

## بررسی آزمایشگاهی ارتفاع بدنه جریان غلیظ رسوبی میان گذر در نقطه جدشدگی از بستر

لیلا هاشمی<sup>۱</sup> و مهدی قمشی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموزانه 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 پذیرش: ۹۵/۱۱/۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۱۹

### 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 جدشدگی 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 جدشدگی 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 جدشدگی 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 جدشدگی استخراج شد.

**کلید واژه‌ها:** جریان غلیظ میان‌گذر، نقطه جدشدگی، ارتفاع جریان.

### مقدمه

می‌باشد (Sarvari Nezhad et al., 2012). از آنجایی 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.

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h \cos \theta}} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $Fr_d$  عدد فرود دنسیمتریک،  $U$  سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ،  $h$  ضخامت بدنه جریان و  $\theta$  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 به صورت زیر بیان می‌گردد (Alavian, et al., 1992).

$$B = g'hU = gR(C_s Uh) = g'q \quad (3)$$

جریان‌های غلیظ یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در رسوب‌گذاری مخازن می‌باشند. هنگامی که 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، از این‌رو 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:

$$g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} = g \frac{(\rho_d - \rho_a)}{\rho_a} \quad (1)$$

در این رابطه  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho_d$  و  $\rho_a$  به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ،

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.

$$N = \sqrt{-\frac{g}{\bar{\rho}} \frac{d\rho}{dz}} \quad (4)$$

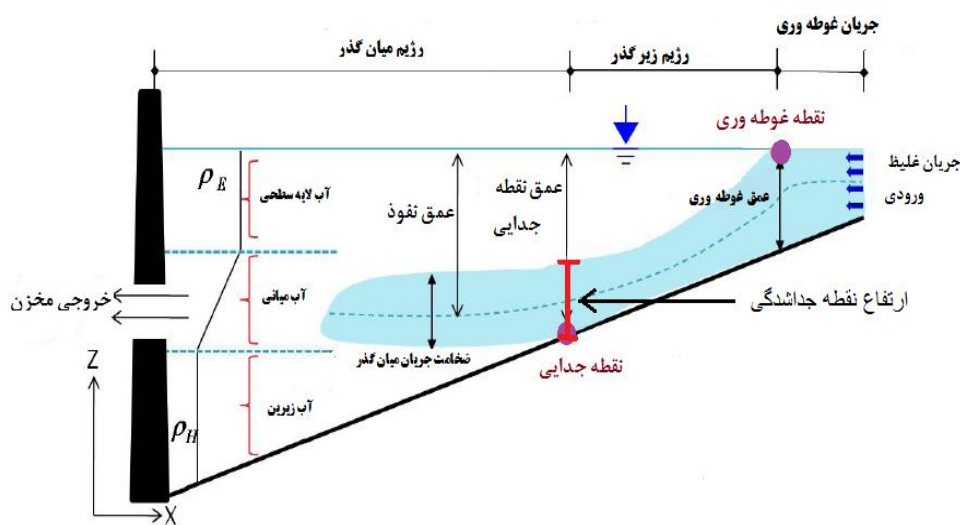
در رابطه فوق  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط سیال پیرامون و  $\frac{d\rho}{dz}$  تغییرات چگالی در عمق می‌باشد.

خصوصیات نقطه جدشدگی 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 جدشدگی در جریان میان‌گذر می‌باشد) را با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و تئوری بر اساس عدد فرود دنسیمیتریک 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  $0.03$  تا  $0.78$  در شیب ملایم اتفاق می‌افتد.

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 کاهش  $\Delta\rho/\rho_a$  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 طوری که 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. وقتی که 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 جدشدگی (Separation point) می‌گویند. فاکتورهای مؤثر در جدشدگی 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.



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

شبیه‌سازی کردند و سرعت جریان میان‌گذر را از طریق تحلیل ابعادی بر اساس قانون بقای انرژی پیش‌بینی کردند و در نهایت 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.

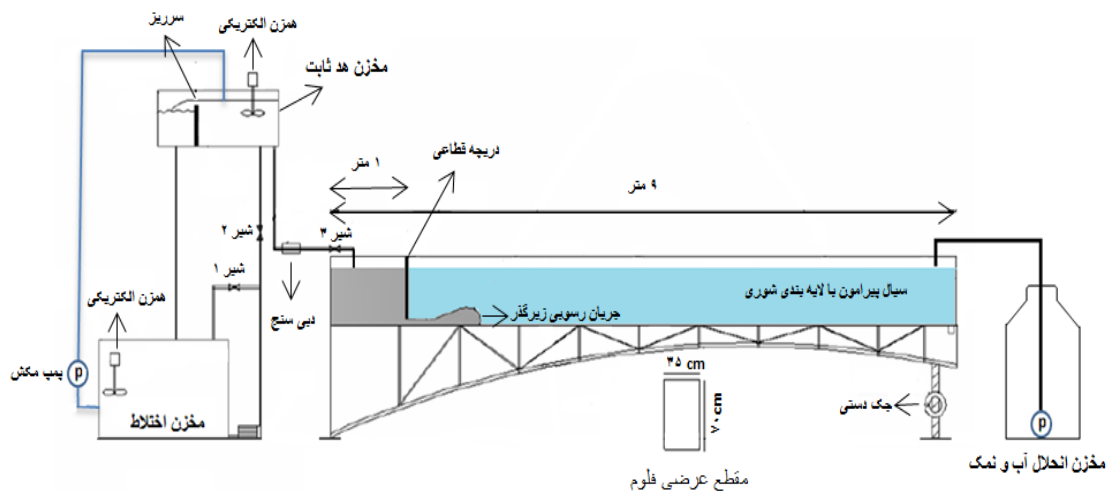
### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تغییرات ارتفاع جریان غلیظ در محل جداشتگی، 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

Shah and Singh (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  $F_p = 0.67$  را به دست آوردند که به‌وسیله Lee و Yu (1997) و Stefan و Farrell (1986) تأیید شد. Lee و Yu (1997) نشان دادند که نقطه غوطه‌وری می‌تواند برای رسیدن به شرایط پایدار با زمان به پایین دست حرکت کند ( $F_p = 1$ ) در ابتدا نقطه غوطه‌وری و  $F_p = 0.6$  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. Golejz (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 غوطه‌وری 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 ایماها واقع در کره شمالی را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اگر غلظت جریان‌های رودخانه در طول ماه‌های تابستان می‌تواند 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، نشست آلودگی به درون مخزن را

هاشمی و قمشی: بررسی آزمایشگاهی ارتفاع بدنه جریان غلیظ ...



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



شکل ۳- نمایش نقطه جدشدگی جریان غلیظ و ارتفاع نظیر آن هنگام نفوذ به درون سیال پیرامون لایه بندی شده

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. در نهایت جریان رسوبی به وسیله 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 به صورت 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 به صورت 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 جدشدگی جریان غلیظ میان‌گذر از بستر فلوم با  $hs$  معرفی شده است. جدول (۱) خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

سمت سطح آب کاهش می‌یافت. بعد از تشکیل لایه بندی 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  $6/88$  میکرون،  $Gs$  برابر با  $2/67$  و  $\sigma_g$  برابر با  $4/8$ ، 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. هنگامی که ارتفاع سیال غلیظ در محفظه با ارتفاع سیال لایه بندی در فلوم برابر می‌شد، دریچه کشویی برای ورود جریان غلیظ رسوبی به درون سیال لایه بندی شوری به طور 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

جدول ۱- خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

تعداد	غلظت (گرم بر لیتر)				دبی (لیتر بر ثانیه)				شیب (درصد)
۱۶	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۲/۵
۱۶	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳/۲۵
۱۶	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۱	۱/۵	۲	۲/۵	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
۲/۵ - ۱	۵	۲۴	۲۶	۲۷
	۱۰	۲۷	۲۹	۳۴
	۱۵	۳۴	۳۸	۴۷
	۲۰	۴۲	۴۶	۵۰

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

تحلیل ابعادی

از آنجایی که هدف این پژوهش بررسی ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی جریان غلیظ از بستر می‌باشد، بنابراین پارامترهای حاکم را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

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

در رابطه فوق،  $S$  شیب بستر فوم،  $\rho_d$  چگالی جریان غلیظ رسوبی،  $\rho_a$  چگالی سیال پیرامون جریان غلیظ زیرگذر،  $\rho_s$  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  $\pi$  باکینگهام، سه پارامتری بعد مطابق رابطه (۶) حاصل شد که بر اساس پارامتر  $h_s$  مرتب شده و رابطه (۷) استخراج گردید.

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

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

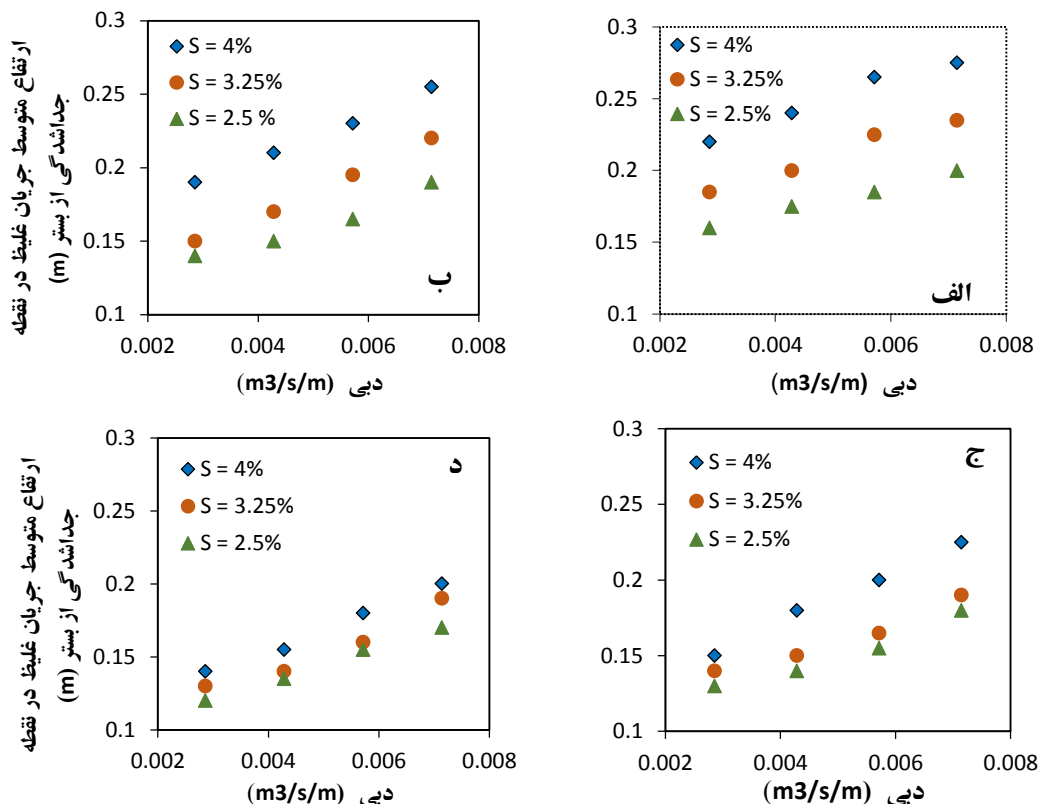
نسبت غلظت جریان غلیظ رسوبی ( $C_s$ ) به غلظت سیال شور پیرامون ( $C_l$ ) در نقطه جداشدگی جریان غلیظ از بستر، از نظر ماهیت با نسبت چگالی‌ها در این نقطه برابر است. لذا می‌توان عبارت  $\frac{C_l}{C_s}$  را جایگزین عبارت  $\frac{\rho_s}{\rho_d}$  در رابطه (۷) کرد و به رابطه (۸) رسید.

نتایج و بحث

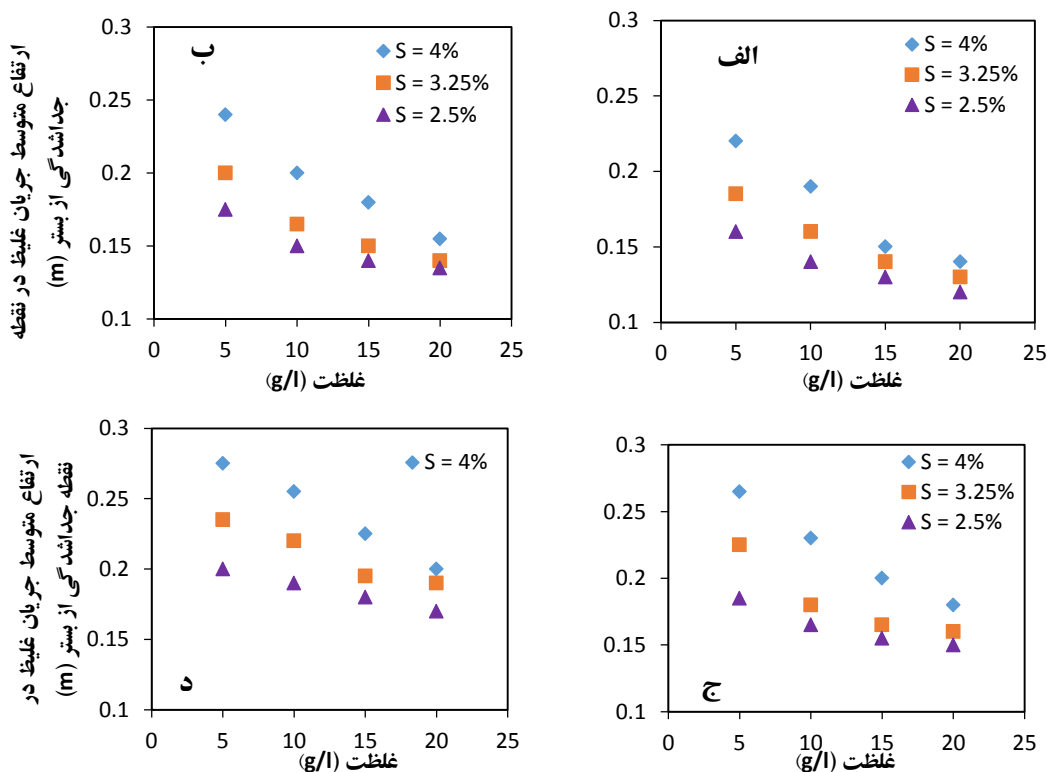
در مطالعات انجام شده توسط محققین، تاکنون ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی از بستر مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این پژوهش سعی شد ضمن بررسی تغییرات ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشدگی تحت تأثیر تغییر پارامترهای هیدرولیکی چون دبی و غلظت ورودی جریان غلیظ و همچنین شیب بستر، رابطه‌ای جهت پیش‌بینی ارتفاع جریان غلیظ در محل بر خاستگی 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.

هاشمی و قمشی: بررسی آزمایشگاهی ارتفاع بدنه جریان غلیظ ...



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جدشدگی 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

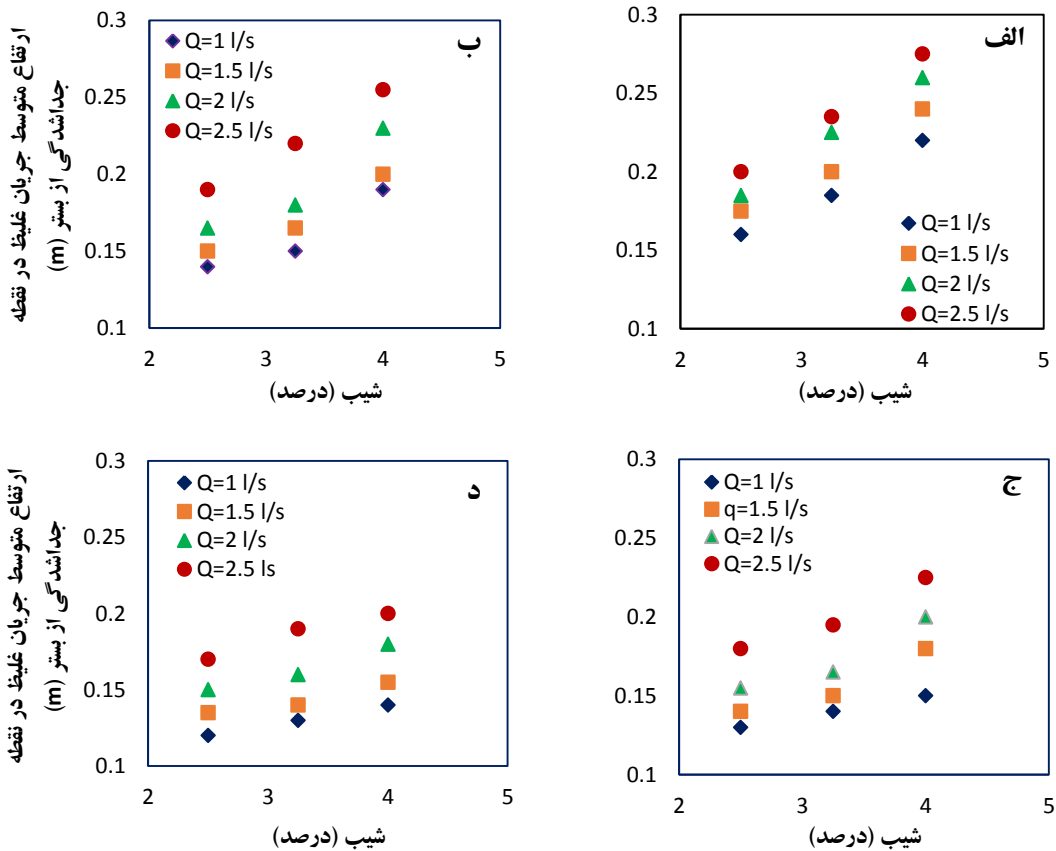


شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جدشدگی در مقابل غلظت ورودی جریان غلیظ (الف) دبی ۱ لیتر بر ثانیه، (ب) دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، (ج) دبی ۲ لیتر بر ثانیه، (د) دبی ۲/۵ لیتر بر ثانیه



ورودی، میزان حساسیت ارتفاع متوسط بدنه به تغییرات شیب کاهش می‌یابد بطوریکه هرچه غلظت ورودی جریان غلیظ کمتر باشد، افزایش عمق جداشتگی تحت تأثیر شیب، بیشتر و هر چه غلظت ورودی بیشتر شود، شیب تأثیر کمتری را روی افزایش ارتفاع متوسط جریان در محل جداشتگی نشان می‌دهد. به منظور درک بهتر این موضوع، درصد تغییرات ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشتگی 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 جداشتگی به ازای تمامی دبی‌ها و غلظت‌ها به مقدار ۲۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقدار عدد فرود دنسیمتریک جریان غلیظ رسوبی در نقطه جداشتگی 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 جداشتگی 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 (۵) محدوده تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداشتگی 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 جداشتگی کاهش پیدا می‌کند. در واقع با افزایش غلظت، جریان غلیظ چگال‌تر و سنگین‌تر شده و اثر کاهنده روی عمق جریان غلیظ در نقطه جداشتگی دارد. با افزایش غلظت از پنج گرم بر لیتر به ۲۰ گرم بر لیتر، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداشتگی 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 جداشتگی 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 جداشتگی افزایش یافته است که روند افزایش خطی می‌باشد. اما این تأثیر افزایش 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



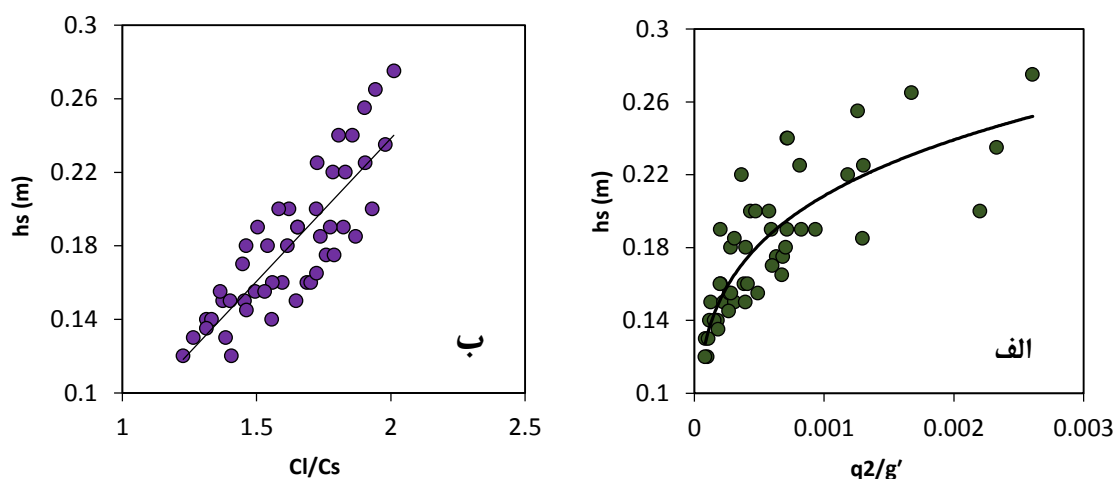
شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداشتگی در مقابل شیب الف) غلظت ۵ گرم بر لیتر، ب) غلظت ۱۰ گرم بر لیتر، ج) غلظت ۱۵ گرم بر لیتر، د) غلظت ۲۰ گرم بر لیتر

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 ۴- 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  $\frac{C_L}{C_S}$

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 بی بعد 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

پس از انجام آزمایش‌های جریان غلیظ با توجه به رابطه (۸)، پارامتر ارتفاع متوسط جریان تابعی از شیب 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  $\frac{C_L}{C_S}$  به طور جداگانه نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش پارامترهای  $\frac{C_L}{C_S}$  و  $\frac{q^2}{g'}$  مقادیر ارتفاع اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد که روند افزایش

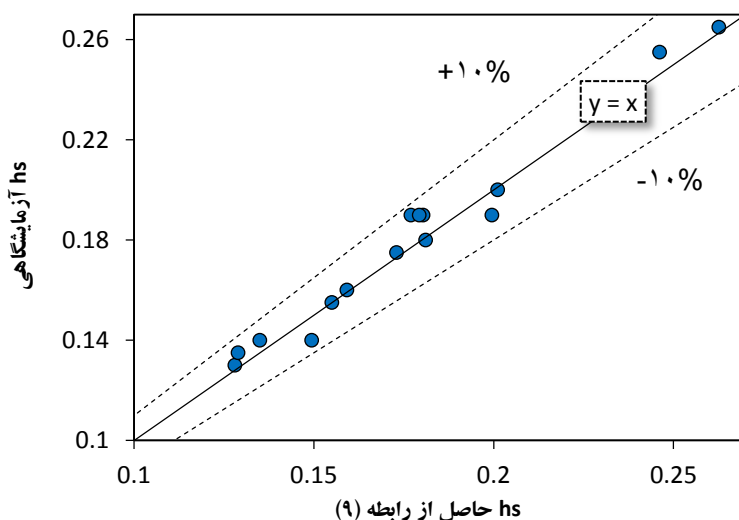


$$h_s = (-1.104 \frac{C_1}{C_s} + 39.512 S + 2.817) \left(\frac{q^2}{g'}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

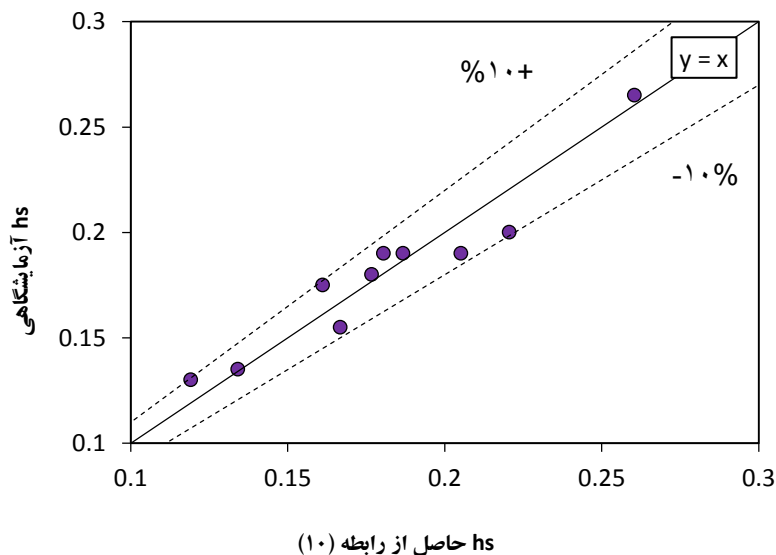
به منظور صحت سنجی روابط (۹) و (۱۰) مقادیر  $h_s$  آزمایشگاهی در برابر  $h_s$  محاسباتی به ازای درصد مقادیر باقی مانده از داده‌ها در شکل‌های (۸) و (۹) رسم گردید. نتیجه این شکل‌ها نشان می‌دهد که روابط (۹) و (۱۰) همگرایی قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی دارند.

(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.

$$h_s = \left(4.298 \frac{C_1}{C_s} S + 0.246\right) \left(\frac{q^2}{g'}\right)^{0.127} \quad (9)$$



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



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

### نتیجه گیری

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

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

۲- تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداسازی 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 جداسازی کاهش می یابد به طوری که با افزایش غلظت از ۵ گرم بر لیتر به ۲۰ گرم بر لیتر، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداسازی به طور میانگین به ازای تمامی شیبها در دبی های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۳۱، ۲۹، ۲۷ و ۲۱ درصد کاهش پیدا می کند.

۳- تغییرات ارتفاع متوسط جریان غلیظ در نقطه جداسازی از بستر، تحت اثر تغییرات شیب بستر فلوم بررسی گردید و ملاحظه شد که با افزایش شیب بستر، مقادیر ارتفاع مذکور افزایش پیدا می کند اما با افزایش غلظت جریان غلیظ، تأثیر افزایش شیب کاهش می یابد. به طور میانگین با افزایش شیب از ۲/۵ درصد به ۴ درصد، میزان ارتفاع متوسط جریان در نقطه جداسازی به ازای تمامی دبی ها و غلظت ها به مقدار ۲۹ درصد افزایش پیدا می کند.

۴- در این تحقیق عدد فرود دنسیمتریک در نقطه جداسازی از بستر برای سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ درصد به طور جداگانه محاسبه گردید و نتایج حاصل نشان داد که جریان در نقطه جداسازی از بستر به علت کمتر بودن مقدار عدد فرود دنسیمتریک از عدد یک، برای هر سه شیب زیر بحرانی است. همچنین محدوده عدد فرود دنسیمتریک در نقطه جداسازی 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 پیش بینی ارتفاع جریان غلیظ در نقطه جداسازی، به ترتیب بر اساس نتایج حاصل از ۶۰ درصد و ۸۰ درصد آزمایشها، با استفاده از رگرسیون غیرخطی نرم افزار SPSS با ضریب همبستگی ۰/۹۲ و ۰/۷۵ استخراج گردید و توسط سایر مقادیر باقی مانده از داده ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روابط مذکور با دقت قابل قبولی داده های آزمایشگاهی را برآورد می کنند.

### 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, Washington, 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.