

## رابطه‌ای تجربی برای برآورد سرعت رأس جریان غلیظ بر روی بستر با زبری‌های استوانه‌ای

بهاره شیخی نژاد<sup>۱\*</sup> و مهدی قمشی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۵/۱۸

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.sheikhinejad@gmail.com

### چکیده

در مخازن سدها با عمق زیاد جریان غلیظ معمولاً عامل انتقال و ته‌نشینی رسوبات است اگر جریان غلیظ به طور کامل در مناطق میانی مخزن سد متوقف شود مقدار رسوبگذاری در پای دیواره سد کاهش یافته و در نتیجه وظایف اصلی سد مختل خواهد شد. یکی از روش‌های تغییر هیدرولیک جریان غلیظ و کند کردن آن، زبر کردن بستر است. بنابراین در تحقیق حاضر سعی شده است سرعت رأس جریان غلیظ بر روی بستر با زبری‌های استوانه‌ای مورد بررسی قرار گیرد و رابطه‌ای برای سرعت رأس جریان غلیظ ارائه شود. آزمایش‌ها در فلومی به عرض ۳۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و طول ۹ متر با تزریق جریان غلیظ نمکی در غلظت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر و سه شیب ۰/۵، ۱/۲۵، ۲ درصد و زبری‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۲/۵، ۴ و ۵/۵ سانتی متر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد سرعت رأس جریان غلیظ در حین عبور از بستر صاف تقریباً ثابت بوده، در حالیکه در بستر زبر در طی مسیر سرعت رأس کاهش می‌یابد. شیب بستر و غلظت جریان ورودی رابطه مستقیم با سرعت رأس جریان غلیظ دارد. زبر کردن بستر سرعت رأس جریان غلیظ را کاهش داده است. افزایش ارتفاع زبری تا حد مشخصی باعث کاهش سرعت رأس جریان می‌شود. در نهایت رابطه‌ای برای تخمین سرعت رأس جریان غلیظ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: جریان غلیظ، سرعت رأس، زبری استوانه‌ای

## Providing an Empirical Relationship for Estimating Velocity of Density Current Head over the Bed with Cylindrical Roughness

B SHEikhinejad<sup>\*1</sup> and M GHomeshi<sup>2</sup>

Received: 18 September 2013 Accepted: 9 August 2014

<sup>1</sup>- M.Sc. Student, Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

<sup>2</sup>- Prof., Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

\*Corresponding Author, Email: b.sheikhinejad@gmail.com

### Abstract

In deep reservoirs the turbidity currents are usually the reason of transport and deposition of sediment. If the turbidity current is completely stopped in the middle regions of the reservoir; sediment deposition reduces near the dam wall and as a result the main tasks of the dam are not disrupted. Roughening up the bed is a technique for changing the density current hydraulics or slowing of its velocity. Therefore in the present research the head velocity of the density current on the bed with cylindrical roughness is studied and a relationship for head velocity is presented. A series of gravity currents experiments are performed in a flume with 35 cm width, 70 cm height and 9 m length. The experiments are developed as salinity fluid flow with three salt concentrations of 10, 15 and 20 g/L in bed slopes range of 0.5, 1.25 and 2% and three roughness height of 2.5, 4 and 5.5 cm. The result indicates that head velocity is almost constant during passage from smooth bed while it reduces significantly in rough bed. The bed slope and fluid concentration have direct relation with the head velocity. Roughening up the bed has reduced the gravity current head velocity. Also, increasing roughness height reduces the velocity of the current head to a certain extent. Finally, a relationship is developed to estimate the head velocity.

**Keyword:** Cylindrical roughness, Density current , Head velocity

سیال، مواد محلول در سیال یا اختلاف دما بین دو سیال باشد.

نمونه‌های طبیعی جریان غلیظ به وفور یافت می‌شوند که فعالیت‌های بشر نیز به انواع آنها افزوده است. حرکات بزرگ مقیاس هوای سرد، حرکت و پیشروی جبهه مه آلود، حرکت جریان مذاب ناشی از فعالیت آتشفشان در زیر دریا و سقوط بهمن نمونه‌های طبیعی از اینگونه جریان‌ها می‌باشند (پترز ۱۹۹۹). جریان کدر

مقدمه

جریان غلیظ و یا جریان چگال عبارت است از جریان یک سیال با جرم مخصوص معلوم در سیال دیگر با جرم مخصوص متفاوت. عامل ایجاد جریان گرادیان افقی فشار است که خود ناشی از اختلاف جرم مخصوص بین دو سیال می‌باشد. این اختلاف جرم مخصوص می‌تواند ناشی از وجود مواد رسوبی در

مجدور نسبت نیروی ثقل به اینرسی در جریانهای غلیظ عدد بی بعد ریچاردسون می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Ri = \frac{g'h_f \cos \alpha}{U_f^2} \quad [2]$$

که  $Ri$  عدد ریچاردسون،  $U_f$  سرعت رأس جریان غلیظ،  $h_f$  ارتفاع رأس و  $\alpha$  زاویه بستر با افق می‌باشند.

جریان غلیظ به واسطه رأس خود وارد سیال پیرامون می‌شود. برخلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دائمی بدنه، رأس جریان غیر دائمی است و عامل حرکت آن در توده سیال گردیدان فشار ناشی از اختلاف جرم مخصوص است. در شکل ۱ شمای کلی بدنه و رأس جریان غلیظ نشان داده شده است.

با فرض یکنواخت بودن جریان غلیظ روی شیب افقی و بدون در نظر گرفتن اصطکاک سرعت پیشانی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$U_f = \sqrt{2gh_f} \quad [3]$$

که در این رابطه  $U_f$  سرعت رأس جریان،  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته و  $h_f$  ارتفاع رأس جریان می‌باشد در ابتدا دالی (۱۹۳۶) سرعت رأس را تابعی از عمق جریان غلیظ، شیب و اختلاف چگالی بین دو سیال معرفی نمود و رابطه‌ای به صورت زیر بیان کرد:

$$U_f = \sqrt{dsh_f} \quad [4]$$

در این رابطه  $h_f$  عمق جریان غلیظ،  $s$  شیب و  $d$  اختلاف چگالی دو سیال می‌باشد.

کولگان (۱۹۵۷) تحقیقاتی بر روی چگونگی حرکت آب نمک در یک کانال بدون شیب انجام داد. وی نتایج تحقیقات خود را به صورت زیر ارائه نموده است:

$$U_f = 0.7\sqrt{g'h_f} \quad [5]$$

میدلتون (۱۹۶۶) با توجه به تحقیقات کولگان (۱۹۵۷)، با استفاده از پمپاژ محلول نمک و آزادسازی سوسپانسیون‌های ذرات پلاستیک از یک جعبه جریان غلیظ را تشکیل داد. وی خصوصیات رأس جریان را

در مخازن سدها، نشست نفت در دریاها، حرکت و پخش گازهای تولید شده از واحدهای صنعتی و هدایت فاضلاب‌های شهری و صنعتی به دریاها و رودخانه‌ها نمونه‌هایی از جریان‌های غلیظ ایجاد شده بر اثر فعالیت‌های انسان می‌باشد (سیمپسون، ۱۹۹۷).

جریان ورودی به یک دریاچه یا مخزن غالباً دارای غلظت متفاوت نسبت به آب دریاچه یا مخزن می‌باشد، که دلیل این اختلاف غلظت می‌تواند تفاوت در دما، شوری و یا ذرات معلق باشد. حداکثر غلظت جریان غلیظ در زمان سیلاب اتفاق می‌افتد که نتیجه آن ایجاد یک دریاچه گل آلود و رسوبگذاری در نزدیکی سازه سد بوده و این امر عملکرد سازه‌های آبگیر و خروجی‌های کف را مختل می‌کند. روشهای مختلفی برای کنترل جریان غلیظ وجود دارد. یکی از این روش‌ها هدایت جریان غلیظ به بیرون مخزن می‌باشد، که این امر مستلزم رهاسازی جریان به پایین دست و از دست دادن مقدار زیادی آب است. اگر در مخازن نتوان از رها سازی جریان به پایین دست استفاده کرد بهترین گزینه، جلوگیری از رسیدن جریان غلیظ به دیواره سد است تا بدین ترتیب از اثرات رسوبگذاری این جریان‌ها در پای سد جلوگیری نمود.

حرکت جریان غلیظ دارای شباهت‌هایی به حرکت جریان در مجاری روباز است ولی با آن تفاوت اساسی نیز دارد. در جریان درون کانال‌های باز، هوا سیال پیرامون را تشکیل می‌دهد و از آنجا که تأثیر آن ناچیز است از آن صرف نظر می‌شود. ولی در جریان غلیظ به دلیل اینکه سیال پیرامون تأثیر کاهنده‌ای روی نیروی ثقل دارد، قابل صرف نظر کردن نمی‌باشد. براین اساس شتاب ثقل موثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک بر جریان مطرح می‌باشد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g' = \frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} g \quad [1]$$

که در این رابطه  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته،  $g$  شتاب ثقل زمین،  $\rho_t$  و  $\rho_a$  به ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ می‌باشند.

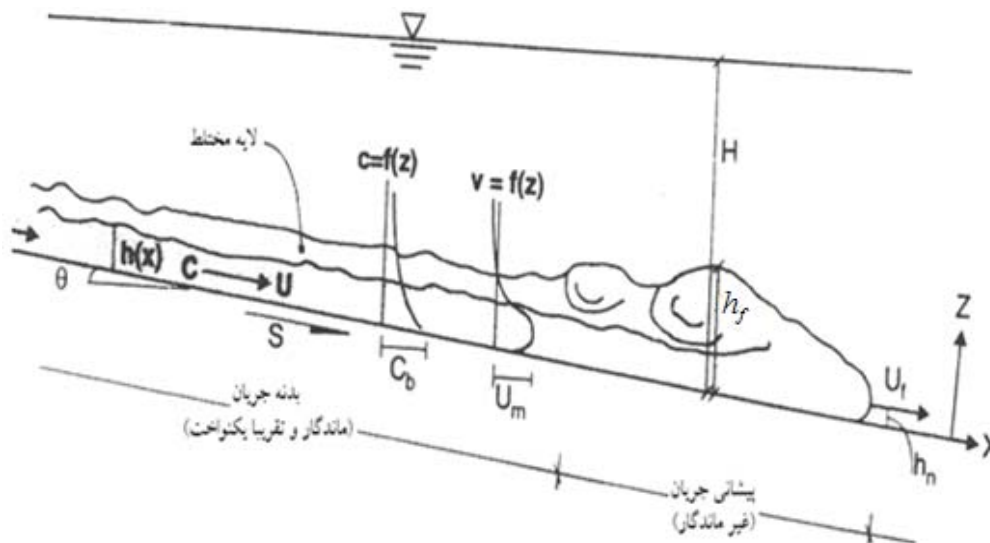
که در این رابطه  $h$  ضخامت بدنه جریان غلیظ می‌باشد.

مورد بررسی قرارداده و رابطه سرعت رأس جریان را به صورت زیر ارائه داد:

$$U_f = 0.75\sqrt{g'h_f} \quad [۶]$$

ترنر (۱۹۷۳) رابطه خود را برای محاسبه سرعت رأس جریان غلیظ به شکل زیر ارائه داد:

$$U_f = \sqrt{2}\sqrt{g'h} \quad [۷]$$



شکل ۱- شمای کلی جریان غلیظ و قسمت‌های مختلف آن (آلتیناکار و همکاران، ۱۹۹۰).

محققین برای سرعت پیشانی جریان رابطه زیر را بدست آورد:

$$U_f = 0.72\sqrt{2g'h_f} \quad [۹]$$

که در این رابطه  $h_f$  ضخامت رأس جریان غلیظ می‌باشد.

پترز (۱۹۹۹) با ایجاد زبری‌های دوبعدی (۶، ۱۳، ۱۹، ۲۵ میلیمتر) در یک فلوم آزمایشگاهی افقی سرعت رأس جریان غلیظ نمکی را بر روی سطوح زبر مورد بررسی قرار داد. وی نشان داد که سطوح زبر با کاهش سرعت رأس، باعث افزایش اثر ویسکوزیته در مقایسه با اینرسی در مسیر پیشروی جریان می‌شوند. همچنین نشان داد که ارتفاع رأس جریان حدود ۳۰ درصد بیشتر از مقدار آن بر روی سطوح صاف است.

بریتر و لندن (۱۹۸۰) با بررسی‌های آزمایشگاهی گزارش کردند که رأس جریان غلیظ در شیب‌های خیلی کم ( $\theta \leq 0.5^\circ$ ) با فاصله از منبع، شتاب کند شونده دارد. اما در شیب‌های زیاد نیروی ارشمیدس به قدر کافی بزرگ است و بر اثرات اصطکاکی فائق می‌آید و رأس جریان به یک سرعت ماندگار می‌رسد. آنها سرعت رأس جریان را تابعی از شدت جریان مستغرق اولیه  $B_0 = g'q_0$  و شیب بستر و عدد رینولدز معرفی نمودند.

$$U_f = (g'q_0)^{1/3} f(\theta, Re) \quad [۸]$$

که در این رابطه  $q_0$  دبی جریان غلیظ ورودی در عرض واحد می‌باشد.

قمشی (۱۹۹۵) در بررسی آزمایشگاهی در کانالی از جنس پلاستیک مصنوعی و استفاده از جریان غلیظ رسوبی و نمکی و نیز با استفاده از داده‌های سایر

در رابطه بالا  $\frac{U_f}{(g'q)^{\frac{1}{3}}}$  سرعت بی‌بعد،  $\frac{g'h_f}{U_f^2}$  عدد ریچاردسون،  $\frac{U_f h_f}{\nu}$  عدد رینولدز،  $\frac{k_s}{h_f}$  زبری نسبی و  $S$  شیب کانال می‌باشند.

پس از تحلیل ابعادی و مشخص شدن پارامترهای مؤثر بر سرعت رأس جریان غلیظ به منظور ایجاد شرایط مختلف جریان از فلومی به عرض ۳۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و طول ۹ متر و قابلیت تغییر شیب، در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد (شکل ۲). آزمایشات در سه غلظت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر (۱/۰۰۶۶، ۱/۰۱۰۱ و ۱/۰۱۳۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب) و سه شیب ۰/۵، ۱/۲۵ و ۲ به روش ماتریسی انجام شد. جهت ایجاد زبری از استوانه‌های پلاستیکی به قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۵، ۴۰، ۲۵ میلی‌متر استفاده گردید. فاصله مرکز به مرکز استوانه‌ها در هر ردیف ۳ سانتی‌متر و فاصله ردیف‌ها از هم ۷ سانتی‌متر بود و روی صفحات طلقی به طول ۴ متر چسبانده شده بود. نحوه چیدمان زبری‌ها به صورت شطرنجی بود که در طول تمام آزمایشات تغییر نمی‌کرد (شکل ۳). دبی در طول تمام آزمایشات ثابت و برابر ۰/۷ لیتر بر ثانیه بود. خلاصه برنامه آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است.

برای شبیه‌سازی جریان غلیظ مانند مخزن سد، سیال محیطی از انتها وارد فلوم می‌شد و ارتفاع آن توسط سرریز تعبیه شده در انتهای فلوم ثابت نگه داشته می‌شد. در یک متری ابتدای کانال دریچه‌ای نصب شده تا توسط آن سیال غلیظ و سیال پیرامون از هم جدا شوند. دریچه از نوع کشویی با اهرم طراحی شده تا بتوان آنرا بصورت آبی و با بازشدگی مناسب گشود. برای کاهش تلاطم سیال غلیظ ورودی قبل از دریچه از صفحات سوراخ داری به عنوان آرام کننده استفاده شد. زبری‌ها از فاصله ۱/۵ متری دریچه ورودی تا انتهای فلوم ادامه داشتند. سیال غلیظ با غلظت مناسب درون مخزن اختلاط حل می‌شد و با حل کردن ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم که باعث تغییر در EC سیال غلیظ نمی‌شد، از سیال پیرامون قابل تفکیک بود. محلول آماده

حقی‌آبی (۲۰۰۴) رابطه بین سرعت جبهه جریان و شدت جریان مستغرق را برای شیب ثابت ۱٪ به صورت زیر ارائه کرد.

$$U_f = 1.013(g'q_0)^{0.324} \quad [10]$$

لاروکا و همکاران (۲۰۰۸) با شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی دینامیک جریان غلیظ سه بعدی روی بستر زبر نشان دادند مقدار کاهش سرعت رأس جریان غلیظ در زبری‌های مختلف یکنواخت نیست و کمترین مقدار آن در زبری نسبی  $0.01 < \frac{\varepsilon}{h_f} < 0.005$  بوده و در زبری نسبی  $\frac{\varepsilon}{h_f} > 0.01$  کاهش سرعت رأس جریان غلیظ ثابت است.

با توجه به اینکه خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ تحت تاثیر زبری و شیب بستر و غلظت جریان ورودی قرار دارد، هدف از این تحقیق مطالعه سرعت پیشروی بر روی سطوح، با زبری‌های استوانه‌ای می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در بررسی اثر زبری روی رأس جریان غلیظ، متغیرهای قابل اندازه‌گیری حاکم به صورت زیر مشخص می‌شوند:

$$f(U_f, q, h_f, \nu, S, k_s, g') = 0 \quad [11]$$

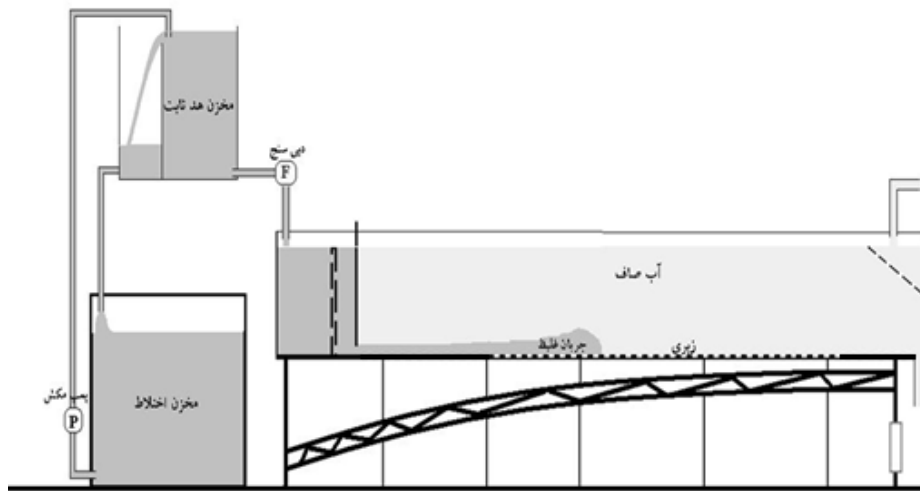
که در این رابطه  $U_f$  سرعت رأس جریان غلیظ،  $g'$  شتاب ثقل کاهش یافته،  $q$  دبی در واحد عرض ورودی جریان غلیظ،  $h_f$  ارتفاع رأس جریان غلیظ،  $k_s$  ارتفاع زبری بستر،  $S$  شیب بستر و  $\nu$  لزجت سینماتیک سیال غلیظ می‌باشند.

با آنالیز ابعادی به روش باکینگهام و مروری بر منابع انجام شده پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$\frac{U_f}{(g'q)^{\frac{1}{3}}} = f\left(\frac{g'h_f}{U_f^2}, \frac{U_f h_f}{\nu}, \frac{k_s}{h_f}, S\right) \quad [12]$$

به منظور بدست آوردن سرعت رأس جریان غلیظ در همه آزمایش‌ها رأس جریان غلیظ به صورت لحظه‌ای تصویر برداری می‌شد و سرعت رأس جریان در چهار مقطع که به فاصله ۶۰ سانتی‌متر از هم قرار داشتند اندازه گیری می‌شد در همان مقاطع نیز از رأس جریان غلیظ نمونه برداری می‌شد. اولین مقطع ۲ متر از دریچه ابتدایی فاصله داشت.

شده با استفاده از پمپ به مخزن هد ثابت انتقال می‌یافت. مخزن هد ثابت به دو بخش تقسیم شده است تا امکان سرریز کردن سیال اضافی وجود داشته باشد و سیال غلیظ به صورت ثقلی وارد فلوم شود. برای اطمینان از اینکه سیال غلیظ تنها به دلیل اختلاف غلظت وارد سیال محیطی شود، دریچه زمانی باز می‌شد که سطح سیال محیطی و سیال پیرامون برابر باشند.



شکل ۲- شماتیک فلوم مورد استفاده.



شکل ۳- زبری‌های مورد استفاده.

جدول ۱- خلاصه آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	$C(g/L)$	$S(\%)$	$k_s(mm)$	$U_1(mm/s)$	$U_2(mm/s)$	$U_3(mm/s)$	$U_4(mm/s)$
۱	۱۰	۰/۵	۰	۲۳/۳۳	۲۳/۳۳	۲۲/۸۲	۲۲/۸۲
۲	۱۰	۰/۵	۲۵	۳۰/۱۲	۲۵/۷۷	۲۵/۲۶	۲۲/۷۳
۳	۱۰	۰/۵	۴۰	۱۹/۸۴	۱۷/۴۸	۱۵/۵۳	۱۴/۰۴
۴	۱۰	۰/۵	۵۵	۲۰/۸۲	۱۷/۹۹	۱۶/۶۷	۱۵/۶۳
۵	۱۵	۰/۵	۰	۴۰/۳۲	۳۹/۶۸	۳۹/۰۶	۳۹/۰۶
۶	۱۵	۰/۵	۲۵	۳۴/۲۵	۳۰/۱۲	۲۸/۴۱	۲۶/۳۱
۷	۱۵	۰/۵	۴۰	۲۲/۵۲	۲۰/۱۶	۱۸/۲۵	۱۵/۶۳
۸	۱۵	۰/۵	۵۵	۲۱/۹۲	۱۹/۶۹	۱۷/۷۳	۱۵/۶۳
۹	۲۰	۰/۵	۰	۵۳/۱۹	۵۲/۰۸	۵۱/۰۲	۵۰
۱۰	۲۰	۰/۵	۲۵	۳۲/۲۱	۳۱/۲۵	۲۹/۷۶	۲۸/۷۴
۱۱	۲۰	۰/۵	۴۰	۲۳/۸۱	۲۱/۵۵	۲۰	۱۷/۶۱
۱۲	۲۰	۰/۵	۵۵	۲۳/۵۸	۲۱/۳۷	۱۹/۲۳	۱۶/۷۸
۱۳	۱۰	۱/۲۵	۰	۲۵/۷۱	۲۵/۲۱	۲۴/۷۲	۲۴/۷۲
۱۴	۱۰	۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۴	۲۷/۷۸	۲۵/۲۶	۲۵
۱۵	۱۰	۱/۲۵	۴۰	۲۵	۲۱/۵۵	۱۸/۸	۱۷
۱۶	۱۰	۱/۲۵	۵۵	۲۲/۷۳	۱۸/۸	۱۷/۲۴	۱۶/۶۷
۱۷	۱۵	۱/۲۵	۰	۴۳/۱	۴۲/۳۷	۴۲/۳۷	۴۱/۶۷
۱۸	۱۵	۱/۲۵	۲۵	۳۷/۸۸	۳۴/۷۲	۳۱/۲۵	۲۷/۴۷
۱۹	۱۵	۱/۲۵	۴۰	۲۸/۰۹	۲۳/۵۸	۲۰/۸۳	۱۸/۸
۲۰	۱۵	۱/۲۵	۵۵	۲۶	۲۲/۹۴	۱۸/۸	۱۶/۱۳
۲۱	۲۰	۱/۲۵	۰	۵۱/۰۲	۵۱/۰۲	۵۰	۵۹/۰۲
۲۲	۲۰	۱/۲۵	۲۵	۴۲/۳۷	۳۷/۸۸	۳۴/۲۵	۳۱/۲۵
۲۳	۲۰	۱/۲۵	۴۰	۳۰/۴۹	۲۶/۶	۲۴/۲۷	۲۱
۲۴	۲۰	۱/۲۵	۵۵	۲۸/۴۱	۲۴/۲۷	۱۹/۵۳	۱۶/۵۶
۲۵	۱۰	۲	۰	۴۱/۶۷	۴۱/۶۷	۴۱/۶۷	۴۱/۶۷
۲۶	۱۰	۲	۲۵	۳۳/۳	۳۱/۶۵	۳۰/۸۶	۲۹/۴۱
۲۷	۱۰	۲	۴۰	۲۷/۷۸	۲۲/۷۳	۱۹/۸۴	۱۷/۷۳
۲۸	۱۰	۲	۵۵	۲۳/۸۱	۲۱/۱۹	۱۸/۸	۱۷/۶۱
۲۹	۱۵	۲	۰	۵۰	۵۰	۴۹/۰۲	۵۰
۳۰	۱۵	۲	۲۵	۴۰/۳۲	۳۶/۴۷	۳۴/۴۹	۳۰/۲۹
۳۱	۱۵	۲	۴۰	۳۰/۱۲	۲۵/۲۵	۲۱/۷۴	۱۹/۰۸
۳۲	۱۵	۲	۵۵	۲۹/۴	۲۴/۵	۱۹/۳۸	۱۶/۶۷
۳۳	۲۰	۲	۰	۵۲/۰۸	۵۲/۰۸	۵۲/۰۸	۵۲/۰۸
۳۴	۲۰	۲	۲۵	۴۵/۴۵	۴۰/۹۸	۳۸/۴۶	۳۳/۷۸
۳۵	۲۰	۲	۴۰	۳۳/۷۸	۳۰/۸۶	۲۶/۳۲	۲۳/۱۵
۳۶	۲۰	۲	۵۵	۳۰/۱۲	۲۵/۲۵	۲۰	۱۷/۱۲

## نتایج و بحث

چشمگیری داشته است. همچنین با افزایش ارتفاع زبری-ها سرعت جریان کاهش یافته است. علت کاهش سرعت رأس را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

(۱) جدایی لایه مرزی تشکیل شده اطراف زبری-های استوانه‌ای و ایجاد ناحیه wake در قسمت پشت زبری‌ها در اختلاط سیال پیرامون و رقیق‌تر شدن سیال غلیظ نقش زیادی دارد.

(۲) سیال پیرامون در فاصله بین زبری‌ها به دام می‌افتد و با افزوده شدن به جریان غلیظ باعث افزایش رقیق‌سازی آن می‌شود.

(۳) زبری‌ها باعث افزایش ضریب اصطکاک و در نتیجه افزایش تنش برشی به عنوان عامل مقاومت در برابر جریان می‌شوند.

با توجه به نمودار شکل ۶ افزایش ارتفاع زبری، تا حد مشخصی باعث کاهش سرعت رأس جریان می‌شود و از آن به بعد افزایش ارتفاع زبری تأثیری در کاهش سرعت رأس ندارد. به عبارت دیگر در این حالت جریان غلیظ دچار برخاستگی شده است.

پس از اندازه‌گیری سرعت در رأس جریان غلیظ، به منظور بررسی اثر هریک از پارامترهای بی‌بعد شیب و زبری نسبی روی سرعت رأس جریان غلیظ نمودار هریک از پارامترهای مستقل در مقابل سرعت

بی‌بعد  $(\frac{U_f}{(g'q)^{\frac{1}{3}}})$  در شکل‌های ۷ و ۸ رسم شده‌اند.

با توجه به نمودارها رابطه پارامترهای بی‌بعد مستقل  $S$  با پارامتر وابسته سرعت بی‌بعد به صورت خطی می‌باشد و رابطه  $\frac{k_s}{h}$  به صورت نمایی است.

همچنین به دلیل اینکه عدد رینولدز جریان در تمام آزمایشات از ۲۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متغیر بود، آزمایشات در محدوده جریان آشفته قرار داشتند و لذا از اثر رینولدز صرف نظر گردید. بنابراین رابطه زیر برای تخمین سرعت بی‌بعد رأس جریان غلیظ ارائه می‌شود.

[۱۳]

$$\frac{U_f}{(g'q)^{\frac{1}{3}}} = 281.5e^{-0.003\left(\frac{k_s}{h}\right)} + 0.046S - 280.6$$

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، حرکت پیشانی جریان غلیظ به دلیل گرادیان افقی فشار است و اختلاط سیال محیطی و اصطکاک بستر روی آن تأثیر بسزایی دارند. بنابراین در تحقیق حاضر به منظور بررسی تأثیر زبری‌های استوانه‌ای روی سرعت پیشانی جریان غلیظ در شرایط متفاوت جریان ورودی، با در نظر گرفتن اثر شیب و غلظت و مقایسه آن با بستر صاف تعدادی آزمایش نمکی به روش ماتریسی انجام پذیرفت.

در شکل ۴ نمودار تغییرات سرعت پیشانی در طول مسیر در شیب ۰/۵ درصد و سه غلظت ۱۰، ۱۵، ۲۰ گرم بر لیتر برای هر دو نوع بستر صاف و زبر (با سه زبری متفاوت) برای نمونه آورده شده است.

مقایسه نمودارهای شکل ۴ نشان می‌دهد در بستر صاف سرعت پیشانی تقریباً ثابت بوده و مقدار جزئی کاهش سرعت به این دلیل است که در زمان حرکت پیشانی جریان درون سیال پیرامون مقداری از سیال پیرامون به داخل پیشانی وارد می‌شود و آنرا رقیق‌تر می‌کند، در حالیکه در بستر زبر در طی مسیر سرعت پیشانی کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ نمودار تغییرات سرعت رأس جریان غلیظ در مقابل تغییرات غلظت ورودی آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد افزایش غلظت باعث افزایش سرعت رأس جریان غلیظ می‌شود؛ این افزایش، از غلظت ۱۰ گرم بر لیتر به غلظت ۱۵ گرم بر لیتر به طور نسبی ۱۲ درصد و از غلظت ۱۵ گرم بر لیتر به غلظت ۲۰ گرم بر لیتر به طور نسبی ۱۶ درصد است. هنگامی که غلظت سیال غلیظ ورودی افزایش می‌یابد باعث افزایش اختلاف چگالی بین سیال غلیظ و سیال محیطی شده، در نتیجه گرادیان فشار افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه حرکت رأس به دلیل گرادیان فشار است، سرعت رأس جریان افزایش می‌یابد.

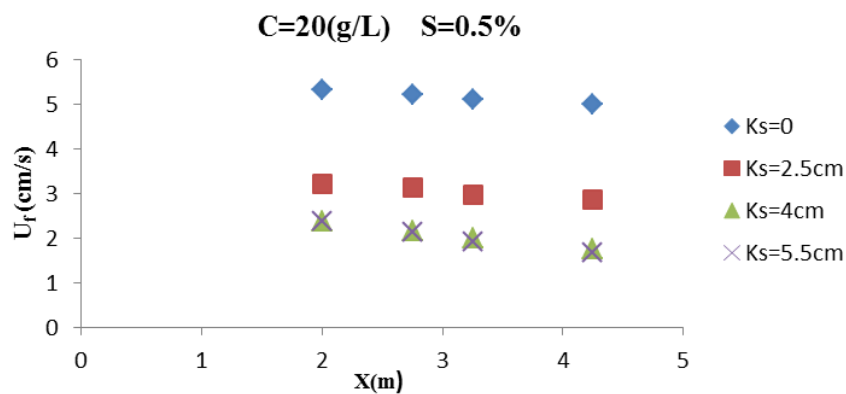
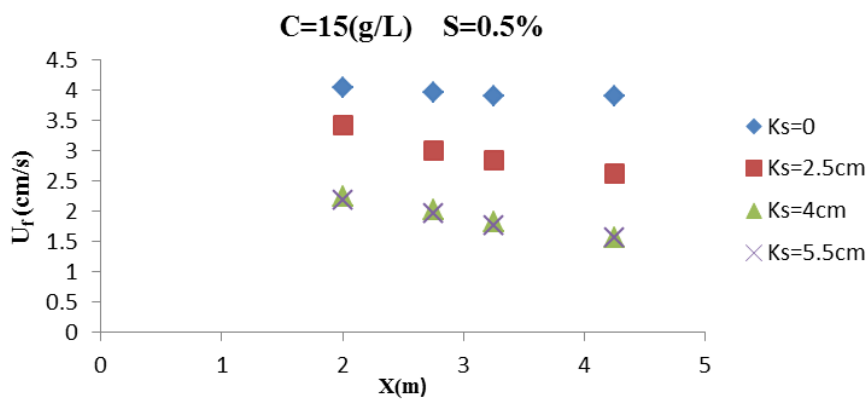
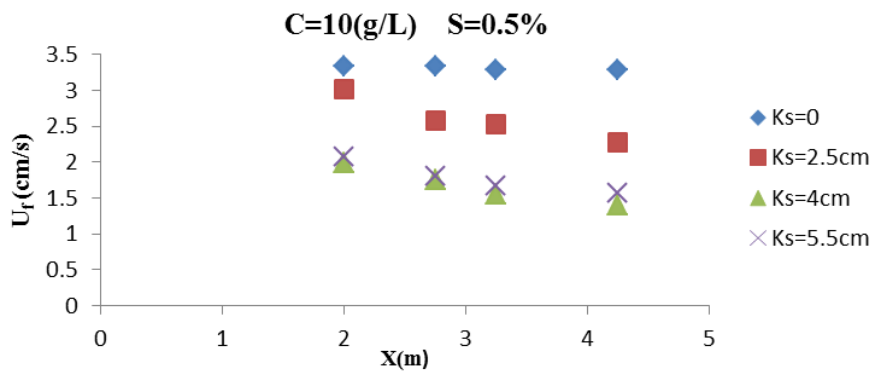
در شکل ۶ نمودار تغییرات سرعت رأس جریان غلیظ در مقابل تغییرات زبری رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد سرعت رأس جریان غلیظ در زمان عبور از روی بستر زبر نسبت به بستر صاف کاهش



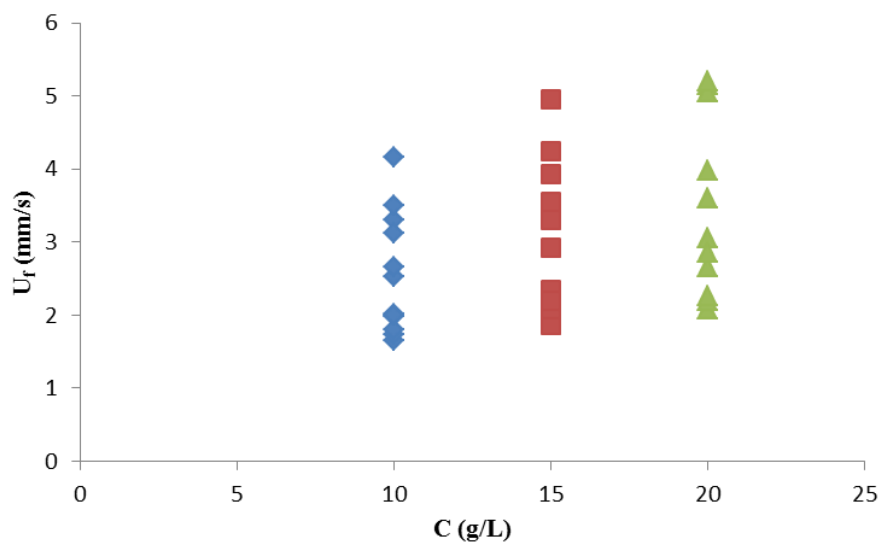
می‌شود. این شکل نشان می‌دهد رابطه بالا تخمین مناسبی از سرعت رأس جریان غلیظ ارائه می‌دهد.

که  $R^2$  این رابطه ۰/۷۱ می‌باشد.

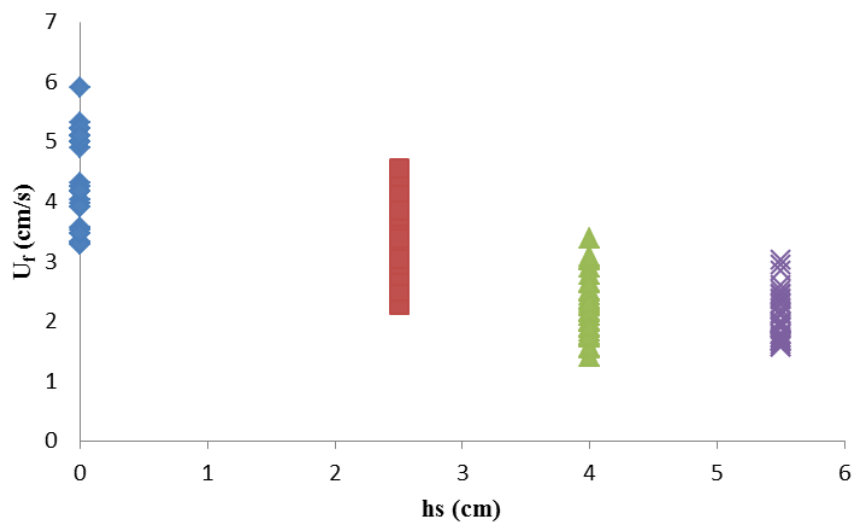
برای محاسبه رابطه رگرسیونی بالا، ۸۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون صحت سنجی به کار رفتند. نتیجه این آزمون به صورت نمودار شکل ۹ ارائه



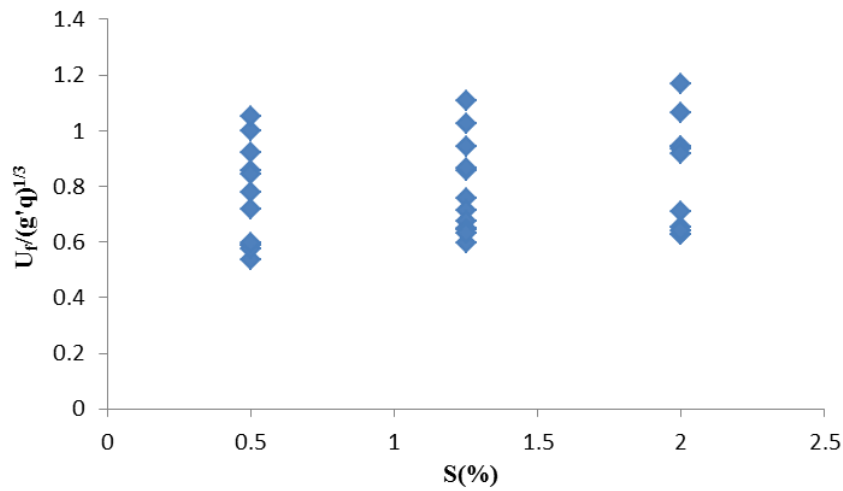
شکل ۴- نمودار تغییرات سرعت رأس جریان غلیظ در طول مسیر برای هر دو بستر صاف و زبر.



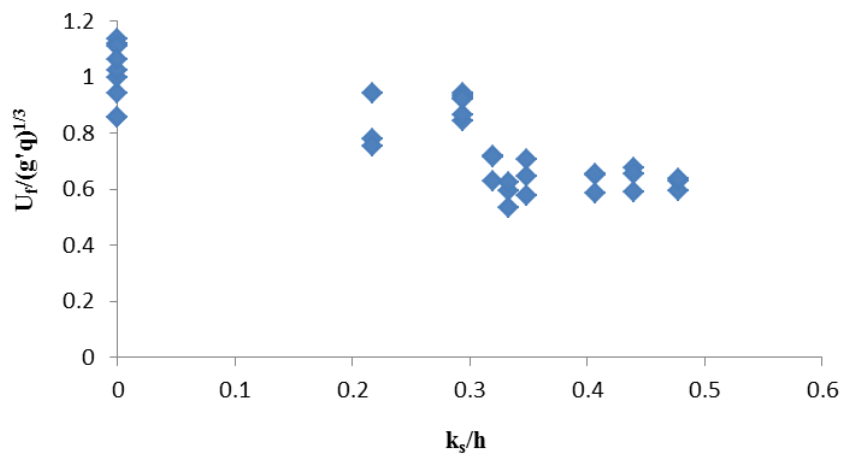
شکل ۵- نمودار تغییرات سرعت رأس جریان غلیظ در مقابل تغییرات غلظت ورودی.



شکل ۶- نمودار تغییرات سرعت رأس جریان غلیظ در مقابل تغییرات ارتفاع زبری.



شکل ۷- نمودار تغییرات سرعت بی‌بعد رأس جریان غلیظ در مقابل تغییرات شیب کف کانال.

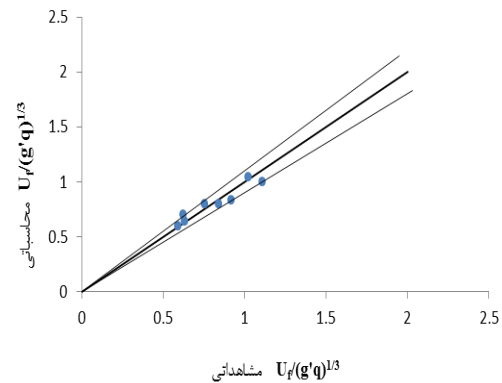


شکل ۸- نمودار تغییرات سرعت بی‌بعد رأس جریان غلیظ در مقابل تغییرات زبری نسبی.

سرعت رأس جریان غلیظ در حین عبور از بستر صاف تقریباً ثابت بوده، در حالیکه در بستر زبر در طی مسیر سرعت رأس کاهش می‌یابد.

سرعت رأس جریان غلیظ در زمان عبور از روی بستر زبر نسبت به بستر صاف کاهش چشمگیری داشته است (به طور متوسط ۳۵ درصد). همچنین با افزایش ارتفاع زبری از ۲/۵ سانتی‌متر به ۴ سانتی‌متر سرعت رأس جریان غلیظ به طور متوسط ۳۳ درصد کاهش یافته است.

افزایش ارتفاع زبری از ۴ سانتی‌متر (معادل ۰/۳ ارتفاع رأس جریان غلیظ) به ۵/۵ سانتی‌متر (معادل ۰/۴ ارتفاع رأس جریان غلیظ) تأثیری در کاهش سرعت رأس جریان غلیظ نداشته است بنابراین افزایش ارتفاع زبری تا حد مشخصی باعث کاهش سرعت رأس جریان می‌شود و از آن به بعد افزایش ارتفاع زبری تأثیری در کاهش سرعت رأس ندارد. به عبارت دیگر در این حالت جریان غلیظ دچار برخاستگی شده است.



شکل ۹- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سرعت بی‌بعد رأس جریان غلیظ.

### نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اهداف تحقیق و آزمایش‌های انجام شده نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشند:

### منابع مورد استفاده

- Altinakar MS, Graf WH and Hopfinger EJ, 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. Journal of Hydraulic Research, 28(1): 55-80.
- Britter RE and Linden P, 1980. The motion of the front of a gravity current traveling down an incline. Journal of Fluid Mechanics, 99(3): 531- 543.
- Daly RA, 1936. Origin of submarine canyons. American Journal of Sciences, 31: 401-420.
- Ghomeshi M, 1995. Reservoir sedimentation modeling. Ph.D. Thesis. University of Wollongong. Australia.
- Hagiabi AH, 2004. Bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents, Ph.D. Thesis, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.
- Keulegan GH, 1957. The motion of saline fronts in still water, Twelfth Progress Report on Model Laws for Density Currents. U.S. National Bureau Standards Report.
- LaRocca M, Adduce C, Sciortino G, and Pinzon AB, 2008. Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom. Journal of Physics of Fluids, 20, 106603
- Middleton GV, 1966., Experiments on density and turbidity currents motion of the head, Canadian Journal of Earth Science. (3):523-546.
- Peters WD, 1999. Rough surface gravity current flows. Ph.D. Thesis. University of New Brunswick. Canada.
- Simpson JE, 1997. Gravity Currents in the Environmental and Laboratory. Cambridge University Press.
- Turner JS, 1973. Buoyancy Effects in Fluids, Cambridge University Press London, U.K.