



بررسی آزمایشگاهی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر رسوبی در سیال با لایه‌بندی شوری

کیما کمایی^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 ghomeshi@yahoo.com

پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۲

بازنگری: ۱۳۹۷/۱/۲۰

دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۶

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که پس از احداث سد به وجود می‌آید، پدیده رسوب‌گذاری در مخزن سد می‌باشد. آگاهی از وضعیت سرعت پیشانی جریان غلیظ یکی از پارامترهایی است که در مخازن سدها بسیار حایز اهمیت است. به منظور بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در سیال با لایه‌بندی شوری یک سری آزمایش جریان غلیظ انجام شد. جریان غلیظ رسوبی در یک فلوم به طول ۸ متر، عرض ۳۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر با چهار دبی یک، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه، چهار غلظت پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر و سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و ۴ در صد ایجاد گردید. نتایج نشان داد که با افزایش هر یک از پارامترهای دبی، غلظت و شیب، سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداسازی افزایش می‌یابد. با استفاده از نرم افزار SPSS ضریب رابطه کولگان در نقطه جداسازی ۰/۶۷ به دست آمد و در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر به مقدار ۰/۶ کاهش یافت. با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه‌ای برای برآورد سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداسازی در شرایط دبی، غلظت و شیب متغیر ارایه گردید. همچنین سرعت پیشانی در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر (۰/۵ متر بعد از جداسازی) با سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در ادامه مسیر حرکت مقایسه شد و یک رابطه برای سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در مسیر حرکت خود در لایه‌بندی شوری حاصل گردید.

کلید واژه‌ها: رسوب‌گذاری، مخزن سد، جریان غلیظ، نقطه جداسازی.

مقدمه

اصولاً جریان غلیظ به حرکت سیالی درون سیال دیگر اطلاق می‌گردد که عامل حرکت آن اختلاف چگالی میان آن دو سیال می‌باشد. در این حالت سیال واردشونده به درون سیال دیگر را سیال غلیظ و سیال پذیرنده را سیال پیرامون می‌نامند. اختلاف چگالی ممکن است ناشی از تفاوت دما، تفاوت در غلظت مواد محلول و یا تفاوت در غلظت ذرات معلق باشد. اگر اختلاف چگالی ایجادشده به دلیل رسوبات معلق باشد جریان غلیظ ایجادشده را جریان کدر می‌نامند. این گونه جریان‌ها براساس اختلاف چگالی ممکن است به صورت زیرگذر، روگذر و یا میانگذر رخ دهند. با این تعریف که اگر چگالی سیال واردشونده بیشتر از چگالی سیال پیرامون باشد، جریان به صورت زیرگذر حرکت می‌کند و اگر چگالی سیال واردشونده کمتر از چگالی سیال پیرامون باشد، لایه‌ای از سیال غلیظ در راستای سطح آزاد سیال ساکن حرکت خواهد کرد که جریان غلیظ در این حالت به صورت روگذر می‌باشد. همچنین اگر سیال پیرامون در راستای عمق، دارای لایه‌بندی چگالی باشد، هنگام جریان یافتن سیال غلیظ ورودی در منابع آب ممکن است سیال ورودی جرم مخصوصی کمتر از جرم مخصوص لایه‌های زیرین توده سیال ساکن و جرم مخصوصی بیشتر از جرم

رودخانه‌ها از دیرباز تاکنون از جمله منابع بسیار مهم آب شیرین در کره زمین می‌باشند که بشر با ساخت سدها به دنبال ذخیره آن بوده است. از جمله مسائل بسیار مهم در مطالعات رودخانه، فرایندهای رسوب‌گذاری در نتیجه فرسایش حوضه و یا بالادست رودخانه‌ها می‌باشد. رسوب‌گذاری در مخازن سدها علاوه بر از بین بردن عمر مفید آن‌ها باعث خسارات جبران‌ناپذیری به سازه‌های جانبی سدها مانند آبگیرها، دریچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی و تأسیسات تولید انرژی خواهد شد (Daryae et al., 2014). از جمله پارامترهایی که در رسوب‌گذاری مخازن سدها مؤثر می‌باشند، جریان‌های غلیظ می‌باشند که شامل ذرات بسیار ریز رسوبی هستند. این گونه جریان‌ها ضمن حرکت باعث ایجاد فرسایش در بستر شده و پس از رسیدن به نزدیکی بدنه سد با کاهش سرعت، منجر به رسوب‌گذاری در این ناحیه می‌شوند، بنابراین مطالعه درباره جریان‌های غلیظ لازم به نظر می‌رسد. همچنین مطالعه در خصوص ساختار رأس جریان غلیظ و سرعت آن جهت مدیریت هرچه بهتر تخلیه به موقع این گونه جریان‌ها ضروری می‌باشد (Kooti et al., 2010).

آب جریان یافته در رودخانه در طول بارش‌های سنگینی که اتفاق می‌افتد، عموماً چگال‌تر از آب درون مخزن می‌باشد. زیرا جریان ورودی به مخزن، رسوبات معلق زیادی به همراه دارد. بنابراین سیال ورودی به آب درون مخزن نیرو وارد کرده و آن را جابه‌جا می‌کند تا آن‌جا که نیروها به تعادل برسند. در نقطه تعادل، جریان با دانسیته بیشتر زیر سطح آب فرو می‌رود و نقطه غوطه‌وری ایجاد می‌شود. اما اگر در مخزن در راستای عمق سیال ساکن موجود، لایه‌بندی چگالی (لایه‌بندی شوری) وجود داشته باشد، جریان ورودی بعد از نقطه غوطه‌وری در ابتدای ورودی به مخزن به صورت زیرگذر گسترش خواهد یافت و بعد از طی مسافتی وارد لایه‌های شور می‌شود؛ هم‌چنان که جریان در حال پیش‌روی می‌باشد در جایی از بستر که دانسیته سیال غلیظ در حال حرکت برابر دانسیته سیال لایه‌بندی شده می‌شود، جریان از بستر جدا شده و چگالی مناسب محیط خود را پیدا می‌کند و در یک لایه افقی به صورت میانگذر به حرکت خود ادامه می‌دهد. در شکل (۱) رژیم جریان غلیظ در یک مخزن لایه‌بندی شده به همراه قسمت‌های مختلف آن نشان داده شده است.

جریان غلیظ در مخازن لایه‌بندی شده از چهار قسمت مهم پیشانی، بدنه، نقطه جدشدگی و نقطه غوطه‌وری تشکیل شده است. از بخش‌های بسیار مهم و قابل بررسی در دینامیک جریان غلیظ، بخش پیش رونده جریان غلیظ (پیشانی جریان) می‌باشد. برخلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دایمی بدنه جریان غلیظ، پیشانی جریان دارای رژیم چرخشی و غیر دایمی بوده و باعث جابه‌جایی سیال محیطی می‌شود. نیروی جلوبرنده و محرک در رأس جریان غلیظ، گرادیان فشار حاصل از اختلاف چگالی میان رأس جریان و سیال محیطی است (Kaheh et al., 2012).

مخصوص لایه‌های بالایی توده سیال ساکن داشته باشد در این صورت سیال غلیظ ورودی دانسیته مناسب محیط خود را پیدا خواهد کرد و به صورت یک جریان غلیظ میانگذر حرکت می‌کند.

معادلات حاکم

عامل حرکت در جریان‌های غلیظ، اختلاف دانسیته میان سیال غلیظ ورودی و سیال ساکن محیطی است که این امر باعث کاهش نیروی ثقل شده و منجر به ایجاد تفاوت اساسی با جریان در مجاری روباز می‌گردد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$g' = g \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (1)$$

در این رابطه g' شتاب ثقل کاهش یافته، g شتاب ثقل زمین، ρ_d دانسیته سیال ساکن محیط و ρ_a متوسط دانسیته جریان غلیظ می‌باشد. همانند جریان در مجاری باز، در جریان‌های غلیظ نیز اثر نیروی ثقل به نیروی اینرسی بسیار با اهمیت است، به طوری که عدد فرود در جریان غلیظ به صورت زیر بیان می‌شود:

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

به این عدد، عدد فرود دنسیومتریک می‌گویند و در این رابطه Fr_d عدد فرود دنسیومتریک، \bar{U} سرعت متوسط جریان، h عمق متوسط جریان و θ زاویه بستر با افق می‌باشد. البته این پارامتر را معمولاً با عدد ریچاردسون نشان می‌دهند که تابعی از عدد فرود دنسیومتریک است (Sarvarinezhad et al., 2011):

$$\frac{1}{Fr_d^2} = \frac{g'h \cos \theta}{\bar{U}^2} = Ri \quad (3)$$

جریان غلیظ در مخازن لایه‌بندی شده

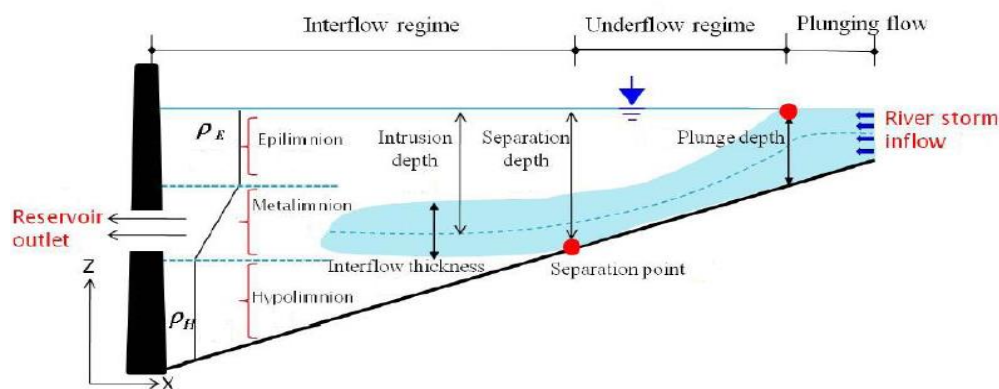


Fig. 1- Density current regim in a layered reservoir

شکل ۱- رژیم جریان غلیظ در یک مخزن لایه‌بندی شده

Ghomeshi و Bashavard (2009) با بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ رسوبی برای شیب‌های ۰ و ۸ درصد روابطی را ارائه نمودند.

$$U_f = 0.766\sqrt{g'H_f} \quad \text{برای شیب صفر} \quad (7)$$

$$U_f = 0.782\sqrt{g'H_f} \quad \text{برای شیب ۸ درصد} \quad (8)$$

در زمینه جریان غلیظ میانگذر از جمله Lowe et al. (2002)، Zhang et al. و Wells (2009)، Nadarajah (2009)، White (2011)، Helfrich و Ungarish (2012)، و Sahuri et al. (2015) مطالعاتی انجام دادند. Kao (1977) سرعت انتشار پیش‌روی جریان در طول یک سطح مشترک بین دو سیال همگن را بر پایه تئوری برنولی استنتاج کرد. ایشان سرعت پیش‌روی را با معادله زیر نشان داد:

$$U_f = \sqrt{2 \frac{\rho_1 - \rho_d}{\rho_d} \frac{\rho_d - \rho_0}{\rho_1 - \rho_0} g' h_d} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، h_d ارتفاع جریان غلیظ، ρ_d دانسیته سیال غلیظ، ρ_0 دانسیته لایه بالایی سیال پیرامون (لایه آب شفاف)، ρ_1 دانسیته لایه پایینی سیال پیرامون (لایه آب شور) و U_f سرعت پیشانی جریان غلیظ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز در فلومی شیب‌پذیر به طول ۸ متر، عرض ۳۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر که قابلیت تغییر شیب تا چهار درصد را دارا می‌باشد، انجام شد. نمای از فلوم به همراه مخازن مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شده است. برای تهیه سیال غلیظ از یک مخزن اختلاط به حجم سه متر مکعب و رسوباتی از جنس سیلیس با قطر متوسط ۸ میکرومتر استفاده گردید. در آزمایش‌ها از چهار دبی یک، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ لیتر بر ثانیه، چهار غلظت پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر و سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و چهار درصد استفاده گردید. حجم آب درون مخزن و وزن رسوبات با توجه به دبی و غلظت به کار رفته در آزمایش‌ها تعیین می‌شد. بنابراین در ابتدا مخزن اختلاط با آب تمیز آب‌گیری می‌شد، سپس رسوبات وزن‌شده کم‌کم به آن افزوده می‌گشت و به کمک یک پمپ اختلاط و یک همزن، مخلوط آب و رسوب ایجاد می‌گردید. پس از اطمینان از اختلاط کامل آب و رسوب، سیال غلیظ به مخزن هد تانک به‌منظور رسیدن به هد ثابت منتقل می‌شد. پس از ایجاد هد ثابت با استفاده از یک شیر و دبی‌سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی به فلوم کنترل می‌شد. فلوم مورد استفاده توسط

اکثر مطالعات صورت‌گرفته در زمینه جریان غلیظ به‌صورت زیرگذر بوده و مطالعات مربوط به جریان غلیظ میانگذر بسیار محدود می‌باشد، اما سد گتوند علیا که در ایران در جنوب غربی استان خوزستان واقع شده است، قرار گرفتن معدن نمک در مخزن این سد باعث شده است به هنگام آب‌گیری و تشکیل دریاچه پشت سد، این معدن نمک به کلی به زیر آب دریاچه فرو رود و لایه‌های آب شور مخزن سد به جهت سنگینی بیشتری که نسبت به آب شیرین دارند در لایه‌های پایینی مخزن تجمع یابند. بنابراین آب درون مخزن سد گتوند به‌صورت لایه‌بندی شوری وجود دارد و سیلاب‌های احتمالی که با رسوب زیاد وارد مخزن سد می‌گردند بعد از طی مسافتی که به‌صورت زیرگذر ادامه مسیر می‌دهند میانگذر شده و تغییراتی را در لایه‌بندی و ارتفاع شوری در مخزن سد ایجاد می‌کنند، بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی و شناخت رفتار جریان غلیظ میانگذر رسوبی در سیال با لایه‌بندی شوری پرداخته شده است.

در خصوص ساختار رأس جریان‌های غلیظ و سرعت آن مطالعات مفیدی توسط محققین انجام گرفته است. در خصوص جریان غلیظ زیرگذر در ابتدا Keulegan (1957) تحقیقاتی بر روی سرعت رأس جریان غلیظ انجام داد که نتایج وی منجر به رابطه (۴) گردید که به رابطه کولگان معروف شد.

$$U_f = C_c \sqrt{g'H_f} \quad (4)$$

در این رابطه U_f سرعت پیشانی جریان، C_c ضریب کولگان و H_f ارتفاع پیشانی جریان می‌باشد. کولگان ضریب رابطه خود را برای اعداد رینولدز بیش از ۱۰۰۰، ۰/۷ پیشنهاد نموده است. Middleton (1966) با توجه به تحقیقات Keulegan (1957)، دو سری آزمایش توسط مدل فیزیکی انجام داد. در هر دو سری آزمایش، خصوصیات رأس تشکیل شده در قسمت جلوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. این محقق ضریب تجربی در فرمول کولگان را $C_c = 0.75$ پیشنهاد کرد. Altinakar et al. (1990) در بررسی آزمایشگاهی در محدوده شیب $0\% \leq S \leq +2.9\%$ و با استفاده از جریان غلیظ نمکی و رسوبی با دو نوع دانه‌بندی، رابطه زیر را پیشنهاد نمودند.

$$U_f = 0.63\sqrt{g'H_f} \quad (5)$$

Ghomeshi (1997) در بررسی آزمایشگاهی با شیب کف ۰/۰۶۳۵ و استفاده از جریان غلیظ نمکی و رسوبی و نیز استفاده از داده‌های سایر محققین، برای سرعت پیشانی جریان رابطه زیر را به‌دست آورد.

$$U_f = 0.72\sqrt{g'H_f} \quad (6)$$

در انتهای فلوم در محل ورود آب شفاف به درون فلوم، روی سیال قرار داده می‌شد. با باز کردن شیر، آب با سرعت کم روی یونولیت ریخته می‌شد (یونولیت مذکور از اختلاط کامل بین آب شفاف و محلول آب و نمک جلوگیری می‌کرد). بعد از رسیدن ارتفاع آب تا حد مشخصی در ابتدای فلوم، جریان ورودی به فلوم قطع می‌شد، سپس برای اطمینان از لایه‌بندی شوری سیال پیرامون، در فواصل ۰/۱، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶/۵ متری از دریچه و با قرار دادن سنسور دستگاه EC سنج درون سیال پیرامون از سطح تا کف فلوم با فواصل ارتفاعی دو سانتی‌متر EC سیال پیرامون برداشت می‌شد.

مشاهده آزمایش‌ها

حرکت جریان غلیظ میانگدر در یک سیال لایه‌بندی‌شده به این صورت می‌باشد که با ورود سیال غلیظ از زیر دریچه به درون سیال پیرامون، در ابتدا جریان در کف (به‌صورت زیرگذر) شروع به پیش‌روی می‌کند (شکل ۳) و همچنان که در حال پیش‌روی می‌باشد وارد لایه‌های شور می‌شود و در جایی از بستر که دانسیته سیال غلیظ در حال حرکت تقریباً برابر دانسیته سیال لایه‌بندی‌شده می‌شود جداشدگی جریان از بستر اتفاق می‌افتد (شکل ۴). با جدا شدن جریان از بستر، جریان غلیظ میانگدر شکل می‌گیرد و جریان با یافتن دانسیته مناسب محیط خود در یک لایه افقی به‌صورت میانگدر به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل ۵).

یک دریچه به دو قسمت تقسیم می‌شد و بدین وسیله سیال غلیظ از سیال پیرامون جدا شده و هنگامی که ارتفاع سیال غلیظ در محفظه پشت دریچه برابر ارتفاع سیال پیرامون در فلوم می‌شد، دریچه بین دو سیال به‌طور ناگهانی تا ارتفاع مشخصی بالا زده می‌شد و جریان غلیظ در سیال لایه‌بندی‌شده شروع به حرکت می‌کرد. همچنین در زمان ورود سیال غلیظ به درون محفظه پشت فلوم از سیال غلیظ رسوبی نمونه‌ای برداشت می‌شد و در آزمایشگاه، میزان غلظت جریان ورودی سنجیده می‌شد. با ورود سیال غلیظ به درون سیال پیرامون به‌وسیله دوربین فیلم‌برداری از حرکت جریان غلیظ در سیال لایه‌بندی‌شده فیلم‌برداری می‌شد.

برای ایجاد لایه‌بندی شوری سیال پیرامون، از یک مخزن به حجم یک متر مکعب به صورت جداگانه استفاده شد. بدین صورت که در ابتدا مخزن مذکور با آب تمیز به حجم ۷۵۰ لیتر آب‌گیری می‌شد سپس نمک به مقدار لازم درون مخزن ریخته می‌شد و با قرار دادن یک پمپ لجن‌کش در کف و مرکز مخزن عمل اختلاط تا حل شدن کامل آب و نمک صورت می‌گرفت. سپس مقداری رنگ در آب جوش حل می‌شد و به محلول مورد نظر اضافه می‌شد و در حین عمل اختلاط، Electrical Conductivity (EC) یا هدایت الکتریکی محلول آب و نمک مرتب اندازه‌گیری می‌شد. پس از انحلال کامل آب و نمک و رسیدن محلول به EC مورد نظر، محلول آب و نمک از انتهای فلوم و تا یک متر مانده به دریچه به درون فلوم پمپ می‌شد، سپس یونولیتی هم‌عرض فلوم

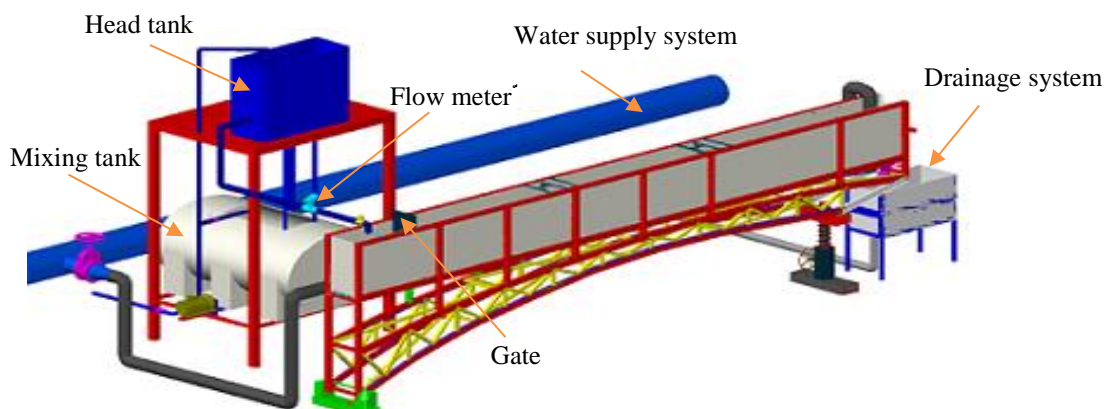


Fig. 2- Schematic image of the test flume and its equipment

شکل ۲- تصویر شماتیک فلوم آزمایشی و تجهیزات آن



Fig. 3- Advance of density current as a underflow

شکل ۳- پیش‌روی جریان غلیظ به‌صورت زیرگذر



Fig. 4- Separate of density current from the bed

شکل ۴- جدا شدن جریان غلیظ از بستر

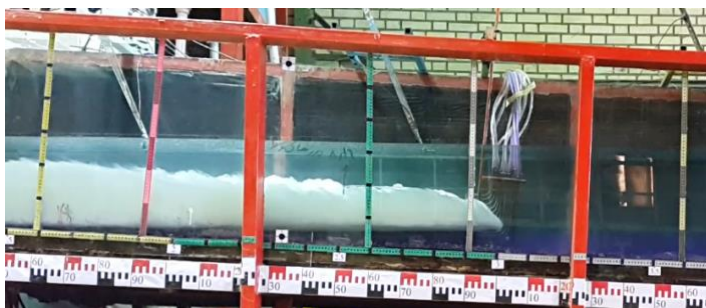


Fig. 5- Motion of interflow density current in a horizontal layer

شکل ۵- حرکت جریان غلیظ میانگذر در یک لایه افقی

Table 1- Height of ambient fluid saline stratification in different slopes with distance from the gate along flume

جدول ۱- ارتفاع لایه بندی شوری سیال پیرامون در شیب‌های مختلف با فاصله از دریچه در طول فلوم

Slope (%)	Height of saline water (cm)			Height of clear water (cm)			Height of stratification (cm)		
	Top of gate	3/5 meter from gate	6/5 meter from gate	Top of gate	3/5 meter from gate	6/5 meter from gate	Top of gate	3/5 meter from gate	6/5 meter from gate
2.5	0	8	14	15	16	18	15	24	32
3.25	0	10	19	17	18	20	17	28	39
4	0	12	25	20	21	23	20	33	48

به TDS به این صورت بود که در ابتدا یک گرم نمک در یک لیتر آب حل شد، سپس با استفاده از دستگاه EC سنج، EC محلول آب و نمک برداشت می‌شد. برداشت EC محلول آب و نمک در هر بار اضافه کردن یک گرم نمک به محلول تا رسیدن EC محلول به اندازه مورد نظر ادامه داشت، ضمن اینکه TDS محلول آب و نمک هم در هر بار اضافه کردن یک گرم نمک به محلول برداشت می‌شد. با رسیدن EC محلول به اندازه مورد نظر رابطه تبدیل EC به TDS استخراج گردید که رابطه به دست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. با استفاده از رابطه حاصل، EC های برداشتی در هر آزمایش به TDS تبدیل گردید. در شکل (۷) لایه بندی شوری در شیب‌های مختلف در فواصل مختلف از فلوم نشان داده شده است.

لایه بندی شوری سیال پیرامون

با توجه به این که آزمایش‌ها در سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و چهار درصد انجام شد، ارتفاع لایه بندی شوری سیال پیرامون در شیب‌های مذکور در جدول (۱) ذکر گردیده است. با تغییر شیب، ارتفاع لایه بندی شوری سیال پیرامون تغییر میکند و با افزایش شیب، ارتفاع آب شور و آب شفاف در طول فلوم افزایش می‌یابد که باعث افزایش ارتفاع لایه بندی در فلوم می‌شود. اساس تشکیل جریان غلیظ میانگذر، لایه بندی شوری سیال پیرامون می‌باشد، به همین منظور در فواصل مختلف از فلوم از سطح سیال پیرامون تا کف فلوم به فواصل ارتفاعی دو سانتی‌متر، EC سیال پیرامون برداشت شد، سپس در آزمایشگاه با استفاده از نمک مورد استفاده در آزمایش‌ها ارتباط میان EC و TDS (غلظت شوری سیال لایه بندی شده) استخراج گردید. روش استخراج رابطه تبدیل EC

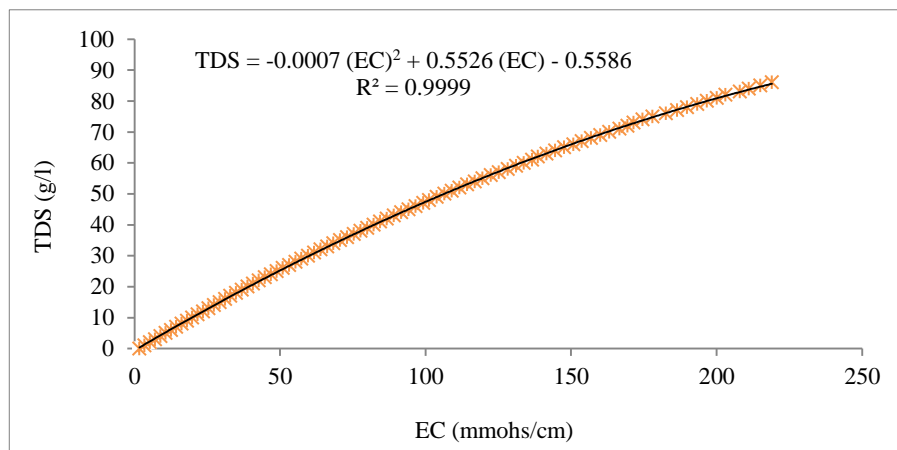


Fig. 6- Variations of TDS versus EC
 شکل ۶- تغییرات TDS در مقابل EC

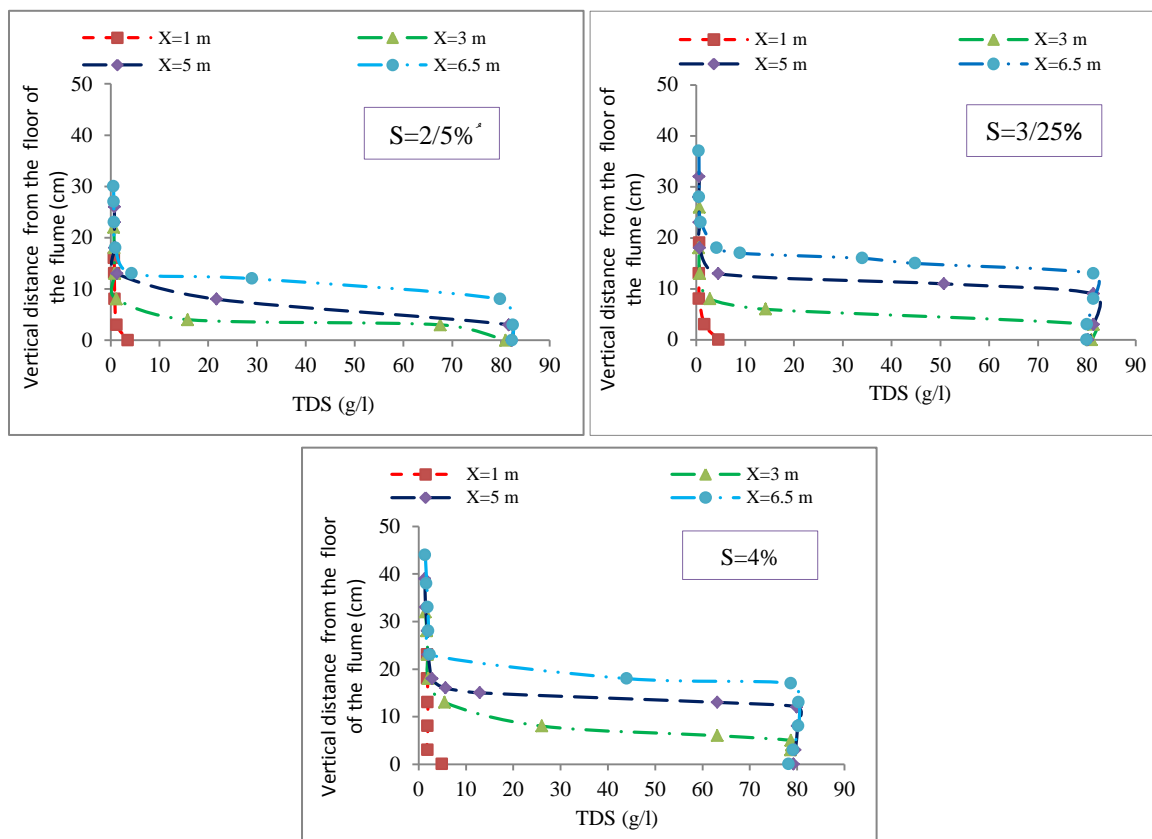


Fig. 7- Ambient fluid saline stratification in different slopes
 شکل ۷- لایه‌بندی شوری سیال پیرامون در شیب‌های مختلف

کمتری نسبت به لایه‌های پایینی واقع در فلوم دارند و با نزدیک شدن به کف فلوم شوری افزایش پیدا می‌کند. دلیل این امر آن است که لایه‌های شور به جهت سنگینی بیشتری که نسبت به لایه‌های شفاف دارند، در لایه‌های پایینی فلوم واقع شده‌اند و لایه‌های شفاف که سبک‌تر می‌باشند، در لایه‌های بالایی قرار

همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود در هر سه شیب در ابتدای فلوم سیال پیرامون در راستای عمق دارای لایه‌بندی شوری یک‌نواختی می‌باشد اما با فاصله گرفتن از ابتدای فلوم لایه‌بندی شوری سیال پیرامون تغییر می‌کند و لایه‌های شفاف که در لایه‌های بالایی سیال درون فلوم قرار گرفتند، شوری

برای به دست آوردن رابطه سرعت جریان غلیظ در نقطه جداشدگی با پارامترهای دیگر می توان رابطه (۱۳) را به صورت زیر نوشت:

$$U_{f_s} = f\left(\frac{g'H_{f_s}^3}{q_0^2}, S\right)(g'q_0)^{1/3} \quad (14)$$

نتایج و بحث

به منظور بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر رسوبی در لایه بندی شوری ۴۸ آزمایش انجام شد که خلاصه ای از آزمایش های انجام شده در این تحقیق در جدول (۲) آورده شده است.

از آن جایی که آستانه شروع جریان غلیظ میانگذر، نقطه جدا شدگی جریان می باشد، بنابراین در ابتدا به تحلیل سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی پرداخته شد. سپس سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر از نقطه جداشدگی تا چهار متر بعد از آن به فواصل ۰/۵ متری از هم محاسبه شد و سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی با سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در نزدیک ترین فاصله ایستگاهی به آن (۰/۵ متر بعد از جداشدگی) مقایسه شدند. همچنین به بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در فاصله ۰/۵ متر بعد از نقطه جداشدگی (به عنوان نقطه مبدأ) و ادامه مسیر حرکت جریان غلیظ میانگذر بعد از مبدأ پرداخته شد و یک رابطه برای سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در مسیر حرکت خود در لایه بندی شوری حاصل گردید.

برای بررسی سرعت پیشانی و اندازه گیری آن از دوربین فیلم برداری و نوارهای نصب شده در بدنه و دیواره فلوم استفاده شد. همچنین اندازه گیری سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در فاصله ۰/۱ متر بعد از دریچه تا نقطه جداشدگی جریان به دست آمد. به منظور بررسی اثر دبی، غلظت و شیب بر روی سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی، نتایج و روند این پارامترها در شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) ارائه شده است. با توجه به شکل ها مشاهده می شود که با افزایش هر یک از پارامترهای دبی، شیب و غلظت، سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی افزایش می یابد. همچنین برای استخراج مقدار ضریب رابطه کولگان در نقطه جداشدگی از نتایج مطالعه حاضر استفاده گردید. با استفاده از نرم افزار SPSS و نتایج تحقیق حاضر ضریب رابطه کولگان در نقطه جداشدگی ۰/۶۷ با $R^2 = 0.70$ حاصل گردید که در شکل (۱۱) در کنار ارقام اندازه گیری شده نشان داده شده است.

گرفته اند. همچنین در مقاطع مختلف از فلوم در راستای عمق یک افزایش شوری به صورت ناگهانی وجود دارد که مشخص کننده مرز لایه های بسیار شور از لایه های شفاف می باشد.

آنالیز ابعادی

هدف از به کارگیری آنالیز ابعادی پیدا نمودن رابطه ای بین کمیت های فیزیکی در یک پدیده طبیعی می باشد. به منظور دست یابی به اهداف این تحقیق و تحلیل نتایج و استخراج پارامترهای بی بعد، آنالیز ابعادی صورت گرفت و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر جهت آنالیز ابعادی در خصوص سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی در لایه بندی شوری به شرح زیر می باشند.

$$f(q_0, U_{f_s}, H_{f_s}, g, \rho_a, \rho_d, S) = 0 \quad (10)$$

که در این رابطه، q_0 دبی در واحد عرض ورودی جریان غلیظ، U_{f_s} سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی، H_{f_s} ارتفاع پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی، ρ_a دانسیته سیال ساکن، ρ_d دانسیته سیال غلیظ ورودی، g شتاب ثقل زمین و S شیب بستر می باشد. با آنالیز ابعادی به روش π -باکینگهام و با انتخاب q_0 ، ρ_a و g به عنوان متغیرهای تکراری اعداد بدون بعد به صورت زیر حاصل شدند.

$$f(\pi_1 = \frac{U_{f_s}}{\sqrt[3]{gq_0}}, \pi_2 = \frac{gH_{f_s}^3}{q_0^2}, \pi_3 = \frac{\rho_d}{\rho_a}, \pi_4 = S) = 0 \quad (11)$$

از طرفی عدد بدون بعد $\frac{\rho_d}{\rho_a}$ را با رعایت بدون بعد بودن می توان به صورت رابطه (۱۲) نوشت:

$$\frac{\rho_d}{\rho_a} \Rightarrow \left(\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (12)$$

با ترکیب عدد بدون بعد π_3 با اعداد بدون بعد π_1 و π_2 اعداد بدون بعد به صورت رابطه (۱۳) حاصل شدند.

$$f\left(\frac{U_{f_s}}{\sqrt[3]{g'q_0}}, \frac{g'H_{f_s}^3}{q_0^2}, S\right) = 0 \quad (13)$$

Table 2- Summary of the experiments performed in present research

جدول ۲- خلاصه ای از آزمایش های انجام شده در تحقیق حاضر

Number of tests	Q (lit/s)	C (g/l)	S (%)
16	1, 1/5, 2, 2/5	5, 10, 15, 20	2/5
16	1, 1/5, 2, 2/5	5, 10, 15, 20	3/25
16	1, 1/5, 2, 2/5	5, 10, 15, 20	4

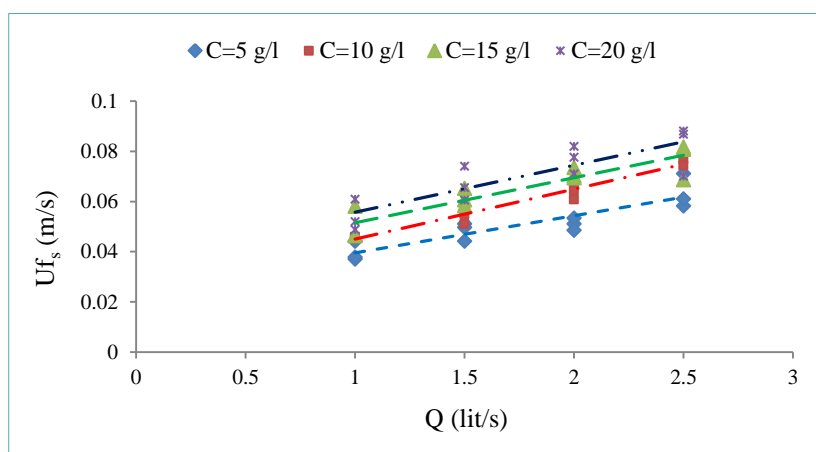


Fig. 8- Variations of density current head velocity in separation point versus variations of discharge for different concentrations and slopes

شکل ۸- تغییرات سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جدشدگی در مقابل تغییرات دبی برای غلظت و شیب‌های مختلف

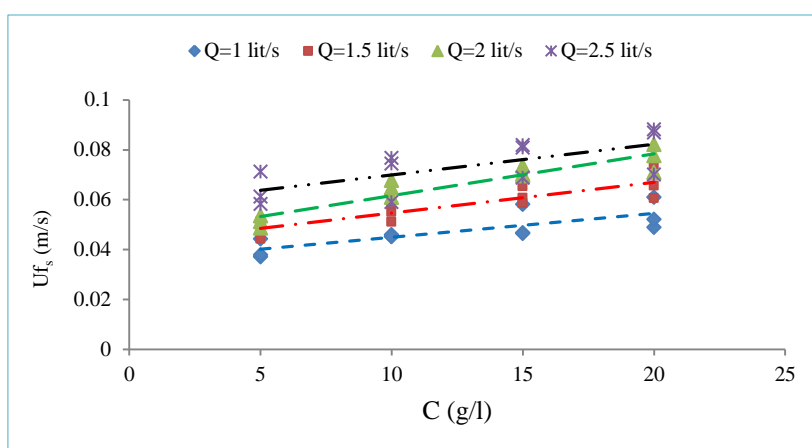


Fig. 9- Variations of density current head velocity in separation point versus variations of concentration for different discharges and slopes

شکل ۹- تغییرات سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جدشدگی در مقابل تغییرات غلظت برای دبی و شیب‌های مختلف

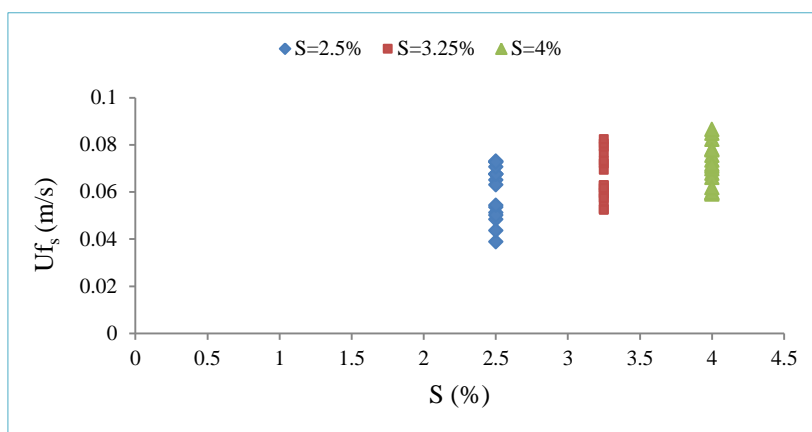


Fig.10- Variations of density current head velocity in separation point versus variations of slope

شکل ۱۰- تغییرات سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جدشدگی در مقابل تغییرات شیب

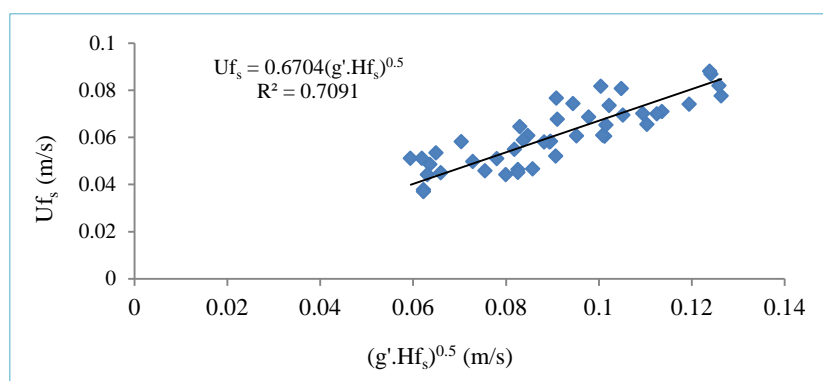


Fig.11- Variations of U_{fs} versus $(g'.hfs)^{0.5}$ in separation point

شکل ۱۱- تغییرات U_{fs} در مقابل $(g'.hfs)^{0.5}$ در نقطه جدشدگی

تحقیق حاضر ضریب رابطه کولگان ۰/۶ با $R^2 = ۰/۷۱$ حاصل گردید که در شکل (۱۴) در کنار ارقام اندازه‌گیری شده نشان داده شده است، در صورتی که مقدار این ضریب در نقطه جدشدگی ۰/۶۷ حاصل گردید. کاهش ضریب رابطه کولگان در جریان غلیظ میانگذر نسبت به نقطه جدشدگی به این دلیل می‌باشد که جریان غلیظ میانگذر در یک لایه افقی حرکت می‌کند و اثر شیب بر حرکت آن حذف می‌گردد. پیش‌روی جریان غلیظ در یک سطح افق و افزایش اختلاط با سیال پیرامون کاهش سرعت جریان را در پی دارد و کاهش سرعت جریان باعث کاهش ضریب رابطه شده است. همچنین سرعت پیشانی در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر با سرعت جریان در نقطه جدشدگی مقایسه شد که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. رابطه به‌دست‌آمده با توجه به شکل به‌صورت زیر می‌باشد:

$$U_{fi} = 0.8623 U_{fs} \quad (۱۶)$$

با توجه به رابطه بالا می‌توان نتیجه گرفت که سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر از سرعت پیشانی جریان در نقطه جدشدگی کمتر می‌باشد. دلیل این امر آن است که جریان غلیظ میانگذر بعد از نقطه جدشدگی اتفاق می‌افتد و در یک راستای افقی حرکت می‌کند و شیب بستر بر حرکت آن اثرگذار نمی‌باشد. بنابراین تنها عاملی که بر حرکت جریان غلیظ میانگذر مؤثر می‌باشد، نیروی مومنتوم در نقطه جدشدگی می‌باشد. با گذشت زمان و فاصله گرفتن از نقطه جدشدگی از مقدار نیروی مومنتوم در نقطه جدشدگی کاسته می‌شود و کاهش نیروی مومنتوم باعث کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر نسبت به سرعت نقطه جدشدگی می‌شود. از دلایل دیگری که باعث کاهش سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر نسبت به نقطه جدشدگی می‌شود، ورود (کشش) سیال پیرامون به درون سیال غلیظ می‌باشد که این امر از غلظت جریان می‌کاهد که خود باعث کاهش قدرت جریان و به سبب آن باعث کاهش سرعت می‌شود.

استخراج رابطه سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جداشدگی

از آنجایی که در تحقیق حاضر دبی، غلظت و شیب پارامترهای متغیر می‌باشند، لذا رابطه‌ای جهت برآورد سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جدشدگی در شرایطی که دبی، غلظت و شیب متغیر می‌باشند، استخراج گردید. فرم کلی رابطه با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته مطابق رابطه (۱۴) می‌باشد:

$$U_{fs} = f\left(\frac{g'H_{fs}^3}{q_0^2}, S\right)(g'q_0)^{1/3} \quad (۱۴)$$

با رگرسیون گیری توسط نرم افزار SPSS رابطه‌ای غیرخطی از نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر جهت ارتباط اعداد بدون بعد استخراج گردید که به‌صورت رابطه (۱۵) می‌باشد.

$$U_{fs} = \left[3.1 \left(\frac{g'H_{fs}^3}{q_0^2} \right)^{-0.172} (S)^{0.24} \right] (g'q_0)^{1/3} \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۵) براساس ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده در این تحقیق به‌دست آمده است. به‌منظور حصول اطمینان از رابطه حاصل، با ۲۰ درصد داده‌های باقی مانده صحت‌سنجی صورت پذیرفت. در شکل (۱۲) نمودار صحت‌سنجی ارائه شده است.

به‌منظور تحلیل سرعت پیشانی جریان در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر (۰/۵ متر بعد از جدشدگی)، در ابتدا سرعت پیشانی جریان غلیظ با فلاکس شناوری جریان مقایسه شد که در شکل (۱۳) نشان داده شده است و این نتیجه حاصل شد که میان سرعت پیشانی در ابتدای جریان غلیظ میانگذر و فلاکس شناوری جریان یک رابطه توانی وجود دارد و با افزایش دبی و یا غلظت جریان ورودی، سرعت پیشانی جریان به‌صورت توانی افزایش می‌یابد. برای استخراج مقدار ضریب رابطه کولگان در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر (۰/۵ متر بعد از جدشدگی) از نتایج مطالعه حاضر استفاده گردید. با استفاده از نرم افزار SPSS و نتایج

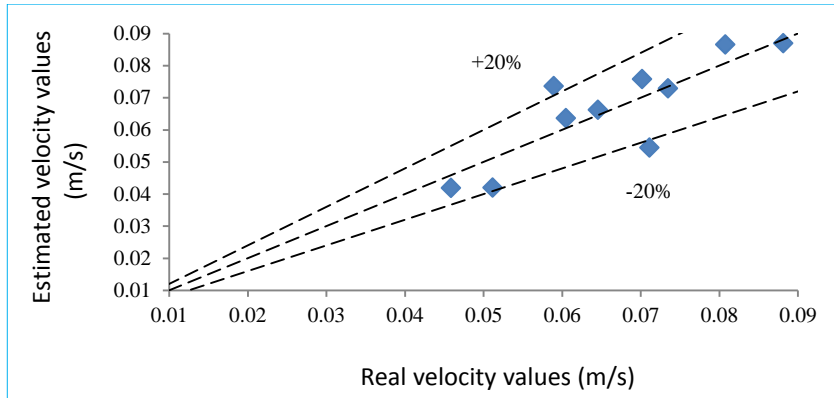


Fig.12- Results of density current head velocity modeling in separation point
 شکل ۱۲- نتایج حاصل از مدل سازی سرعت پیشانی جریان غلیظ در نقطه جدشدگی

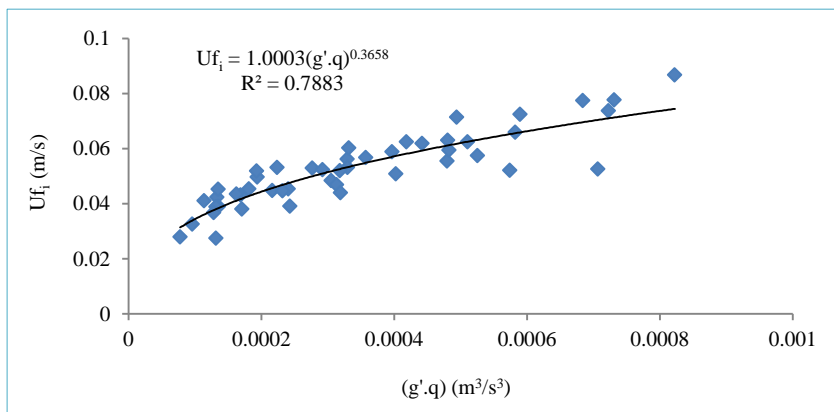


Fig. 13- Variations of head velocity in initial of interflow density current versus buoyancy flux
 شکل ۱۳- تغییرات سرعت پیشانی در ابتدای جریان غلیظ میانگذر در مقابل فلاکس شناوری

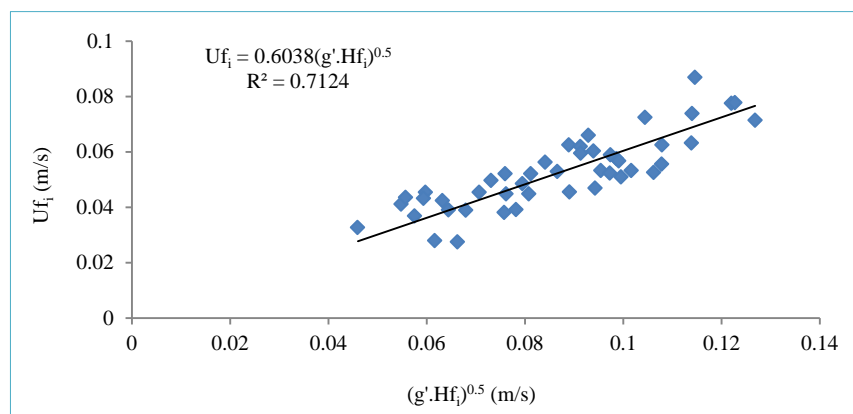


Fig.14- Variations of U_{fi} versus $(g'.hfi)^{0.5}$ in initial part of interflow density current
 شکل ۱۴- تغییرات U_{fi} در مقابل $(g'.hfi)^{0.5}$ در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر

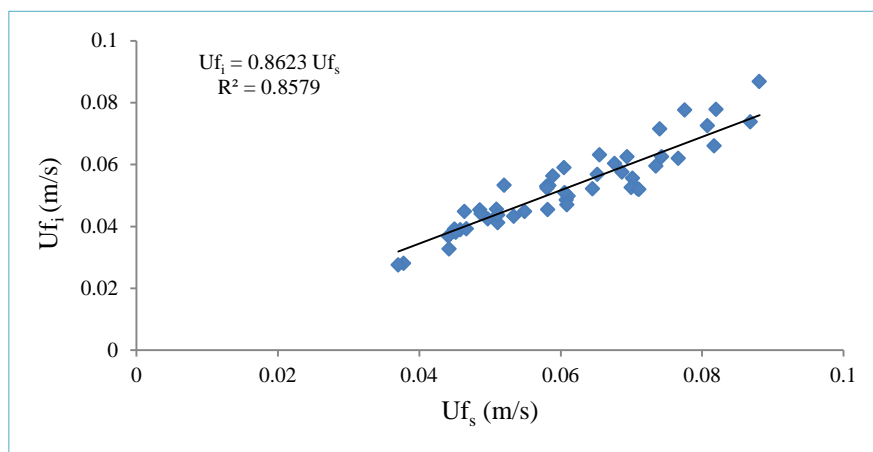


Fig.15- Comparison of head velocity in initial part of interflow density current with head velocity in separation point

شکل ۱۵- مقایسه سرعت پیشانی در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر با سرعت پیشانی در نقطه جدشدگی

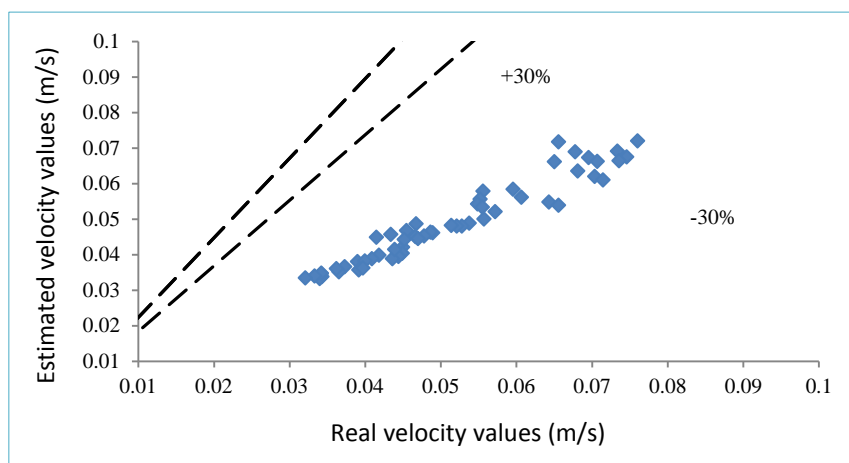


Fig.16- Results of head velocity interflow density current modeling in saline stratification

شکل ۱۶- نتایج حاصل از مدل سازی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در لایه بندی شوری

طول مسیر حرکت جریان غلیظ میانگذر در لایه بندی شوری چهار متر در نظر گرفته شد. رابطه (۱۷) برای ۷۰ درصد داده ها به دست آمده است:

$$U_{fX} = 0.854 U_{fi} \left(\frac{X}{D}\right)^{-0.058} \quad (17)$$

در این رابطه U_{fX} سرعت متوسط جریان غلیظ میانگذر در فاصله یک، دو، سه و چهار متری از نقطه مبدأ برحسب متر بر ثانیه می باشد. U_{fi} سرعت جریان غلیظ میانگذر در نقطه مبدأ (سرعت در فاصله ۰/۵ متر بعد از جدشدگی) برحسب متر بر ثانیه می باشد. X فاصله ای که جریان غلیظ میانگذر نسبت به مبدأ طی می کند و سرعت برای آن محاسبه می شود و برحسب متر می باشد و D کل مسیری که جریان غلیظ میانگذر در کانال طی می کند که در این تحقیق با توجه به طول کانال چهار متر در نظر گرفته شد. همچنین از ۳۰ درصد داده ها به منظور صحت سنجی استفاده

ارتباط سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در ادامه مسیر حرکت با سرعت پیشانی در اولین ایستگاه (۰/۵ متر بعد از جدشدگی)

به منظور بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در لایه بندی شوری سرعت جریان در فاصله ۰/۵ متر بعد از جدشدگی (به عنوان مبدأ) با سرعت در فواصل یک، دو، سه، و چهار متر پس از مبدأ مقایسه شد و با استفاده از نرم افزار SPSS یک رابطه کلی برای سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر براساس سرعت جریان غلیظ میانگذر در اولین ایستگاه بعد از نقطه جدشدگی و فاصله از آن به دست آمد که در رابطه (۱۷) نشان داده شده است. بدین صورت که سرعت جریان غلیظ میانگذر به فاصله ۰/۵ متر بعد از جدشدگی، به عنوان سرعت نقطه صفر (مبدأ) جریان در نظر گرفته شد و سپس سرعت های متوسط در فاصله یک، دو، سه و چهار متر بعد از آن به عنوان سرعت های متوسط جریان غلیظ میانگذر در نظر گرفته شد. با توجه به طول کانال،

با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه‌ای جهت برآورد سرعت پیشانی در نقطه جدشدگی با شرایط دبی، غلظت و شیب متغیر با استفاده از نتایج تحقیق حاضر ارائه گردید.
با استفاده از نرم افزار SPSS و نتایج تحقیق حاضر ضریب رابطه کولگان در نقطه جدشدگی ۰/۶۷ به دست آمد و در قسمت ابتدایی جریان غلیظ میانگذر (۰/۵ متر بعد از جدشدگی) به مقدار ۰/۶ کاهش یافت.

در جریان غلیظ میانگذر با افزایش فلاکس شناوری، سرعت پیشانی جریان به صورت توانی افزایش می‌یابد.
سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر از سرعت جریان در نقطه جدشدگی کمتر می‌باشد که دلیل این امر کاهش مومنتوم نقطه جدشدگی در مسیر و کشش سیال پیرامون به درون سیال غلیظ و کاهش غلظت جریان در مسیر می‌باشد.
برای بررسی سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در لایه‌بندی شوری، سرعت جریان در فاصله ۰/۵ متر بعد از جدشدگی (مبدأ) با سرعت متوسط جریان در فواصل یک، دو، سه، و چهار متر پس از مبدأ مقایسه شد و یک رابطه کلی برای سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر در مسیر حرکت براساس سرعت جریان غلیظ میانگذر در اولین ایستگاه بعد از نقطه جدشدگی (نقطه مبدأ) و فاصله از آن به دست آمد.

تشکر و قدردانی

در پایان از کلیه اساتید محترم و مسئولان دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل همکاری فراوان در طی انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

شد که نتیجه آن در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که پراکندگی داده‌ها در محدوده $\pm 30\%$ درصد خطا قرار گرفته‌اند، همچنین با افزایش سرعت، پراکندگی داده‌ها بیشتر شده است، در صورتی که در سرعت‌های کمتر هم-پوشانی بیشتری مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سرعت پیشانی جریان غلیظ میانگذر رسوبی در سیال با لایه‌بندی شوری مورد بررسی قرار گرفت. در انجام آزمایش‌ها از چهار دبی یک، ۱/۵، دو و ۲/۵ لیتر بر ثانیه، چهار غلظت پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر و سه شیب ۲/۵، ۳/۲۵ و چهار درصد استفاده گردید. در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شد. از جمله مهمترین نتایج تحقیق حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

در ابتدای فلوم، سیال پیرامون در راستای عمق دارای لایه‌بندی شوری یکنواختی می‌باشد اما با فاصله گرفتن از ابتدای فلوم لایه‌بندی شوری سیال پیرامون تغییر می‌کند و لایه‌های شفاف که در لایه‌های بالایی سیال درون فلوم قرار گرفتند، شوری کمتری نسبت به لایه‌های پایینی واقع در فلوم دارند و با نزدیک شدن به کف فلوم شوری افزایش پیدا می‌کند. در واقع لایه‌های شور به جهت سنگینی بیشتری که نسبت به لایه‌های شفاف دارند، در لایه‌های پایینی فلوم واقع شده‌اند و لایه‌های شفاف که سبک‌تر می‌باشند، در لایه‌های بالایی قرار گرفته‌اند.

لایه‌بندی شوری سیال پیرامون بر خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ از جمله سرعت پیشانی جریان در نقطه جدشدگی مؤثر می‌باشد و با افزایش هر یک از پارامترهای دبی، غلظت و شیب، سرعت پیشانی جریان در نقطه جدشدگی افزایش می‌یابد.

References

- 1-Altinakar, S., Graf, W.H. and Hopfinger, E.J., 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Journal of Hydraulic Research*, 28(1), pp.55-80.
- 2-Bashavard, H., and Ghomeshi, M., 2009. Affecting factors on variations of sedimentary density current head velocity with concentration less than sediment entrainment. *In 8th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.* (In persian).
- 3-Daryae, M., Kashefipour, S.M., and Ghomeshi, M., 2014. Investigation of the impact of barrier and roughness on sedimentary density current control. *Water and Soil Knowledge*, 24(4), pp.1-9. (In persian).
- 4-Ghomeshi, M., 1997. Reservoir sedimentation modeling. *Ph.D Thesis. University of Wollongong, Australia.*
- 5-Kaheh, M., Ghomeshi, M., and Jahromi, S.M., 2012. Experimental study of density current head velocity on the rough surfaces. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 35(2), pp.101-109. (In persian).
- 6-Kao, T.W., 1977. Density currents and their applications. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(ASCE 12947) pp. 543-555.
- 7- Keulegan, G.H., 1957. An experimental study of the motion of saline water from locks into fresh water channels, Rep. 5168. *Nat. Bur. Stand., Washington, DC.*

- 8-Kooti, F., Kashefipour, S.M., Ghomeshi, M., and Asgharipari, S.A., 2010. Investigation of the estimation of density current head velocity under variable slope, concentration and discharge conditions. *In 9th Iran Hydraulic Conference, Tarbiat Modares University*. (In persian).
- 9-Lowe, R.J., Linden, P.F. and Rottman, J.W., 2002. A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current. *Journal of Fluid Mechanics*, 456, pp.33-48.
- 10-Middleton, G.V., 1966. Experiments on density and turbidity currents: I. Motion of the head. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 3(4), pp.523-546.
- 11-Sahuri, R.M., Kaminski, A.K., Flynn, M.R. and Ungarish, M., 2015. Axisymmetric gravity currents in two-layer density-stratified media. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(5), pp.1035-1051.
- 12-Sarvarinezhad, B., Ghomeshi, M., and Bina, M., 2011. Evaluating the water entrainment of density current in converging reaches and diverging reaches, *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 36(3), pp.13-22. (In persian).
- 13-Ungarish, M., 2012. Gravity currents and intrusions of stratified fluids into a stratified ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, 12(2), pp.115-132.
- 14-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.
- 15-White, B.L. and Helfrich, K.R., 2012. A general description of a gravity current front propagating in a two-layer stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 711, pp.545-575.
- 16-Zhang X.F., Yao Zh.j., Lu J.-Q., 2011. Experiment of density currents in stratified reservoir. *Journal of Wuhan University of Technology Materials Science*, (44)4, pp.409-413.