

## بررسی آزمایشگاهی اثر شیب و زبری کف بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی

مهدی دریائی<sup>۱\*</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup> و مهدی قمشی<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز [Mehdi.daryae@yahoo.com](mailto:Mehdi.daryae@yahoo.com)

<sup>۲</sup> - استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> - استاد گروه سازه های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۲

### چکیده

رسوبگذاری در مخازن سدها از عوامل بسیار مهم کاهش عمر مفید آنها می باشد. عامل اصلی حرکت رسوبات در مخازن سد جریان غلیظ می باشد. لذا شناخت دقیق این پدیده می تواند کمک شایانی در کنترل جریان غلیظ و افزایش عمر مفید سدها داشته باشد. در این تحقیق تأثیر همزمان زبری و شیب بستر بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش ها در فلومی به طول ۷۸۰ سانتی متر، عرض ۳۵ سانتی متر و ارتفاع ۷۰ سانتی متر با چهار اندازه ارتفاع زبری (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر) و چهار شیب (۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد) انجام شد. همچنین در کلیه آزمایش ها دو غلظت ۱۰ گرم در لیتر ( $\rho_s = 1008 \text{ kg/m}^3$ ) و ۲۰ گرم در لیتر ( $\rho_s = 1017 \text{ kg/m}^3$ ) از جریان غلیظ رسوبی مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع ۳۲ سری آزمایش انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع زبری سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ کاهش و با افزایش شیب افزایش می یابد. همچنین با در نظر گرفتن زبری، ضریب کولگان در برآورد سرعت پیشانی حدود ۴۰ درصد نسبت به شرایط با کف بدون زبری کاهش یافت و مقدار متوسط آن ۰/۴ حاصل گردید. از طرفی افزایش شیب باعث کاهش تأثیر زبری در کم کردن سرعت پیشانی و بدنه شد. در انتها با استفاده از نرم افزار Datafit معادله هایی به منظور پیش بینی سرعت پیشانی و سرعت بدنه جریان غلیظ با در نظر گرفتن زبری و شیب ارائه گردید که میزان  $R^2$  در آنها به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۰/۷۳ محاسبه گردید.

**کلید واژه ها:** جریان کدر، شیب طولی، زبری، سرعت پیشانی، سرعت بدنه.

## Experimental Study of the Effect of Slope and Bed Roughness on Head and Body Velocities in Sedimentary Density Current

M. Daryae<sup>1</sup>, S. M. Kashefipour<sup>2</sup> and M. Ghomshi<sup>3</sup>

- 1- Ph.D. student, Hydraulic Structures Department, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 2- Professor, Hydraulic Structures Department, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- 3- Professor, Hydraulic Structures Department, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

Received: 2 Jan 2013

Accepted: 16 June 2013

### Abstract

Sedimentation in dam reservoirs is the most important phenomenon in reducing their useful life. One of the most important phenomenon affecting sediment movement in dam reservoirs is density current. Therefore, understanding of density or gravity current can be helpful in controlling this phenomenon and increasing the useful life of dam reservoirs. In this research the effect of the roughness and bed slope on the head and of body density current velocity has been studied. Experiments were performed in a flume with a length of 780 cm,

width of 35 cm and height of 70 cm with 4 height roughness (0, 0.5, 1 and 1.5 cm), 4 bed slopes (0%, 1.5%, 2.5% and 3.5%) and with two sediment concentrations including 10 g/lit ( $\rho_t = 1008 \text{ kg/m}^3$ ) and 20 g/lit ( $\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$ ), in total 32 experiments were carried out. The results showed that the head and body velocities decreased with increasing roughness height and increased with increasing bed slope. The Keulegan coefficient for estimating head velocity results decreased about 40% in comparison with the conditions without roughness, with its mean value being obtained about 0.4. However, increasing the bed slope reduces the effect of roughness in decreasing of head and body velocity. Finally, two equations were developed using Datafit software to estimate the head and body velocities of density current as the functions of roughness and bed slopes with the determination coefficients ( $R^2$ ) being calculated 0.85 and 0.73, respectively.

**Key words:** Turbidity current, Longitudinal slope, Roughness, Head velocity, Body velocity.

#### مقدمه

خصوصاً اندازه گیری پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ به صورت آزمایشگاهی مطالعاتی انجام دادند. موریس و الکساندر<sup>۶</sup> (۲۰۰۳) تغییر در جهت جریان را در اثر یک مانع گوه ای شکل با دیواره قائم را با جریان نمکی و رسوبی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که یک مانع نسبتاً کوچک می تواند بر الگوی جریان و ضخامت رسوبگذاری تا فاصله قابل ملاحظه ای از مانع تأثیر بگذارد. پیپر و نورمارک<sup>۷</sup> (۲۰۰۹) بر روی فرآیندهایی که منجر به ایجاد جریان غلیظ می شوند مطالعاتی انجام دادند. سکویروس و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۹) بر روی شتاب گرفتن جریان غلیظ ناشی از ورود ذرات معلق از بستر به درون جریان غلیظ مطالعاتی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات مواد بستر در شکل گیری این پدیده نقش بسیار مهمی ایفا می کند. سکویروس و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۱۰a) بر روی مشخصات سرعت جریان غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر متحرک مطالعاتی انجام دادند. آنها در آزمایش های خود دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی را در نظر گرفتند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که بسته به رژیم جریان با گذشت زمان ممکن است بستر بدون تغییر مانده یا فرم بستر تشکیل شود که بر روی پروفیل عمودی سرعت تأثیرگذار خواهد بود. اسلام و امران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۰) مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرعت متوسط و ساختار تلاطم جریان کدر پایستار انجام دادند. آنها در انجام آزمایش ها از سرعت سنج آکوستیک استفاده نمودند و با استفاده از نتایج حاصل سرعت متوسط، انرژی جنبشی توربولانت و تنش های رینولدزی را استخراج نمودند. ولز و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۰) در مورد معادله بین ضریب ورود رسوبات به جریان غلیظ و ضریب سرعت جریان غلیظ مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند.

امروزه احداث سدها یکی از مهمترین راهکارها برای ذخیره آبهای سطحی می باشد. همه ساله بخش اعظمی از حجم مفید مخازن سدها به واسطه رسوبگذاری از بین می رود. با توجه به این موضوع که عامل اصلی حرکت رسوبات در مخازن سد پدیده ای به نام جریان غلیظ می باشد، لذا مطالعه در خصوص شناخت دقیق این پدیده از اهمیت خاصی برخوردار است. جریان غلیظ جریانی با چگالی  $\rho_t$  است که ذاتاً به دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر روی شتاب جاذبه به وجود می آید. این بدین معنی است که نیروی ثقل به نسبت  $\frac{\Delta\rho}{\rho_a}$  کاهش یافته است. بنابراین شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می باشد به صورت زیر بیان می گردد:

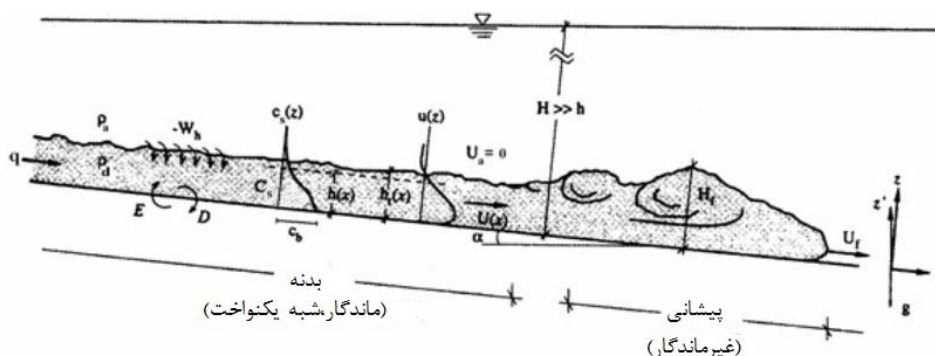
$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} = g C_s \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (1)$$

که در این معادله،  $g'$ : شتاب ثقل کاهش یافته،  $C_s$ : غلظت حجمی متوسط رسوبات غیر چسبنده،  $\rho_a$ : دانسیته سیال پیرامون،  $\rho_t$ : دانسیته سیال غلیظ،  $\rho_w$ : دانسیته آب و  $\rho_s$ : دانسیته ذرات رسوب می باشد. در شکل (۱) شماتیکی از حرکت جریان غلیظ ارائه شده است.

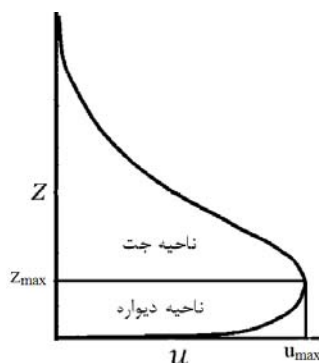
مطالعات بسیاری در خصوص شناخت پدیده جریان غلیظ صورت پذیرفته و معادله های تجربی و تئوری بسیاری جهت پیش بینی خصوصیات آن ارائه گردیده است. الیسون و ترنر<sup>۱</sup> (۱۹۵۹)، لافکویبیست<sup>۲</sup> (۱۹۶۰)، میدلتون<sup>۳</sup> (۱۹۶۶)، آلتیناکار و همکاران<sup>۴</sup> (۱۹۹۶)، نلر و همکاران<sup>۵</sup> (۱۹۹۹) و باکی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۱) در

6- Buckee et al.  
7- Morris and Alexander  
8- Piper and Normark  
9- Sequeiros et al.  
10- Sequeiros et al.  
11- Islam and Imran  
12- Wells et al.

1- Ellison and Turner  
2- Lofquist  
3- Middleton  
4- Altinakar et al.  
5- Kneller et al.



شکل ۱- شماتیکی از حرکت جریان غلیظ



شکل ۲- تفکیک ناحیه جت و دیواره با توجه به پروفیل سرعت در جریان غلیظ

مقدار ضریب ثابت را برابر ۰/۷ ارائه کرد. برای این ضریب توسط سایر محققین عددی بین ۰/۶۳ تا ۰/۷۵ برآورد شده است. آلتیناکار و همکاران<sup>۶</sup> (۱۹۹۶) بدنه جریان غلیظ را به دو قسمت تقسیم کردند. قسمت اول از کف بستر تا ارتفاعی که سرعت جریان غلیظ در آن حداکثر می شود (ناحیه دیواره) و قسمت دوم از جایی که سرعت جریان غلیظ حداکثر می باشد تا انتهای ارتفاع بدنه جریان غلیظ (ناحیه جت). آنها معتقد بودند آشفتگی جریان در ناحیه دیواره ناشی از تأثیر بستر می باشد. همچنین رسوبگذاری در این ناحیه صورت می پذیرد. در صورتی که آشفتگی در ناحیه جت ناشی از اصطکاک جریان با سیال پیرامون می باشد (شکل ۲). الیسون و ترنر<sup>۷</sup> (۱۹۵۹) با توجه به اینکه تفکیک جریان غلیظ از سیال پیرامون بسیار مشکل می باشد، لذا معادله‌های زیر را به منظور تخمین ارتفاع و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ ارائه نمودند:

$$Uh = \int_0^{\infty} u dz = \int_0^{h_i} u dz \quad (3)$$

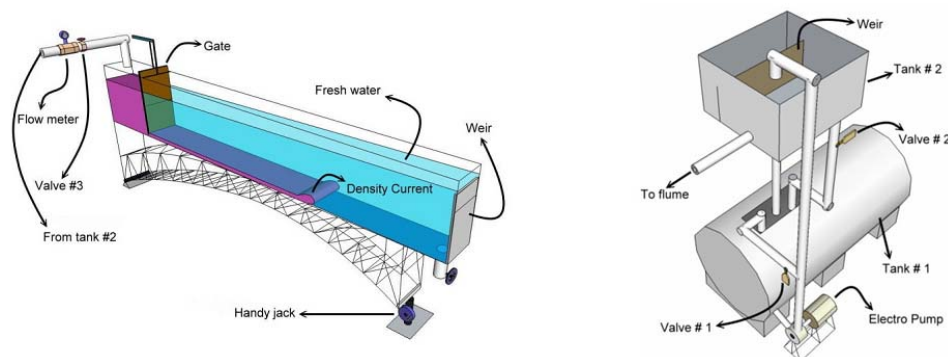
سکویروس همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۰b) بر روی انتقال بار بستر و همچنین مقاومت بستر با در نظر گرفتن جریان کدر مطالعاتی انجام دادند. میبورگ و نلر<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) بر روی جریان‌های کدر و ته‌نشست آنها مطالعاتی انجام دادند. باربوسا و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) بر روی جریان‌های کدر در حالت ماندگار مطالعاتی با استفاده از روش‌های عددی انجام دادند. آنها در مطالعات خود بازه وسیعی از اعداد رینولدز و ریچاردسون را در نظر گرفتند. گلاستون و پریچارد<sup>۴</sup> (۲۰۱۰) بر روی الگوهای ته‌نشینی در جریان‌های کدر مطالعاتی انجام دادند. در خصوص سرعت پیشانی در جریانات غلیظ معادله‌های تئوری و تجربی بسیاری وجود دارد. کولگان<sup>۵</sup> (۱۹۸۵) معادله زیر را جهت تعیین سرعت پیشانی در جریان غلیظ نمکی ارائه نمود:

$$U_f = C_c \sqrt{g' H_f} \quad (2)$$

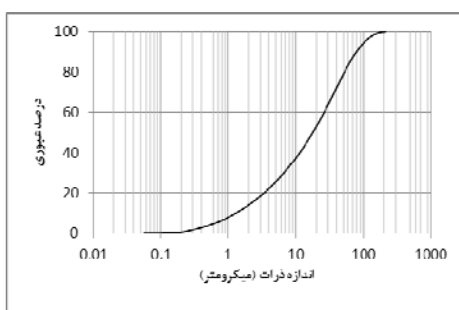
که در این معادله  $U_f$ : سرعت پیشانی جریان غلیظ،  $H_f$ : ارتفاع پیشانی جریان غلیظ و  $C_c$ : ضریب ثابت کولگان می باشد. کولگان

6- Altinakar et al.  
7- Ellison and Turner

1- Sequeiros et al.  
2- Meiburg and Kneller  
3- Barbosa et al.  
4- Gladstone and Pritchard  
5- Keulegan



شکل ۳- نمایشی از مخزن و فلوم



شکل ۴- منحنی دانه بندی پودر سنگ مورد استفاده

یک دریچه در ابتدا به دو قسمت تقسیم و بدین وسیله جریان غلیظ از سیال پیرامون جدا شده و در هنگام شروع آزمایش با استفاده از یک اهرم این دریچه با ارتفاع مشخص بالا رفته و جریان غلیظ وارد سیال پیرامون می شود.

در شکل (۴) منحنی دانه بندی پودر سنگ ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) اندازه متوسط ذرات ( $D_{50}$ ) در حدود ۱۷ میکرومتر،  $D_{84}$  در حدود ۶۳ میکرومتر و  $D_{16}$  در حدود ۳ میکرومتر می باشد.

همچنین ضریب یکنواختی ( $\frac{D_{84}}{D_{16}}$ ) در حدود ۴/۵ می باشد که نشان دهنده غیر یکنواخت بودن مصالح مورد استفاده می-

باشد.

در این تحقیق بررسی تأثیر زبری در ناحیه دیواره صورت پذیرفته است. لذا به منظور تعیین ارتفاعات زبری، آزمایشی که در آن کمترین ( $Z_{max}$ ) با توجه به شکل (۲) شکل بگیرد با شیب طولی ۳/۵ درصد و غلظت ۲۰ گرم در لیتر انجام شد. بلند ترین ارتفاع زبری مورد استفاده در این تحقیق از  $Z_{max}$  در این حالت کمتر در نظر گرفته شده است. در شکل (۵) پروفیل سرعت جریان غلیظ در این آزمایش ارائه شده است. پروفیل سرعت جریان غلیظ توسط دستگاه DOP2000 اندازه گیری می شد. همان طور که در شکل (۴)

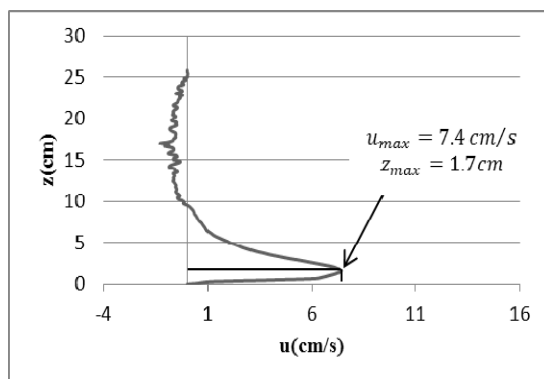
$$U^2 h = \int_0^{\infty} u^2 dz = \int_0^{h_t} u^2 dz \quad (4)$$

که در این معادله‌ها  $U$ : سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ،  $h$ : ارتفاع بدنه جریان غلیظ،  $u(z)$ : سرعت بدنه در هر فاصله از کف و  $h_t$ : فاصله ای از کف می باشد که در آن سرعت جریان غلیظ برابر صفر است.

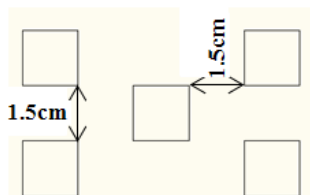
هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر مشترک شیب کف و ارتفاع زبری در ناحیه دیواره بر روی تغییرات سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ رسوبی و همچنین ارائه معادله‌های تجربی با استفاده از داده های آزمایشگاهی به منظور پیش بینی این دو پارامتر می باشد.

### مواد و روش ها

فلوم و تجهیزات مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است. جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا جریان غلیظ با مخلوط کردن آب و پودر سنگ به غلظت دلخواه درون مخزن تهیه و توسط پمپ به مخزن بالا به منظور رسیدن به ارتفاع ثابت منتقل شده، سپس با استفاده از یک شیر و دبی سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی به درون فلوم کنترل می شد. در کلیه آزمایش‌ها دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر از جریان غلیظ رسوبی مورد استفاده قرار گرفت. فلوم مورد استفاده با



شکل ۵- پروفیل سرعت جریان غلیظ با شیب طولی ۳/۵ درصد و غلظت ۲۰ گرم در لیتر



شکل ۶- نحوه آرایش زبری‌ها

در این معادله،  $V_s$ : لزوجت سینماتیکی جریان کدر می باشد. واسپ و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۷۷) معادله زیر را به منظور تعیین لزوجت سینماتیکی جریان ارائه نمودند:

$$V_s = (v_w)(1 + 2.5C_v + 10C_v^2 + 0.00273EXP(16.6C_v)) \quad (7)$$

که در این معادله،  $C_v$ : غلظت حجمی جریان کدر و  $v_w$ : لزوجت سینماتیکی آب می باشد. سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ از روش فیلمبرداری توسط دوربین دیجیتال در طول آزمایش‌ها تعیین گردیدند.

سرعت و ارتفاع بدنه جریان غلیظ از معادله‌های (۳) و (۴) و با توجه به پروفیل‌های سرعت برداشت شده از جریان غلیظ استخراج گردیدند. نحوه آرایش زبری‌ها به صورت زیگزاک با فاصله طولی و عرضی ۱/۵ سانتی‌متر مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شد.

به منظور ارائه معادله‌هایی جهت پیش بینی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ با در نظر گرفتن تأثیر همزمان زبری و شیب تحلیل ابعادی صورت پذیرفت. متغیرهای موجود در تحلیل ابعادی برای سرعت پیشانی جریان مطابق معادله (۸) و برای سرعت بدنه جریان مطابق معادله (۹) می باشد.

مشاهده می گردد  $Z_{max}$  برای شرایط این آزمایش معادل ۱/۷ سانتی‌متر می باشد. در نتیجه برای اینکه کلیه زبری‌ها در ناحیه دیواره قرار بگیرند حداکثر ارتفاع زبری برابر ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و سایر ارتفاعات زبری (۰، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر) بر مبنای آن انتخاب گردید. همچنین طول و عرض زبری‌ها برابر ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

شیب‌های مورد نظر در این تحقیق به صورتی انتخاب شدند که جریان غلیظ در تمام آزمایش‌ها بر اساس عدد فرود دنسیمتریک (معادله ۵) در حالت زیر بحرانی قرار داشته باشد ( $Fr_d < 1$ ):

$$Fr_d = \frac{u}{\sqrt{g' h \cos \theta}} \quad (5)$$

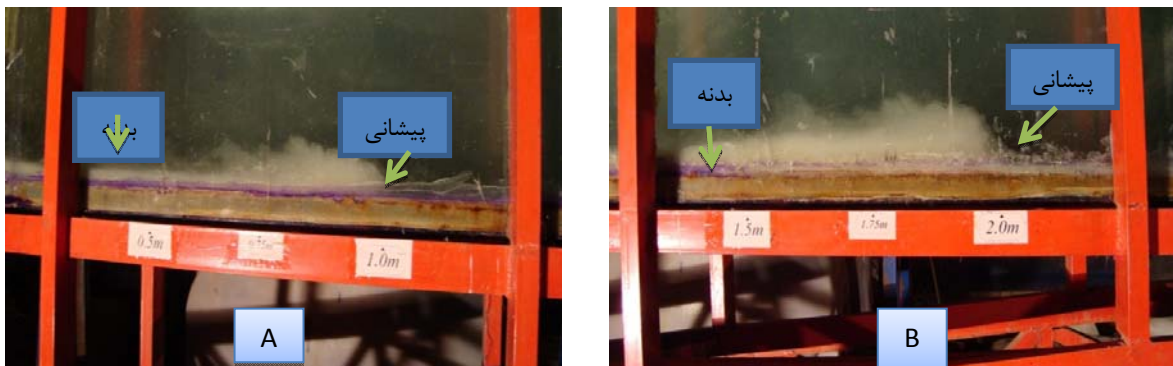
در این معادله  $\theta$ : شیب کف بستر می باشد.

به منظور تعیین عدد رینولدز جریان از معادله (۶) استفاده گردید:

$$Re = \frac{uh}{V_s} \quad (6)$$

## جدول ۱- محدوده اعداد فرود دنسیتیک و رینولدز پیشانی و بدنه جریان غلیظ در آزمایشات

Re		$Fr_d$		
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	
۴۹۰۸	۲۲۷۰	۰/۸۵	۰/۳۶	پیشانی جریان
۳۶۰۰	۲۱۰۰	۰/۷۳	۰/۲۵	بدنه جریان



شکل ۷- پیشانی و بدنه جریان غلیظ قبل از رسیدن به زبری (A)، پیشانی و بدنه جریان غلیظ بعد از رسیدن به زبری (B)

در شکل (۷) پیشانی و بدنه جریان غلیظ قبل و بعد از برخورد با زبری ارائه شده است. با توجه به این شکل آشفتگی در بدنه و پیشانی جریان کدر با عبور از روی زبری کاملاً مشهود می باشد. به منظور بررسی تاثیر زبری و شیب بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ روند تغییرات این پارامتر برای دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ارائه شده است.

با توجه به این شکل‌ها مشاهده می شود که با افزایش زبری از سرعت پیشانی و بدنه جریان کاسته می شود. نتایج حاصل از درصد کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. به عنوان مثال در جریان غلیظ با غلظت ۱۰ گرم در لیتر در شیب ۰ درصد، افزایش ارتفاع زبری از ۰ تا ۱/۵ سانتی‌متر باعث کاهش سرعت پیشانی به میزان ۳۱ درصد و کاهش سرعت بدنه به میزان ۲۸ درصد می باشد. در صورتی که این افزایش ارتفاع زبری در شیب ۳/۵ درصد منجر به کاهش سرعت پیشانی به میزان ۲۴ درصد و کاهش سرعت بدنه به میزان ۱۹ درصد می باشد. همچنین در جریان غلیظ با غلظت ۲۰ گرم در لیتر در شیب ۰ درصد، افزایش ارتفاع زبری از ۰ تا ۱/۵ سانتی‌متر باعث کاهش سرعت پیشانی به میزان ۲۲ درصد و کاهش سرعت بدنه به میزان ۲۵ درصد می باشد. در صورتی که این افزایش ارتفاع زبری در شیب ۳/۵ درصد منجر به کاهش سرعت پیشانی به میزان ۱۷ درصد و کاهش سرعت بدنه به میزان ۱۲ درصد می باشد. دلیل این پدیده را می توان این گونه عنوان کرد که وجود زبری علاوه بر ماهیت مقاومتی خود در مقابل جریان، منجر به تشکیل یک سری جریان‌های برگشتی در اثر برخورد

لازم به ذکر است نظر به اینکه دبی جریان در کلیه آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است لذا به عنوان یک متغیر در نظر گرفته نشده است.

$$f(U_f, k_s, H_f, \rho_a, \rho_s, g, S, v_s) = 0 \quad (۸)$$

$$f(U, k_s, h, \rho_a, \rho_s, g, S, v_s) = 0 \quad (۹)$$

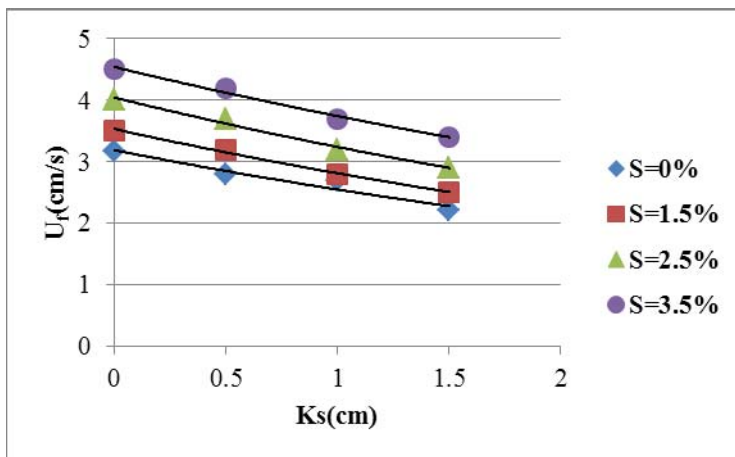
که در این معادله‌ها،  $k_s$ : ارتفاع زبری و  $S$ : شیب بستر می‌باشد. سایر پارامترهای فوق در قسمت‌های قبل معرفی شده اند. پس از در نظر گرفتن متغیرهای تکراری و انجام تحلیل ابعادی با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام معادله‌های (۱۰) و (۱۱) به شرح زیر حاصل شد:

$$U_f = f_1\left(\frac{k_s}{H_f}\right)\sqrt{g'H_f} \quad (۱۰)$$

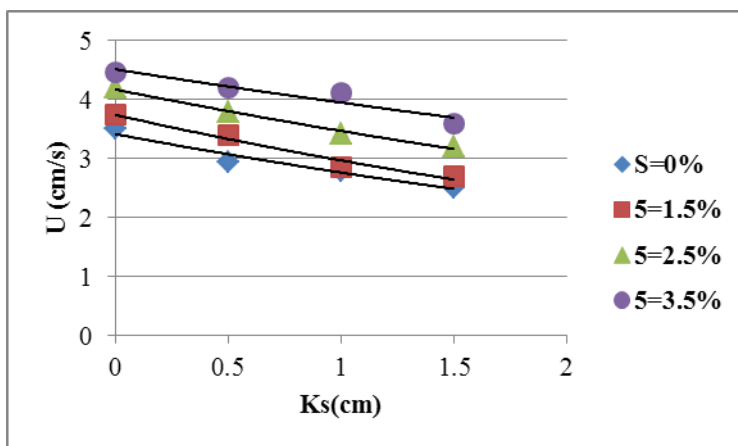
$$U_f = f_1\left(\frac{k_s}{h}\right)\sqrt{g'h} \quad (۱۱)$$

## نتایج و بحث

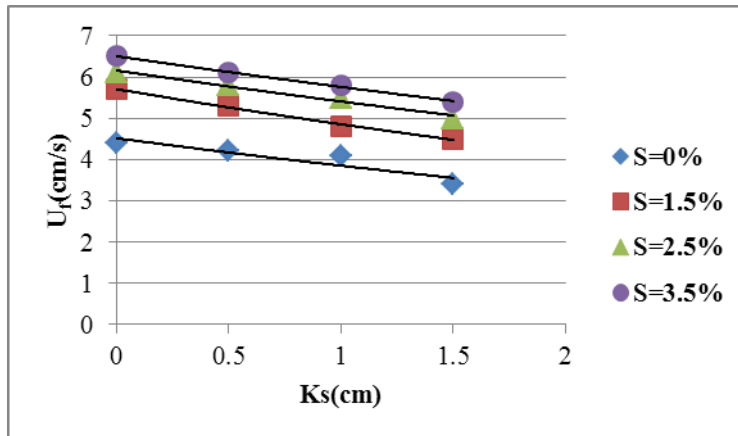
در جدول (۱) محدوده اعداد رینولدز و فرود برای پیشانی و بدنه جریان غلیظ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود در تحقیق حاضر تمامی آزمایشات در حالت زیر بحرانی و آشفتگی قرار دارند.



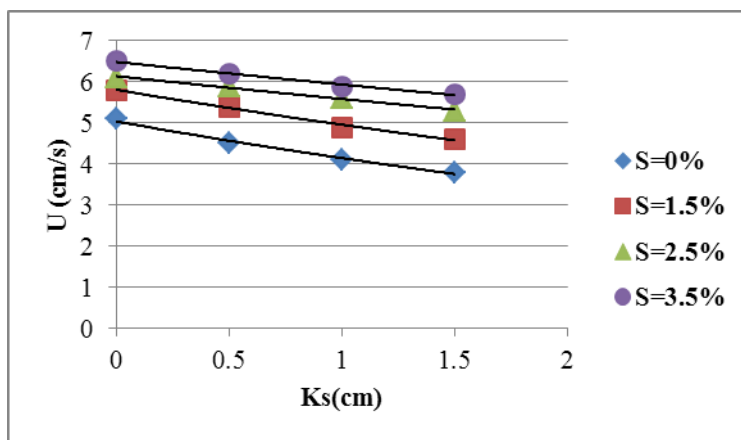
شکل ۸- تغییرات سرعت پیشانی جریان در مقابل افزایش ارتفاع زبری (غلظت ۱۰ گرم در لیتر)



شکل ۹- تغییرات سرعت بدنه جریان در مقابل افزایش ارتفاع زبری (غلظت ۱۰ گرم در لیتر)



شکل ۱۰- تغییرات سرعت پیشانی جریان در مقابل افزایش ارتفاع زبری (غلظت ۲۰ گرم در لیتر)



شکل ۱۱- تغییرات سرعت بدنه جریان در مقابل افزایش ارتفاع زبری (غلظت ۲۰ گرم در لیتر)

جدول ۲- درصد کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ ناشی از تغییر شیب و زبری نسبت به کف بدون زبری (غلظت ۱۰ گرم در لیتر)

شیب (درصد)	زبری (سانتیمتر)				بدنه جریان			
	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۰	۰/۵	۱	۱/۵
۰	-	-	-	-	۲۸	۲۰	۱۵	-
۱/۵	-	-	-	-	۲۷	۱۹	۹	-
۲/۵	-	-	-	-	۲۳	۱۸	۷	-
۳/۵	-	-	-	-	۱۹	۷	۵	-

جدول ۳- درصد کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ ناشی از تغییر شیب و زبری نسبت به کف بدون زبری (غلظت ۲۰ گرم در لیتر)

شیب (درصد)	زبری (سانتیمتر)				بدنه جریان			
	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۰	۰/۵	۱	۱/۵
۰	-	-	-	-	۲۵	۱۹	۱۱	-
۱/۵	-	-	-	-	۲۰	۱۵	۶	-
۲/۵	-	-	-	-	۱۳	۸	۳	-
۳/۵	-	-	-	-	۲۵	۱۹	۱۱	-

می یابد که امری بدیهی می باشد. حال آنکه نکته قابل توجه در این خصوص این است که تأثیر افزایش زبری در کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ، با افزایش شیب کاهش می یابد. دلیل این پدیده را می توان این گونه بیان کرد که با افزایش شیب سرعت جریان افزایش یافته که منجر به افزایش مومنتم جریان می شود. این افزایش مومنتم باعث ضعیف شدن جریان های برگشتی شده، در نتیجه از مقاومت این جریان های برگشتی در مقابل پیشروی جریان غلیظ کاسته می شود.

جریان با خود می شود که ممکن است این جریان های برگشتی مشهود یا غیر مشهود باشند. از طرف دیگر وجود زبری در مسیر جریان منجر به ته نشینی رسوبات شده و همین موضوع باعث می شود که از غلظت جریان غلیظ در مسیر حرکت کاسته شود، در نتیجه اختلاف غلظت جریان غلیظ با سیال پیرامون که عامل اصلی حرکت جریان غلیظ می باشد کاهش یافته که این موضوع نیز منجر به کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ می شود. با توجه به شکل های (۸) تا (۱۱) مشاهده می شود که با افزایش شیب، سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ افزایش



۱-  $R^2$  و  $\alpha$  که به ترتیب عبارتند از مجذور ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون ( $\alpha = \frac{U_m}{U_p}$ ). دقت پیش‌بینی هر معادله به پارامترهای فوق بستگی دارد. بدین صورت که هرچه  $R^2$  و  $\alpha$  به یک نزدیک‌تر باشند آن معادله بهتر می‌تواند مقادیر سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ را تخمین بزند.

۲- درصد خطا ( $\% E$ ) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\% E = \frac{\sum_{i=1}^N |U_{mi} - U_{pi}|}{\sum_{i=1}^N U_{mi}} \times 100 \quad (14)$$

۳- متوسط مجذور مربعات خطا (RMSE) که به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{mi} - U_{pi})^2}{N}} \quad (15)$$

### معادله‌های توسعه یافته برای سرعت جریان غلیظ

همان‌طور که مشاهده می‌شود معادله‌های (۱۰) و (۱۱) شبیه معادله (۲) می‌باشد. با استفاده از نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها ضریب کولگان برای تحقیق حاضر به طور متوسط معادل ۰/۴ برآورد می‌شود که کاهش مقدار این ضریب نسبت به نتیجه سایر محققین به دلیل به کار بردن زبری در انجام آزمایش‌ها می‌باشد. در این معادلات ضریب بخش‌های  $\sqrt{g'H_f}$  و  $\sqrt{g'h}$  تابعی از  $(\frac{k_s}{h}, S)$  برای سرعت پیشانی و  $(\frac{k_s}{h}, S)$  برای سرعت بدنه می‌باشند. به منظور تعیین این ضرایب از نرم افزار Datafit استفاده گردید. از ۳۳ سری داده موجود در حدود ۷۵ درصد (۲۵ سری) به منظور ساخت مدل‌ها و ۲۵ درصد (۷ سری) به منظور آزمایش مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. معادله‌های حاصل به صورت زیر می‌باشد:

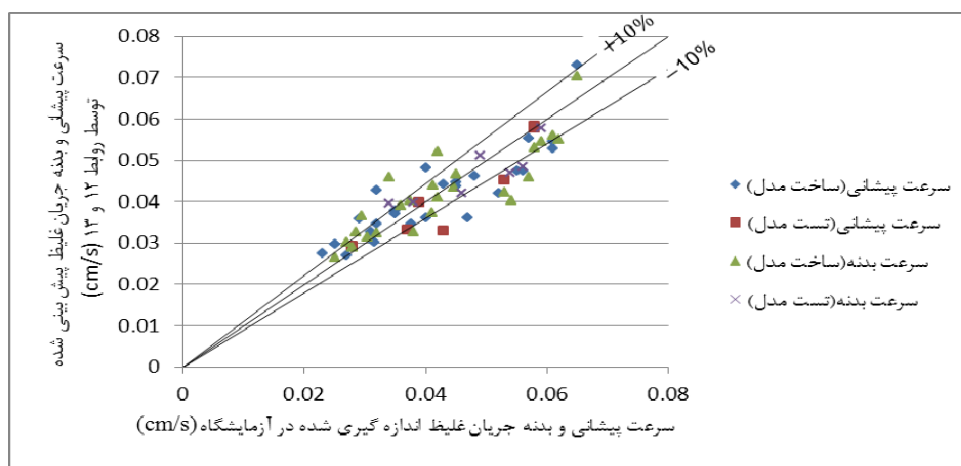
$$U_f = \left[ 0.43 + 1.74(S) - 1.47\left(\frac{k_s}{H_f}\right) \right] \sqrt{g'H_f} \quad (12)$$

$$U = \left[ 0.63 + 4.20(S) - 2.52\left(\frac{k_s}{h}\right) \right] \sqrt{g'h} \quad (13)$$

به منظور بررسی دقت معادله‌های (۱۲) و (۱۳) از روش‌های آماری که در زیر ارائه شده‌اند استفاده گردید:

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل آماری در روال آزمایش معادله‌های (۱۲) و (۱۳)

$RMSE (cm/s)$	$\% E$	$\alpha$	$R^2$	
۰/۰۰۵	۷/۵	۰/۹۳	۰/۸۵	فرمول (۱۲)
۰/۰۰۴	۸/۷	۰/۹۵	۰/۷۳	فرمول (۱۳)



شکل ۱۲- بررسی دقت معادله‌های (۱۲) و (۱۳) در بازه  $\pm 10$  درصد

آزمایش‌ها با در نظر گرفتن چهار ارتفاع زبری، چهار شیب طولی و دو غلظت صورت پذیرفت. از مهمترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- افزایش ارتفاع زبری در مسیر جریان غلیظ باعث کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ می‌شود که دلیل آن ایجاد یک سری جریان برگشتی می‌باشد. علاوه بر آن کاهش غلظت جریان غلیظ در اثر دخول سیال پیرامون به آن در طول مسیر باعث کاهش اختلاف بین چگالی سیال غلیظ و سیال پیرامون شده که این نیز کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ را به دنبال دارد.

- با افزایش شیب تأثیر زبری در کاهش سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش مومنتم به دلیل افزایش سرعت جریان و از بین رفتن جریان‌های برگشتی می‌باشد.

- ضریب کولگان با در نظر گرفتن زبری برای تحقیق حاضر در حدود  $0/4$  برآورد گردید که در حدود  $40\%$  درصد نسبت به شرایط کف بدون زبری کاهش یافته است.

- با استفاده از نرم افزار Datafit ضریب کولگان به صورت تابعی از

$$S \text{ و } \frac{k_s}{H_f} \text{ برای سرعت پیشانی و به صورت تابعی از } S \text{ و } \frac{k_s}{h}$$

برای سرعت بدنه ارائه شد. بررسی دقت معادله‌های حاصله نشان داد که این معادله‌ها قادر به پیش بینی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ با دقت نسبتاً قابل قبولی می‌باشند.

در این معادله‌ها،  $N$ : تعداد داده‌ها،  $U_{\text{م}}$ : سرعت پیشانی یا بدنه جریان غلیظ اندازه گیری شده در آزمایشگاه و  $U_p$ : سرعت پیشانی یا بدنه جریان غلیظ پیش بینی شده توسط فرمول می‌باشد. در هر فرمول که مقادیر محاسبه شده برای درصد خطا و متوسط مجذور مربعات خطا به صفر نزدیکتر باشد، دقت آن بالاتر است. خلاصه نتایج تحلیل آماری در جدول (۴) ارائه شده است.

با توجه به جدول فوق به نظر می‌رسد معادله‌های (۱۲) و (۱۳) با دقت نسبتاً قابل قبولی قادر به پیش بینی میزان سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ می‌باشند. لازم به ذکر است معادله‌های فوق در مورد جریان‌های غلیظ در حالت زیر بحرانی و متلاطم صادق می‌باشند. در شکل (۱۲) مقایسه دیگری بین مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه و پیش بینی شده توسط معادله‌های (۱۲) و (۱۳) در محدوده  $\pm 10\%$  درصد صورت پذیرفته است با توجه به شکل (۱۲) نیز مشاهده می‌شود محدوده نسبتاً قابل قبولی از نتایج در بازه مورد بررسی قرار گرفته است. به نحوی که برای سرعت پیشانی در حدود  $60\%$  درصد و برای سرعت بدنه در حدود  $70\%$  درصد از داده‌ها در مرحله تست در بازه  $\pm 10\%$  درصد واقع شده‌اند.

### نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر همزمان زبری و شیب طولی بر روی سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور

### منابع

- 1- Altinakar, M. S., Graf, W. H., and E. J. Hopfinger. 1996, Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 34(5): 713-718.
- 2- Barbosa, A.A., Mauad, F.F., Sato, C.E. and A.P.M. Silva. 2010 Density Currents at Steady Regime, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 32(3):259-266.
- 3- Buckee, C., Kneller, B. and J. Peakall. 2001. Turbulence structure in steady, solute-driven gravity currents. Particulate gravity currents, Special Publication of the International Association of Sedimentologists 31, Blackwell Science, Oxford, U.K., NO.31.
- 4- Ellison, T. H. and J.S. Turner. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 6:423-448.
- 5- Gladstone, C. and D. Pritchard. 2010. Patterns of deposition from experimental turbidity currents with reversing buoyancy, *Sedimentology*, 57:53-84.
- 6- Islam, M.A. and J. Imran. 2010. Vertical structure of continuous release saline and turbidity currents, *Journal of Geophysical Research*, 115: C08025, PP.14.
- 7- Keulegan, G.H. 1958. The motion of saline fronts in still water. 12<sup>th</sup> Progress Report on Model Laws for Density Currents, U.S. Nat. Bur. Standards, No.5831.

- 8- Kneller, B.C., Bennett, S.J. and W.D. McCaffrey. 1999. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *Journal Of Geophysical Research*, 104(C3):5381–5391.
- 9- Lofquist, K. 1960. Flow and stress near an interface between stratified liquids. *Physical Fluids*, 3(2):158–175.
- 10- Meiburg, E. and B. Kneller. 2010. Turbidity Currents and Their Deposits. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42:135-156.
- 11- Middleton, G.V. 1966, Experiments on density and turbidity currents: motion of the head, *Canadian of Earth Sciences* 3:523-546.
- 12- Morris, S.A. and J. Alexander. 2003. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current, *Journal of Sedimentary Research*, 73:621-629.
- 13- Piper, D.J.W. and W.R. Normark. 2009. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: A marine geology perspective: *Journal of Sedimentary Research*, 79(6):347-362.
- 14- Sequeiros, O.E., Naruse, H., Endo, N., Garcia, M.H. and G. Parker, 2009. Experimental study on self-accelerating turbidity currents, *Journal Of Geophysical Research*, 114:C05025.
- 15- Sequeiros, O.E., Spinewine, B., Beaubouef, R.T., Sun, T., García, M.H. and G. Parker, 2010a. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed, *Journal Of Hydraulic Engineering, ASCE*, 136(7):412-433.
- 16- Sequeiros, O.E., Spinewine, B., Beaubouef, R.T., Sun, T., García, M.H. and G. Parker, 2010b. Bedload transport and bed resistance associated with density and turbidity currents, 57(6):1463–1490.
- 17- Wells, M., Cenedese, C., and C.P. Caulfield, 2010. The relationship between flux coefficient and entrainment ratio in density currents, *Journal of Physical Oceanography*, 40(12): 2713-2727.
- 18- Wasp, E.J., Kenny, J.P., and R.L. Gandhi, 1977. Solid-liquid flow slurry pipeline transportation, *Trans. Tech. Publications, Clausthal, Germany*, 224 P.