطه جداشدگی کاهش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش غلظت، جریان غلیظ چگال‌تر و سنگین‌تر شده و اثر کاهنده روی عمق جریان غلیظ در نقطه جداشدگی دارد. با افزایش غلظت از پنج گرم بر لیتر به ۲۰ گرم بر لیتر، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی به‌طور میانگین به ازای تمامی شیب‌ها در دبی‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۳۱ درصد، ۲۹ درصد، ۲۷ درصد و ۲۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. برای بررسی اثر شیب، شکل (۶) که تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی را در مقابل تغییرات شیب به ازای تمامی دبی‌ها و غلظت‌ها نشان می‌دهد، رسم گردید. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش شیب بستر، ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی افزایش یافته است که روند افزایش خطی می‌باشد. اما این تأثیر افزاینده شیب در غلظت‌های متفاوت روند یکنواختی را دنبال نمی‌کند. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود شیب تغییرات با افزایش غلظت ورودی جریان غلیظ کاهش یافته است. در واقع با افزایش غلظت جریان ورودی، میزان حساسیت ارتفاع متوسط بدنه به تغییرات شیب کاهش می‌یابد بطوریکه هرچه غلظت ورودی جریان غلیظ کمتر باشد، افزایش عمق جداشدگی تحت تأثیر شیب، بیشتر و هر چه غلظت ورودی بیشتر شود، شیب تأثیر کمتری را روی افزایش ارتفاع متوسط جریان در محل جداشدگی نشان می‌دهد. به منظور درک بهتر این موضوع، درصد تغییرات ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی تحت اثر تغییرات شیب و غلظت به ازای تمام دبی‌ها در جدول (۳) برآورد شده است. به‌طور میانگین با افزایش شیب از ۲/۵ درصد به ۴ درصد، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی به ازای تمامی دبی‌ها و غلظت‌ها به مقدار ۲۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقدار عدد فرود دنسیمتریک جریان غلیظ رسوبی در نقطه جداشدگی از بستر بر اساس رابطه (۲) برای تمامی آزمایش‌ها محاسبه شد که خلاصه نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. از آنجائی که عدد فرود دنسیمتریک در تمامی حالات کمتر از عدد یک بوده است، بنابراین در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش جریان غلیظ در نقطه جداشدگی زیربحرانی بوده است. همچنین بیشترین مقدار عدد فرود دنسیمتریک در شیب ۲/۵ درصد و کمترین مقدار آن در شیب ۴ درصد مشاهده شد.



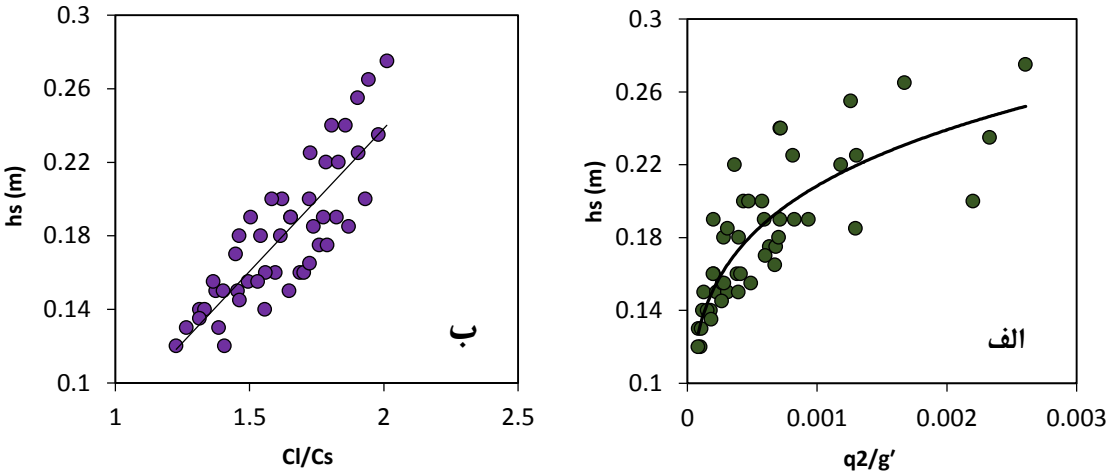
شکل ٦- مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در مقابل شیب الف) غلظت ۵ گرم بر لیتر، ب) غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، ج) غلظت ۱۵ گرم بر لیتر، د) غلظت ۲۰ گرم بر لیتر

جدول ۳- میزان درصد افزایش ارتفاع متوسط بدنه جریان غلیظ در نقطه جداشدگی به ازای افزایش شیب بستر و غلظت جریان ورودی

غلظت (گرم بر لیتر)	شیب ۲/۵ درصد به ۳/۲۵ درصد	شیب ۲/۵ درصد به ۴ درصد
۵	۱۷/۳	۳۸/۹
۱۰	۱۲/۳	۳۵/۷
۱۵	۸/۵	۲۴/۸
۲۰	۶/۵	۱۷

جدول ٤- مقادیر حداقل و حداکثر عدد فرود دنسیمتریک (Fr_s) در نقطه جداشدگی

شیب (درصد)	کمترین Fr_s	بیشترین Fr_s
۲/۵	۰/۲۲	۰/۴۶
۳/۲۵	۰/۱۸	۰/۴۱
۴	۰/۱۷	۰/۳۴



شکل ۷- تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در برابر الف) تغییرات پارامتر $\frac{q^2}{g'}$ ، ب) تغییرات پارامتر $\frac{C_l}{C_s}$

پس از انجام آزمایش‌های جریان غلیظ با توجه به رابطه (۸)، پارامتر ارتفاع متوسط جریان تابعی از شب بستر، پارامتر $\frac{q^2}{g'}$ و پارامتر نسبت غلظت‌ها در نقطه جداشدگی از بستر $\frac{C_l}{C_s}$ در نظر گرفته شد. شکل (۷) تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ را در برابر تغییرات پارامترهای $\frac{q^2}{g'}$ و $\frac{C_l}{C_s}$ به‌طور جداگانه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش پارامترهای $\frac{q^2}{g'}$ و $\frac{C_l}{C_s}$ مقادیر ارتفاع اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد که روند افزایش ارتفاع مذکور در اثر افزایش پارامتر $\frac{q^2}{g'}$ به شکل توانی و در اثر افزایش پارامتر $\frac{C_l}{C_s}$ به صورت خطی است.

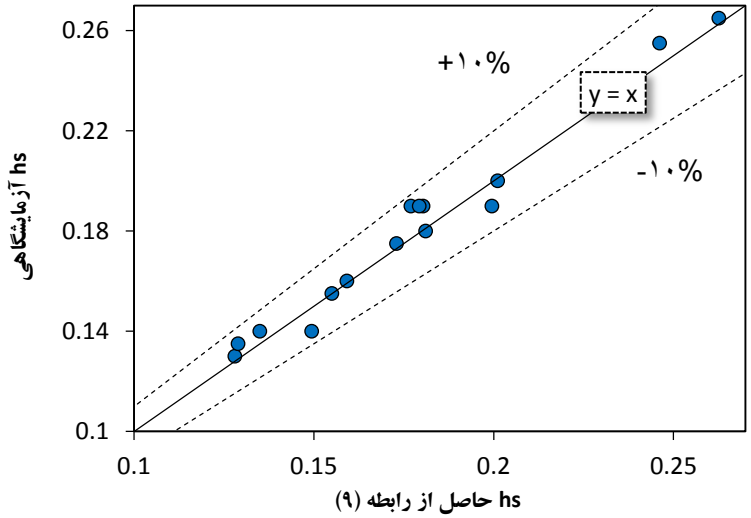
به منظور تخمین ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر، ایجاد مدلی بر اساس پارامترهای بی‌بعد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به معادله (۸) و ارتباط پارامترهای $\frac{q^2}{g'}$ ، s و $\frac{C_l}{C_s}$ با پارامتر h_s بر اساس شکل‌های (۶) و (۷)، روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب بر اساس نتایج ۶۰ درصد و ۸۰ درصد از داده‌های آزمایشگاهی حاضر از طریق رگرسیون غیرخطی توسط نرم‌افزار spss برای ارتباط دادن پارامترهای موثر استخراج گردید. رابطه

(۹) یک رابطه با بعد است که ضریب همبستگی بین پارامترهای این رابطه برابر با ۰/۹۲ می‌باشد. در صورتی که رابطه (۱۰) یک رابطه بی بعد با ضریب همبستگی ۰/۷۵ است. در روابط زیر پارامتر h_s بر حسب متر بوده و برای نتایج حاصل از این پژوهش استخراج شده است.

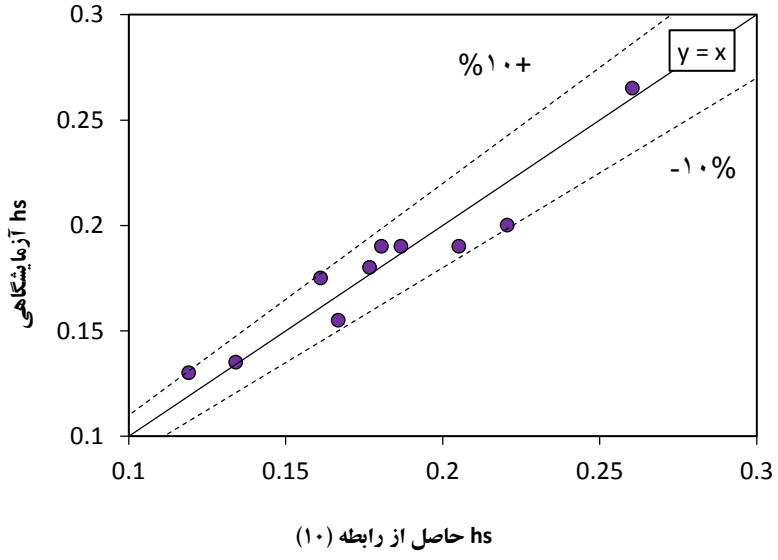
$$h_s = \left(4.298\ \frac{C_l}{C_s}\ S + 0.246\right)\left(\frac{q^2}{g'}\right)^{0.127} \qquad (۹)$$

$$h_s = (-1.104\ \frac{C_l}{C_s} + 39.512\ S + 2.817)\left(\frac{q^2}{g'}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (۱۰)$$

به منظور صحت سنجی روابط (۹) و (۱۰) مقادیر h_s آزمایشگاهی در برابر h_s محاسباتی به ازای درصد مقادیر باقی‌مانده از دادها در شکل‌های (۸) و (۹) رسم گردید. نتیجه این شکل‌ها نشان می‌دهد که روابط (۹) و (۱۰) همگرایی قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.



شکل ۸- نتایج حاصل از مدل‌سازی رابطه (۹) برای نقطه جداشدگی جریان غلیظ



شکل ۹- نتایج حاصل از مدل‌سازی رابطه (۱۰) برای نقطه جداشدگی جریان غلیظ

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق که به منظور مطالعه آزمایشگاهی ارتفاع بدنه جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر صورت گرفته است به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر، تحت اثر تغییرات دبی ورودی جریان غلیظ بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش دبی، ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی افزایش می‌یابد. به‌طور میانگین با افزایش دبی از ۱ لیتر بر ثانیه به ۲/۵ لیتر بر ثانیه، مقدار ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی به ازای تمام شیب‌ها در غلظت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم در لیتر به ترتیب ۲۶، ۳۰، ۴۰ و ۴۶ درصد افزایش پیدا می‌کند.

۲- تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر، تحت اثر تغییرات غلظت ورودی جریان غلیظ بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش غلظت ورودی سیال رسوبی، مقادیر ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش غلظت از ۵ گرم بر لیتر به ۲۰ گرم بر لیتر، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی به‌طور میانگین به ازای تمامی شیب‌ها در دبی‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۳۱، ۲۹، ۲۷ و ۲۱ درصد کاهش پیدا می‌کند.

۳- تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر، تحت اثر تغییرات شیب بستر فلوم بررسی گردید و ملاحظه شد که با افزایش شیب بستر، مقادیر ارتفاع مذکور افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش غلظت جریان غلیظ، تأثیر افزاینده شیب کاهش می‌یابد. به‌طور میانگین با افزایش شیب از ۲/۵ درصد به ۴ درصد، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشدگی به ازای تمامی دبی‌ها و غلظت‌ها به مقدار ۲۹ درصد افزایش پیدا می‌کند.

۴- در این تحقیق عدد فرود دنسیمتریک در نقطه جداشدگی از بستر برای سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد به‌طور جداگانه محاسبه گردید و نتایج حاصل نشان داد که جریان در نقطه جداشدگی از بستر به علت کمتر بودن مقدار عدد فرود دنسیمتریک از عدد یک، برای هر سه شیب زیربحرانی است. همچنین محدوده عدد فرود دنسیمتریک در نقطه جداشدگی بین مقادیر ۰/۱۷ تا ۰/۴۶ محاسبه شد.

۵- با استفاده از تحلیل ابعادی بر اساس پارامترهای مؤثر، دو رابطه با و بدون بعد برای پیش‌بینی ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی، به ترتیب بر اساس نتایج حاصل از ۶۰ درصد و ۸۰ درصد آزمایش‌ها، با استفاده از رگرسیون غیرخطی نرم‌افزار spss با ضریب همبستگی ۰/۹۲ و ۰/۷۵ استخراج گردید و توسط سایر مقادیر باقی‌مانده از داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روابط مذکور با دقت قابل قبولی داده‌های آزمایشگاهی را برآورد می‌کنند.

منابع

1- Alavian, V., Jirka, G.H., Denton, R.A., Johnson, M.C. and Stefan, H.G., 1992. Density currents entering lakes and reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, *118*(11), pp.1464-1489.

2- An, S. and Julien, P.Y., 2014. Three-dimensional modeling of turbid density currents in Imha Reservoir, South Korea. *Journal of hydraulic engineering*, *140*(5), p.05014004.

3- Farrell, G.J. and Stefan, H.G., 1986. Buoyancy induced plunging flow into reservoirs and coastal regions. Project Report No. 241, National Science Foundation, Washingtaon, D. C. 20550. pp.252.

4- Ghomeshi, M. and Haghbin, A., 2013. Analysis of salinity in Gotvand dam and its effect on Karun River. In *4th National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran*. (In Persian).

5- Goleij, H., 2014. Experimental investigation on plunge point depth of gravity current. *Iranian Water Research Journal, 14(8)*, pp.217-222. (In Persian).

6- Kao, T.W., 1977. Density currents and their applications. *Journal of the Hydraulics Division*, *103*(ASCE 12947), pp.543-555.

7- Lee, H. and W. Yu., 1997. Experimental Study of Reservoir Turbidity Current. *Journal of Hydraulic Engineering, 123(6)*, pp.520-528.

8- Nokes, R.I., Davidson, M.J., Stepien, C.A., Veale, W.B. and Oliver, R.L., 2008. The front condition for intrusive gravity currents. *Journal of Hydraulic Research*, *46*(6), pp.788-801.

9- Sarvari Nezhad, S. B., Ghomeshi, M. and Bina. M., 2012 .Evaluating the Water Entrainment of Density Current in Converging Reaches and Compare it with Constant and Diverging Reaches. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering, 36(3)*, pp.13-22. (In Persian).

10- Savage, S.B. and Brimberg. J., 1975. Analysis of plunging phenomena in water resource. *Journal of Hydraulic Research, IAHR, 13(2)*, pp.187-204.

11- Singh, B. and Shah, C.R., 1971. Plunging phenomenon of density currents in reservoirs. *La Houille Blanche*, (1), pp.59-64.

12- Turner, J.S., 1979. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge University Press.

13-Wells, M. and Nadarajah. P., 2009. The Intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies. *Journal of Physical Oceanography, 39(8)*, pp.1935-1947.

14- Zhang, X.F., Ren, S., Lu, J.Q. and Lu, X.H., 2015. Effect of thermal stratification on interflow travel time in stratified reservoir. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *16*(4), pp.265-278.

Irrigation Sciences and Engineering Vol. 41, No. 3, Fall 2018, p. 61-74

Shahid Chamran University of Ahvaz

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study of Sedimentary Interflow Density Current Body Height in Separation Point From Bed

L. Hashemi[1] and M. Ghomeshi[2]*

1- M.Sc. Graduated Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz.

2* - Corresponding Author, Professor, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz.*(m.ghomeshi@yahoo.com).*

Received: 10 October 2016 Accepted: 22 January 2017

Keywords: Interflow density current, Separation point, Height of current.

Introduction

Underflow density currents traveling through density-stratified fluids begin to separate from the bed as they reach areas of similar densities, after which they continue their path as interflows through the surrounding ambient fluid. This point, which is referred to as "separation point" of density currents, acts as the boundary between the underflow and interflow density currents. A density current within a stratified environment is known as intrusive gravity currents (IGC), which travel horizontally at a roughly constant velocity U within the stratified layer after propagation (Nokes et al., 2008). Regarding underflow density currents, efforts have been made by many researchers *e.g.* Singh, and Shah (1971), Lee, and Yu (1997) and Farrell, and Stefan (1986) in the past decades to determine the location of the plunge point of underflow density currents (which is similar to the separation point in interflow currents) using experimental and theoretical methods based on the Densimetric Froude Number at the plunge point $F_{p.}$ Although studies have been conducted on interflow density currents, including Kao (1977), Wells, and Nadarajah (2008), An, and Julien (2014) and Zhang et al. (2015). Not any research has been found in the literatures about the height of density current at the point of separation from the bed. Hence, in addition to examining the height variations in density currents at the separation point with respect to changes in hydraulic parameters such as flow rate, density of the flow at the inlet, as well as the bed slope, the present study attempted to derive a relation for prediction of density current height at the point of separation from the bed under different conditions.

Methodology

A total of 48 experiments were conducted at different densities and flow rates in a gradient flume to investigate the height variations at the separation point in density currents. An opening gate was implemented at the beginning of the flume and the space behind which was used as the tank for input turbidity current. To prepare a fluid with saline stratification in the flume, dense ambient saline water was prepared by dissolution salt in water in a container. After reaching to the desired salinity, the saline water was pumped into the flume through the opening up to a covering of 1-m distance. Then, the tap water was released over the saline water with a low velocity to allow formation of the desired fluid with saline stratification using the diffusion phenomenon. After formation of the fluid with saline stratification, the salinity level at different flume cross-sections was measured by using the digital EC meter. On the other hand, the density sedimentary current (which is a mixture of silica and water) was prepared in a separate tank and conveyed into the container behind the entrance gate at a certain flow rate through an inlet valve. When the turbidity fluid in the container reached to the same height as that of the ambient fluid in

the flume, the sliding gate was immediately opened to allow the turbidity current enter the flume with saline stratification fluid. In this case, the sedimentary density current initially moved as an underflow current due to its heavier weight compared to the surrounding fluid layers. When the current reached to a layer with same density, the turbidity current was separated from the flume bed and penetrated the surrounding fluid as an interflow density current. A summary of the experiments conducted in this project is provided in Table 1.

Table 1- A summary of the experiments conducted in this research

Number	*Slope (%)*	*Discharge (l/s)*				*Concentration (g/l)*			
16	2.5	1	1.5	2	2.5	5	10	15	20
16	3.25	1	1.5	2	2.5	5	10	15	20
16	4	1	1.5	2	2.5	5	10	15	20

Results and Discussion

In this study the average height of the density current at the point of separation from the bed was investigated with respect to the flow rate and density of the current at the inlet as well as the slope of the flume. It was found that the average flow height at the separation point was increased by increasing the flow rate. In summary, by increasing the flow rate from 1 l/s to 2.5 l/s, the average height of the density current at the separation point for all slopes was increased by 26, 30, 40, and 46% at concentrations of 5, 10, 15, and 20 g/l, respectively. Based on the density results, by increasing the density of the turbidity current, the average height of the flow at the separation point was decreased, such that by increasing the density from 5 g/l to 20 g/l, the average height of the flow in all flume slopes was decreased by 31, 20, 27, and 21 percent at flow rates of 1, 1.5, 2, and 2.5 l/s, respectively. The results showed that when the bed slopes were changed to the higher bed slope, the aforementioned heights were increased. However, this increasing effect was attenuated as the concentration of the density current was increased. At all cases, by increasing the slope from 2.5% to 4%, the average height of the flow at the separation point for all the flow rates and densities was increased by 29%.

The Densimetric Froude Number at the plunge point was calculated for three different slopes (2.5, 3.25, and 4 percent). Based on the results, for all these slopes, the flow at the point of separation from the bed assumes a subcritical state due to the Densimetric Froude Number lower than 1. Moreover, the Densimetric Froude Number ranges at the separation point was calculated from 0.17 to 0.46.

Ultimately, dimensional analysis was applied on the effective parameters to extract a dimensional and a dimensionless relation to predict the height of density current at the separation point. The dimensional and dimensionless relationships were obtained using nonlinear regression method by statistical analysis (SPSS) based on 60% and 80% of the experimental results with correlations of 0.92 and 0.75, respectively obtained. The remaining data were used for verification purposes. It was concluded that the proposed relations were able to estimate these perimeters with acceptable accuracy.

References

1-An, S. and Julien, P.Y., 2014. Three-dimensional modeling of turbid density currents in Imha Reservoir, South Korea. *Journal of hydraulic engineering*, *140*(5), p.05014004.

2-Farrell, G.J. and Stefan, H.G., 1986. Buoyancy induced plunging flow into reservoirs and coastal regions. Project Report No. 241, National Science Foundation, Washingtaon, D. C. 20550. pp.252.

3-Kao, T.W., 1977. Density currents and their applications. *Journal of the Hydraulics Division*, *103*(ASCE 12947), pp.543-555.

4-Lee, H. and W. Yu., 1997. Experimental Study of Reservoir Turbidity Current. *Journal of Hydraulic Engineering, 123(6)*, pp.520-528.

5-Nokes, R.I., Davidson, M.J., Stepien, C.A., Veale, W.B. and Oliver, R.L., 2008. The front condition for intrusive gravity currents. *Journal of Hydraulic Research*, *46*(6), pp.788-801.

6-Singh, B. and Shah, C.R., 1971. Plunging phenomenon of density currents in reservoirs. *La Houille Blanche*, (1), pp.59-64.

7-Wells, M. and Nadarajah. P., 2008. The Intrusion depth of density currents flowing into stratified water bodies. *Journal of Physical Oceanography, 39(8)*, pp.1935-1947.

8-Zhang, X.F., Ren, S., Lu, J.Q. and Lu, X.H., 2015. Effect of thermal stratification on interflow travel time in stratified reservoir. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, *16*(4), pp.265-278.