

مطالعه و ارزیابی آزمایشگاهی دینامیک پیشانی جریان غلیظ روی بستر متحرک

اعظم شریف نژاد^{۱*}، سید محمود کاشفی پور^۲، مهدی قمشی^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۰

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.sharifnezhad@yahoo.com

چکیده

از عوامل بسیار مهم در رسوب‌گذاری مخازن سدها و نحوه توزیع رسوبات، پدیده جریان غلیظ است که سبب کاهش عمر مفید سدها و مشکلات مدیریت و بهره‌برداری خواهد شد. از بخش‌های بسیار مهم و قابل بررسی در دینامیک جریان غلیظ، بخش پیش‌رونده جریان غلیظ (پیشانی جریان) است که مطالعه و بررسی آن در بخش مدیریت پایدار مخازن سدها امری ضروری است. تاکنون بیشتر تحقیقات صورت گرفته در شرایط آزمایشگاهی و فلوم‌های با بستر صلب بوده است. اما، در این تحقیق برای نزدیک کردن نتایج به شرایط طبیعی در رودخانه‌ها و مخازن سدها، آزمایش‌ها بر روی بستر متحرک و فرسایش‌پذیر انجام شده است. از این‌رو، با تغییر شرایط هیدرولیکی مؤثر به تحلیل دینامیک پیشانی جریان غلیظ در دو شرایط بستر صلب و متحرک پرداخته شد. بدین ترتیب، نشان داده شد که بستر متحرک، با ورود رسوبات باعث افزایش سرعت پیشانی جریان غلیظ و ضریب کئولگان تا حدود ۲۰ درصد شده است و همچنین، باعث افزایش ارتفاع نسبی پیشانی تا حدود ۴۰ درصد به‌ازای افزایش شیب فلوم شده است. همچنین، با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره و اعداد بی‌بعد موثر، رابطه‌ای برای تخمین سرعت متوسط پیشانی با ضریب همبستگی ۰/۸۶ ارائه شد که با تحلیل حساسیت مشخص شد بیشترین ارتباط سرعت پیشانی با پارامتر عدد ریچاردسون بوده است.

واژه‌های کلیدی: بستر صلب، بستر متحرک، جریان غلیظ، سرعت پیشانی، فرم بستر

Experimental Investigation and Assessment of Turbidity Current Head Dynamic Over a Mobile Bed

A. Sharifnezhad^{1*}, S.M. Kashefipour², M. Ghomshi³

Accepted: 2018-10-02

Received: 2017-12-13

¹ Ph.D. student, Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

² Prof., Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

³ Prof., Dept. of Water Struc., Faculty of Water Sciences Engin., Univ. of Shahid Chamran of Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: a.sharifnezhad@yahoo.com

Abstract

Turbidity current phenomenon is one of the most important factors in reservoir sedimentation and sediment distribution, which causes management and operational problems and decreases dam's useful life. Study and investigation of progressive section (head of turbidity current), as the most significant and considerable section is essential for sustainable management of dam reservoirs. So far, most of the studies have been conducted under experimental conditions on rigid beds. But in this study, in order to achieve more realistic results regarding natural conditions in rivers and reservoirs, the experiments were carried out on an erodible and mobile bed. So dynamic of turbidity current head was analyzed on rigid and erodible beds for different effective hydraulic conditions. It was shown that erodible bed increased the head velocity of turbidity current and Keulegan coefficient up to about 20% and also, increased the relative forehead height up to about 40% with increasing flume bed slope. In addition, in order to estimate the averaged head velocity, an equation with correlation coefficient of 0.86, was developed using multivariate linear regression and effective dimensionless parameters. Finally, sensitivity analysis of the equation's dimensionless parameters showed that the most effective parameter in estimation of the head velocity average is Richardson number.

Keywords: Bed form, Head velocity, Mobile bed, Rigid bed, Turbidity current

مقدمه

احداث سد در مسیر رودخانه بطور قابل توجهی شرایط طبیعی رودخانه در بالادست و پایین دست را تغییر می دهد، به طوری که بار معلق در کف مخزن سد خسارات زیادی را به پروژه های اجرا شده و یا در حال اجرا وارد می کند (بهرامی ۱۳۸۸). از این رو شناخت دینامیک جریان غلیظ به عنوان کنترل و مدیریت بهره برداری پایدار از منابع آب امری حیاتی و ضروری به شمار می رود.

جریان های غلیظ در بسیاری از محیط های طبیعی و کاربردهای مهندسی هنگامی رخ می دهند که یک سیال با دانسیته بالاتر در سیال با دانسیته کمتر، جریان یابد (گراف ۱۹۷۱). جریان غلیظ به واسطه سرعت پیشانی خود وارد سیال پیرامون (آب زلال) می شود. برخلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دائمی بدنه،

امروزه سدها نقش ارزنده ای در تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر و کاستن اثرهای فاجعه آمیز طغیان ها و سیلاب ها دارند. از طرفی در مخازن سدها با عمق زیاد، جریان غلیظ معمولاً عامل انتقال و ته نشینی رسوبات است که با رسوب گذاری در پای دیواره سد باعث اختلال در عملکرد آن خواهد شد (شیخی نژاد و قمشی ۱۳۹۴). جریان غلیظ، ضمن حرکت باعث ایجاد فرسایش در بستر می شود و با کاهش سرعت منجر به رسوب گذاری در این ناحیه می شود که علاوه بر از بین بردن عمر مفید سدها، خسارات جبران ناپذیری به سازه های جانبی نیز وارد می کند (دریایی و همکاران ۱۳۹۳).

پیشانی جریان غیردائمی است و عامل حرکت آن در توده سیال گرادیان فشار ناشی از اختلاف جرم مخصوص است (آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۰). تحقیقات زیادی بر روی سرعت پیشانی در شرایط بستر صلب و ثابت انجام شده است، اما این مطالعات در شرایط بستر متحرک و فرسایش‌پذیر بسیار کم انجام شده است و تأثیر آن به‌طور مشخص بر پیشانی جریان غلیظ دیده نشده است. طبق تحقیق نلر و همکاران (۱۹۹۹)، در صورت حرکت جریان غلیظ روی بستر رسوبی، ممکن است رسوبات بستر از ناحیه‌ی زیر دماغه وارد پیشانی جریان غلیظ شوند و منجر به فرسایش بستر گردند. پارکر و همکاران (۱۹۸۷) و گارسیا و پارکر (۱۹۹۳)، فرم‌های بستر شکل گرفته با جریان غلیظ نمکی را روی بستر رسوبی مشاهده کردند. اما در این مطالعه، توجه خاصی به تأثیر آن‌ها بر مشخصات پیشانی جریان تشکیل دهنده نشده است. راستلو و همکاران (۲۰۰۲)، در نتایج آزمایشگاهی خود بر روی بستر متحرک افزایش قابل توجهی در سرعت پیشانی به دلیل ورود رسوبات به درون جریان مشاهده کردند. سکویروس و همکاران (۲۰۰۹) نیز به مطالعه آزمایشگاهی امکان تشکیل جریان رسوبی تشدیدشونده با بستر رسوبی پرداختند و افزایش سرعت و غلظت پیشانی جریان بر بستر متحرک را مشاهده کردند و به این نتیجه دست یافتند که مشخصات ذرات بستر، سرعت جریان، سرعت سقوط ذره و شیب بستر در تشکیل این نوع جریان نقش کلیدی دارند. سکویروس و همکاران (۲۰۱۰a)، به مطالعه جریان غلیظ رسوبی و نمکی در هر دو رژیم زیر بحرانی و فوق بحرانی پرداختند و اثر زبری بستر و فرم‌های بستر بر پروفیل قائم سرعت و همچنین تغییرات چگالی جریان در بستر رسوبی را مورد بررسی دادند. طبق نتایج، الگوی تغییرات پروفیل‌های سرعت و چگالی بدنه جریان، به پارامترهای عدد فرود جریان، اندازه ذرات بستر و تشکیل یا عدم تشکیل فرم بستر وابسته است. سکویروس و همکاران (۲۰۱۰b)، در مطالعه‌ای دیگر نیز در چهار شرایط فرم بستر تشکیل‌شده روابطی را برای انتقال بار بستر و مقاومت بستر جریان ارائه دادند که تطابق خوبی با روابط

جریان در کانال باز نشان داده است. همچنین در تحقیقات هانگ و همکاران (۲۰۱۲) و لو و همکاران (۲۰۱۳)، در فلوم‌های قوسی شکل در بستر متحرک نشان داده شد که با حرکت جریان غلیظ روی بستر متحرک، الگوی جریان در قوس تغییر کرده و جهت جریان‌های ثانویه از ساحل داخلی به سمت ساحل خارجی کشیده می‌شود که ممکن است سبب تغییر جریان اصلی و تنش برشی کل و الگوی فرسایش و رسوبگذاری جریان شود. ژو و همکاران (۲۰۱۴)، به بررسی و اندازه‌گیری شرایط هیدرولیکی و رسوب‌گذاری بدنه جریان غلیظ رسوبی در شرایط طبیعی در پایین‌دست دو جریان غلیظ رسوبی در آمریکا پرداختند. تاکنون، اندازه‌گیری صحرایی کمی در بدنه و پیشانی جریان غلیظ اقیانوسی انجام شده است. بنابراین با توجه به تحقیقات انجام شده، تعامل رسوبات بستر با جریان غلیظ بر دینامیک جریان ورودی آن تأثیر بسزایی دارد. ورود رسوبات به درون پیشانی جریان غلیظ و فرسایش بستر، تأثیر مستقیم بر مشخصات پیشانی جریان خواهد گذاشت. از طرف دیگر، تحت شرایط هیدرولیکی خاصی در بستر رودخانه فرم بستر تشکیل می‌شود و از آنجا که فرم بستر نیز تأثیر مستقیم بر زبری و حمل مواد رسوبی دارد (شفاعی بجستان ۱۳۷۸)، این مسئله در الگوی فرسایش و رسوبگذاری اهمیت ویژه‌ای می‌یابد و تشکیل یا عدم تشکیل آن نیز با تغییر شرایط هیدرولیکی جریان می‌تواند بر دینامیک پیشانی جریان غلیظ مؤثر باشد. بدین ترتیب، نادیده گرفتن حرکت رسوبات و تشکیل فرم بستر، نتایج آزمایشگاهی را از شرایط طبیعی دور خواهد کرد و بررسی الگوی جریان غلیظ در طبیعت را با خطا همراه خواهد کرد. از طرف دیگر، آزمایش‌های جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک و فعال می‌تواند مسیر جدیدی در مطالعات و بررسی الگوی جریان در شرایط مختلف هیدرولیکی باشد. بنابراین، در این تحقیق به دلیل اهمیت موضوع و کاربرد آن در طبیعت و خصوصاً انتقال بار بستر و شکل‌گیری فرم‌های بستر،

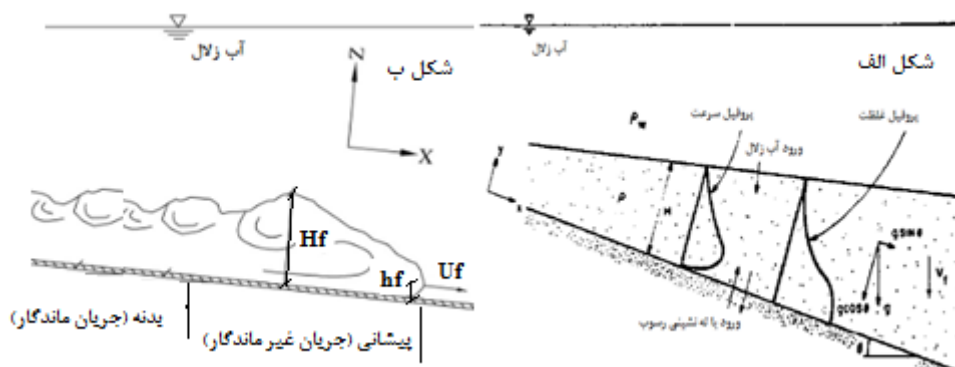
در این تحقیق، برای بررسی مشخصات پیشانی جریان در شرایط بستر متحرک، جریان غلیظ نمکی بر روی بستر پوشیده از ذرات با دانه بندی و چگالی مشخص در نظر گرفته شده است.

دینامیک پیشانی جریان غلیظ از اهمیت خاصی برخوردار است و می‌تواند به عنوان یک شرط مرزی کامل برای جریان در نظر گرفته شود. مطالعات میدلتون (۱۹۶۶) و آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) نشان می‌دهد پیشانی جریان غلیظ با وجود دارا بودن شکل ساده، ساختار پیچیده دارد و دارای ارتفاع H_f از کف تا بلندترین نقطه و دماغه، با ارتفاع h_f است که در فاصله کمی از کف و در جلوی جریان قرار دارد (شکل ۱-ب).

به تحلیل مشخصه‌های پیشانی جریان غلیظ در شرایط بستر رسوبی و فرسایش‌پذیر پرداخته خواهد شد.

الگوی حرکت جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک

جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک از سه بخش تشکیل شده است: آب زلال پیرامون، آب کدر و رسوبات (ذرات بستر). تعامل پیچیده‌ی جریان کدر با دو ناحیه دیگر، بررسی و تحلیل این جریان‌ها را مشکل کرده است. از دلایل آن می‌توان به وجود مواردی مانند اثر نیروی شناوری، اندرکنش ذرات با جریان و آشفته‌گی‌های موجود در سطح مشترک سیال محیطی با جریان کدر اشاره کرد (آکیاما و استنفان ۱۹۸۵). این نوع جریان بر روی یک بستر رسوبی می‌تواند عامل فرسایش یا رسوبگذاری باشد (شکل ۱-الف). از این‌رو



شکل ۱-الف- ساختار جریان غلیظ روی بستر متحرک (آکیاما و استنفان ۱۹۸۵) و شکل ۱-ب- شماتیکی از مشخصات سرعت پیشانی جریان غلیظ (حسینی و همکاران ۲۰۰۶).

جریان‌های غلیظ سیال پیرامون، تأثیر کاهنده‌ای روی نیروی ثقل داشته و ضریب کاهش به صورت $(\Delta\rho/\rho_a)$ است. بنابراین، شتاب ثقل مؤثر بر جریان (g') شتاب کاهش یافته، به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ به صورت زیر بیان می‌شود (کولنبرگ ۱۹۷۷):

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

C_S : غلظت حجمی متوسط رسوبات غیر چسبیده، ρ_a : دانسیته سیال پیرامون، ρ_t : دانسیته سیال غلیظ، ρ_w : دانسیته آب و ρ_s : دانسیته ذرات رسوب.

پیشانی جریان غلیظ دارای ضخامت بیشتری نسبت به جریان مستغرق پشت سر دارد و طول آن نسبتاً کوتاه بوده و تبدیل به بدنه جریان غلیظی که پس از آن قرار دارد به سرعت اتفاق می‌افتد و در هنگام پیشروی شکل و سرعت دماغه ذاتاً ثابت باقی خواهد ماند (خواصی ۱۳۸۸).

جریان غلیظ و یا جریان چگال^۱ جریانی با چگالی ρ_t است که در اثر اختلاف چگالی دو سیال به حرکت در می‌آید و نیروی ثقل را به نسبت $(\Delta\rho/\rho_a)$ کاهش می‌دهد. جریان غلیظ شباهت‌های بسیاری با جریان در مجاری روباز دارد، با این تفاوت که در

¹Gravity Current

با مطالعات صورت گرفته، برای تعیین اندازه رسوبات مناسب بستر متحرک و فرسایشی نکات زیر مورد توجه بوده است:

الف- ذرات کف باید به گونه‌ای انتخاب شوند که جریان در کل آزمایش‌ها توربولنت و زبر باشد (گارسیا ۲۰۰۸).

$$Re = \frac{Uh}{\nu} > 4000, Re_* = \frac{u_* d_{50}}{\nu} > 200 \quad [۴]$$

در این رابطه، Re عدد بدون بعد رینولدز، Re^* عدد رینولدز برشی، u_* سرعت برشی و ν لزوجت سینماتیکی جریان است.

ب- با مشخص کردن دانه‌بندی رسوبات، باید محدوده‌ی

انحراف استاندارد هندسی σ_g (به گونه‌ای باشد $\sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$)

که دانه‌بندی تقریباً یکنواخت باشد. بنابراین، بهتر است مقدار σ_g کمتر از ۱/۳۵ انتخاب گردد (لیتل و مییر ۱۹۷۶، پارکر و سوترلند ۱۹۹۰). در این رابطه d_{84} و d_{16} مربوط به اندازه‌ی رسوباتی هستند که به ترتیب، ۸۴ درصد و ۱۶ درصد نمونه از آن ریزتر هستند. بنابراین، با توجه به سرعت‌های بسیار پایین در آزمایش‌های جریان غلیظ و اهمیت تشکیل فرم‌های بستر و بررسی جریان غلیظ در این شرایط از ماده‌ای از چنس پلیمر با قطر میانگین (d_{50}) برابر ۴۵۰ میکرومتر، چگالی مخصوص (ρ_s) برابر ۱۰۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و انحراف استاندارد (σ_g) برابر ۱/۳ استفاده گردید.

۲- مراحل انجام آزمایش: برای شبیه‌سازی جریان غلیظ از یک مدل آزمایشگاهی شامل یک فلوم با بستر شیب‌دار به طول ۷۸۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و عرض ۳۵ سانتی‌متر استفاده شده است. تمامی تجهیزات آزمایشگاهی متعلق به آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز است. شیب فلوم مورد استفاده در محدوده‌ی ۱- تا ۳/۸۶ درصد قابل تنظیم بود. در شکل ۲ فلوم و قسمت‌های مختلف آن ارائه شده است.

برای ایجاد بستر متحرک، فضای مناسب به طول ۴/۵ متر از فاصله یک متری دریچه تا ۵/۵ متری آن، به

با صرف نظر کردن از نیروهای لزوجتی، سرعت پیشانی در هر لحظه را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$U_f = C_c \sqrt{g'H_f} \quad [۲]$$

در این معادله، C_c ضریب ثابت کئولگان می‌باشد (کئولگان ۱۹۵۷). همچنین، پارامتر کاربردی فرود دنسیمتریک برای جریان غلیظ به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$Fr_d = \frac{U^2}{g'h \cos \alpha} \quad [۳]$$

در این رابطه Fr_d : عدد فرود دنسیمتریک و α : زاویه شیب کف نسبت به افق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۱- انتخاب مواد بستر متحرک و فرسایش‌پذیر: در این تحقیق، ابتدا با توجه به شرایط ویژه‌ی جریان‌های غلیظ (سرعت‌های بسیار کم در فلوم‌های کوچک آزمایشگاهی)، تحقیقات جامعی در بخش مشخصات مواد و کاربری آن‌ها به عنوان مواد بستر و همچنین، پیش‌آزمایش‌هایی در راستای این اهداف انجام شد. با توجه به امکانات و محدودیت مواد مناسب برای شرایط آزمایشگاهی، مهمترین نکات در انتخاب این مواد، جنس، دانه‌بندی، چگالی مخصوص، سهولت بکارگیری آن‌ها بوده است. بنابراین در مرحله اول، آزمایش‌های اولیه برای تهیه مواد مناسب به عنوان رسوبات بستر به شرح زیر طراحی و اجرا گردید:

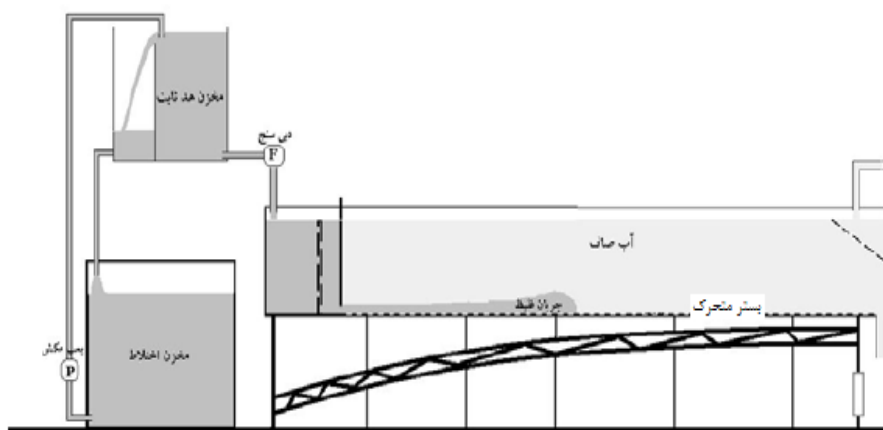
الف- تعیین معیارهای مناسب برای تهیه نوع و جنس مواد بستر با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی جریان‌های غلیظ

ب- مطالعات جامع در بخش مواد موجود که نزدیک به معیارهای تعیین‌شده باشد

ج- انجام آزمایش‌های لازم نظیر تعیین دانه‌بندی ذرات، تعیین چگالی مخصوص ذرات و پیش‌آزمایش‌ها در جهت امکان‌سنجی تشکیل فرم‌های بستر در شرایط متغیر هیدرولیکی جریان ورودی

جریان به مقطع‌های اندازه‌گیری غلظت (در فاصله ۲ و ۵ متری از دریچه)، به دلیل نبودن فرصت کافی فقط در دو رقوم به عنوان نماینده غلظت میانگین (۵ و ۸ سانتی‌متری از بستر) اندازه‌گیری غلظت نیز انجام گرفته است. در مجموع ۴۸ آزمایش شامل، ۳۶ آزمایش اصلی در شرایط بستر متحرک و فرسایش‌پذیر با متغیرهای دبی جریان (۱، ۱/۵ و ۲ لیتر بر ثانیه)، شیب کانال (۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد) و غلظت حجمی (۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) و ۱۲ آزمایش شاهد در شرایط بستر صلب برای مقایسه با بستر متحرک در دبی جریان (۱/۵ لیتر بر ثانیه) انجام شده است. در جدول ۱، محدوده اعداد فرود دنسیمتریک و رینولدز پیشانی جریان غلیظ در کل آزمایش‌ها ارائه شده است.

ارتفاع ۸ سانتی‌متر برای قرارگیری مواد بستر تعبیه گردید. در ابتدای هر آزمایش، مواد بستر در فضای تعبیه شده جانمایی شده و سطح بستر کاملاً تسطیح می‌گردید. سپس به کمک شیر انتهای فلوم، کل مخزن تا رقوم ثابتی از آب زلال پر می‌شد و به‌طور همزمان نیز مخزن اختلاط برای تهیه نمونه جریان غلیظ نمکی با غلظت مشخص در هر آزمایش آماده می‌شد. سپس سطح آب زلال و جریان غلیظ در یک ارتفاع قرار می‌گرفت و با استفاده از یک شیر و دبی سنج الکترومغناطیس میزان جریان غلیظ ورودی به درون فلوم کنترل می‌گردید. برداشت سرعت پیشانی جریان غلیظ به کمک دوربین فیلمبرداری و کرنومتر انجام می‌شده است. همچنین بلافاصله با رسیدن پیشانی



شکل ۲- طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده در تحقیق حاضر.

جدول ۱- محدوده اعداد فرود دنسیمتریک و رینولدز پیشانی جریان غلیظ.

Re		Fr _d	
کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
۵۴۵۰	۱۷۴۰۰	۰/۴۵	۰/۶۷

زبری به واسطه‌ی وجود شکل‌های بستر^۲ است (شفاعی بجستان ۱۳۷۸) و این مسئله در شرایط بستر متحرک بروز می‌کند که سبب تغییر در مشخصه‌های سرعت بدنه و پیشانی جریان غلیظ خواهد شد. محاسبه سرعت پیشانی در دو شرایط صلب و متحرک نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها، سرعت پیشانی در شرایط

نتایج و بحث

الف-۱- تحلیل سرعت پیشانی در دو حالت بستر صلب و متحرک
در تجزیه و تحلیل سرعت جریان، مقاومت در برابر جریان در یک بستر متحرک شامل دو بخش است: بخش اول زبری ناشی از اندازه ذرات^۱ و بخش دوم

² Form roughness

¹ Skin roughness

صلب ۰/۵ و در شرایط بستر متحرک ۰/۵۸ بوده است. روند افزایش آن در شرایط بستر متحرک با افزایش شیب تا جایی که تنش برشی ذرات بستر افزایش یافته است، افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌یابد (جدول ۳).

جدول ۳- درصد افزایش ضریب کولگان در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب.

شیب غلظت	۰	۱/۵٪	۲/۵٪	۳/۵٪
۱۵ gr l ⁻¹	۱۰/۱	۱۱/۲	۱۳/۴	۱۸/۷
۲۰ gr l ⁻¹	۱۰/۳	۱۲/۴	۱۴/۵	*۸
۲۵ gr l ⁻¹	۹/۰	۱۰/۹	*۵/۷	*۴/۲

* افزایش تنش برشی و حذف فرم‌های بستر (شکل ۳-ج و ۳-د).

الف-۳- تحلیل مشخصات پیشانی جریان غلیظ در دو شرایط بستر صلب و متحرک

با توجه به شکل ۱-ب، مشخصات پیشانی سرعت جریان نظیر h_f و H_f برای تمامی آزمایش‌ها مشخص گردید. طبق نتایج بدست آمده در تمامی آزمایش‌ها، مقدار ارتفاع نسبی (h_f/H_f)، در شرایط بستر متحرک بیشتر است که به دلیل کاهش ارتفاع پیشانی جریان و افزایش ارتفاع دماغه در شرایط بستر متحرک به دلیل ورود ذرات بستر از ناحیه زیر دماغه به پیشانی است. در یک غلظت ثابت، با افزایش شیب بستر، تنش برشی ذرات بستر و ورود ذرات به داخل جریان افزایش یافته و مومنتم و سرعت حرکت جریان افزایش می‌یابد، در این شرایط ارتفاع پیشانی نیز کاهش بیشتری می‌یابد. مطابق جدول ۴، این روند تا جایی ادامه دارد که ذرات بستر تشکیل فرم بستر بدهند، یعنی افزایش مومنتم جریان ادامه داشته باشد. در حالی که، با شسته شدن فرم‌های بستر در تنش‌های برشی بالاتر، حرکت رسوبات بستر کمتر شده و سبب کاهش مومنتم جریان می‌شوند. در این شرایط، ارتفاع پیشانی افزایش بیشتری می‌یابد و درصد افزایش ارتفاع نسبی کاهش خواهد یافت.

بستر متحرک افزایش یافته است و برخلاف انتظار که ذرات بستر به‌عنوان عامل مقاوم در مقابل جریان عمل کند، به دلیل ورود رسوبات کف از ناحیه زیر دماغه به داخل جریان باعث افزایش مومنتم جریان غلیظ و کاهش جریان‌های برگشتی و در نتیجه افزایش سرعت پیشانی شده است. البته این مسئله، اهمیت تشکیل فرم بستر در ایجاد عامل مقاومت در مقابل جریان و کاهش سرعت را به خوبی نشان می‌دهد، چون در ابتدای حرکت جریان غلیظ و عبور پیشانی جریان هنوز فرم بستر تشکیل نشده است، بنابراین عامل مقاومت بستر کمتر بوده و عملاً زبری بستر ناشی از زبری دانه‌بندی ذرات است. جدول ۲ درصد افزایش سرعت پیشانی را در شرایط بستر متحرک نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در یک غلظت مشخص با افزایش شیب فلوم، مومنتم جریان افزایش یافته و جریان برگشتی مقاوم کاهش می‌یابد و بدین ترتیب سرعت پیشانی افزایش می‌یابد. البته تا جایی این افزایش سرعت ادامه یافته است که تنش برشی ذرات بستر به حدی باشد که قادر به بلند کردن ذرات بستر و ورود آن‌ها به درون پیشانی جریان باشد و در ادامه حرکت قادر به تشکیل فرم بستر باشد. از طرف دیگر، با افزایش تنش برشی در حد حذف فرم‌های بستر، ورود ذرات به داخل پیشانی جریان کاهش یافته و در نتیجه سرعت پیشانی افزایش کمتری داشته است.

جدول ۲- درصد افزایش سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب.

شیب غلظت	۰	۱/۵٪	۲/۵٪	۳/۵٪
۱۵ gr l ⁻¹	۱۰	۱۶/۲	۱۷/۱	۱۸/۷
۲۰ gr l ⁻¹	۳/۴	۱۴/۱	۱۵/۱	*۸/۲
۲۵ gr l ⁻¹	۲/۸	۱۰/۷	*۸/۵	*۵/۷

* افزایش تنش برشی و حذف فرم‌های بستر (شکل ۳-ج و ۳-د).

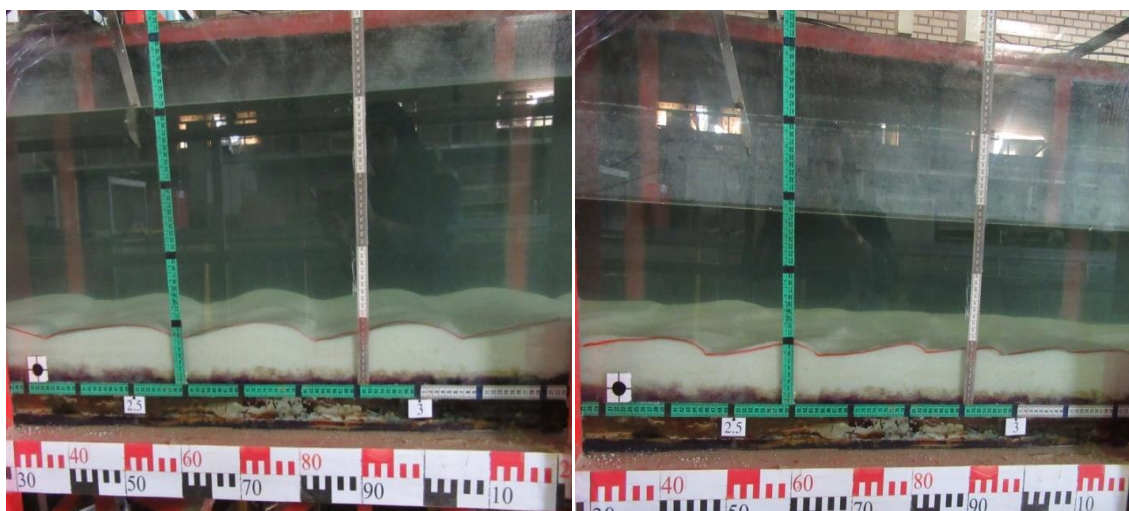
الف-۲- تحلیل ضریب کولگان در دو شرایط بستر صلب و متحرک

ضریب کولگان نیز در شرایط بستر متحرک افزایش یافته است. مقدار میانگین آن در شرایط بستر

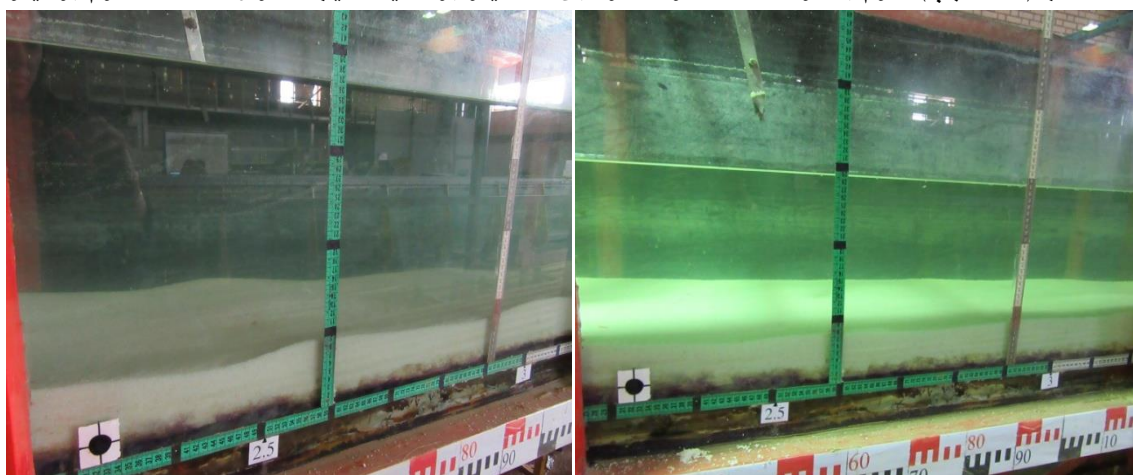
جدول ۴- درصد افزایش ارتفاع نسبی در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب.

شیب غلظت	۰	۱/۵٪	۲/۵٪	۳/۵٪
۱۵ gr l ⁻¹	۱۲	۲۵	۴۰/۶	۲۰
۲۰ gr l ⁻¹	۸/۳	۲۱/۳	۲۸	*۷/۱
۲۵ gr l ⁻¹	۴/۹	۱۵/۲	*۷/۷	*۳/۷

* افزایش تنش برشی و حذف فرم‌های بستر (شکل ۳-ج و ۳-د).



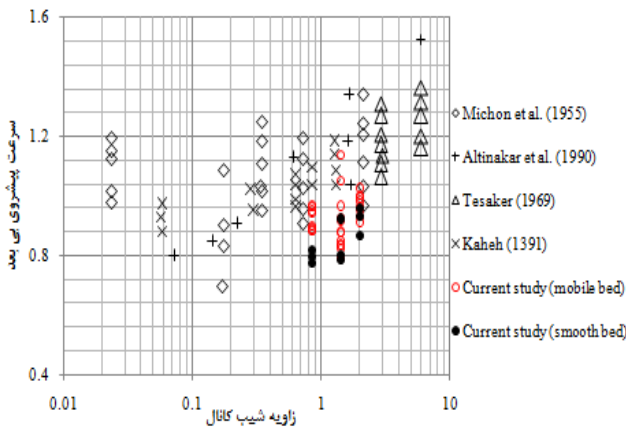
شکل ۳- الف (سمت راست)- فرم بسترهای شکل گرفته در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب ۱/۵ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.
شکل ۳- ب (سمت چپ)- فرم بسترهای شکل گرفته در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب صفر و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر.



شکل ۳- ج (سمت راست)- حذف فرم‌های بستر در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب ۲/۵ درصد و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر.
شکل ۳- د (سمت چپ)- حذف فرم‌های بستر در دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، شیب ۳/۵ درصد و غلظت ۲۵ گرم بر لیتر.

آن در بستر متحرک تا حدود ۲۰ درصد هم افزایش داشته است (جدول ۲). پارامتر بدون بعد مهمی که می‌تواند مورد بررسی قرار بگیرد، دبی بدون بعد جریان (g^3h^3/q^2) بوده که بیانگر عدد ریچاردسون در جریان

ب-۱- تغییرات سرعت بی‌بعد پیشانی جریان در مقابل عدد ریچاردسون
به‌طور کلی، با افزایش شیب کف کانال، مقدار سرعت پیشروی جریان غلیظ افزایش می‌یابد و مقدار



شکل ۵- مقایسه تغییرات سرعت بی بعد پیشانی جریان غلیظ در مقابل زاویه شیب کف کانال.

ب-۳- آنالیز ابعادی و توسعه مدل فیزیکی

در بررسی اثر بستر متحرک روی پیشانی جریان، متغیرهای فیزیکی به صورت زیر مشخص شدند.

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

در این رابطه، U_f سرعت پیشانی جریان غلیظ، g' شتاب ثقل کاهش یافته، q دبی واحد عرض ورودی، h_f ارتفاع پیشانی، K_s ارتفاع زبری بستر (معادل $3d_{90}$ ذرات بستر در نظر گرفته شده است)، S شیب بستر و ν لزجت سینماتیک سیال غلیظ می‌باشند. با تحلیل ابعادی به روش باکینگهام، پارامترهای بدون بعد به صورت زیر استخراج می‌شوند:

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

سرعت بی بعد، $\frac{g'h_f}{U_f^2}$ عدد ریچاردسون، $\frac{U_f h_f}{\nu}$

عدد رینولدز، $\frac{K_s}{h_f}$ زبری نسبی و S شیب کف

کانال است.

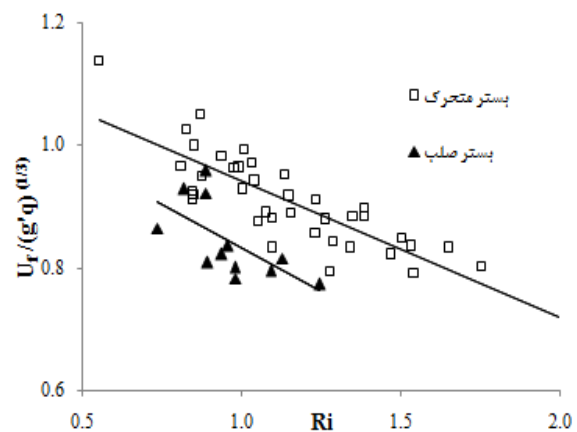
با توجه به جدول ۸، عدد رینولدز جریان در محدوده جریان آشفته است، لذا از اثر رینولدز صرف نظر می‌گردد. از آنجاکه هر کدام از پارامترهای مستقل تقریباً به صورت خطی با پارامتر سرعت ارتباط دارند (کاهه ۱۳۹۱)، با استفاده از رگرسیون خطی چند

غلیظ است. شکل ۴ تغییر مقادیر سرعت پیشروی بی بعد $U_f/(g'q)^{1/3}$ را در مقابل عدد ریچاردسون نشان می‌دهد. با افزایش عدد ریچاردسون، سرعت بدون بعد پیشروی جریان کاهش می‌یابد که مقدار آن در شرایط صلب کمتر بوده است. روابط ۵ و ۶ به ترتیب، پارامتر سرعت بدون بعد را در مقابل عدد ریچاردسون با ضریب همبستگی ۰/۸ و ۰/۶۵ در شرایط بستر متحرک و صلب نشان می‌دهند.

$$U_f/(g'q)^{1/3} = -0.234(Ri) + 1.185 \quad [5]$$

$$[6]$$

$$U_f/(g'q)^{1/3} = -0.142(Ri) + 0.952$$



شکل ۴- تغییرات سرعت بی بعد پیشانی جریان در مقابل عدد ریچاردسون.

در مقایسه روابط بدست آمده نشان داده شد که دلیل اصلی تفاوت مشخصات سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب، افزایش تنش برشی بستر متحرک در حد تشکیل فرم‌های بستر و ورود ذرات بستر به داخل پیشانی جریان بوده است.

ب-۲- مقایسه با نتایج سایر محققان

شکل ۵ نشان می‌دهد، نتایج این تحقیق تطابق خوبی با نتایج سایر محققین دارد و بر اساس آن در محدوده شیب کمتر از ۳/۵ درصد، سرعت پیشروی در بستر متحرک به طور قابل ملاحظه‌ای تا حدود ۲۰ درصد افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری کلی

پیشانی جریان غلیظ به عنوان بخش مؤثر در دینامیک جریان غلیظ با بستر متحرک، تأثیر بسزایی در انتقال بار بستر و شکل‌گیری فرم‌های بستر دارد. از این رو مطالعه آن در این تحقیق در دو شرایط بستر متحرک و صلب نتایج زیر را بدست داده است:

۱- به عنوان اولین نتیجه تحقیق، در تمامی آزمایش‌ها به دلیل ورود رسوبات بستر به داخل جریان افزایش سرعت پیشانی مشاهده شده است، ماکزیمم افزایش سرعت نسبت به شرایط بستر صلب حدود ۲۰ درصد بوده است که در شرایطی که تنش برشی ذرات بستر تا جایی افزایش می‌یابد که دیگر ذرات بستر حرکت نمی‌کنند و به اصطلاح فرم‌های بستر شسته می‌شوند این افزایش سرعت حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.

۲- افزایش سرعت پیشانی با افزایش شیب بستر فلوم به دلیل افزایش مومنتم جریان و کاهش جریان‌های برگشتی در مقابل جریان افزایش یافته است، البته این روند افزایش تا جایی ادامه داشته است که فرم‌های بستر حضور داشته‌اند.

۳- ورود رسوبات بستر در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب، سبب افزایش ضریب کئولگان سرعت تا حدود ۲۰ درصد شده است.

۴- در تحلیل مشخصات پیشانی جریان مشخص شد، مقدار ارتفاع نسبی پیشانی (h_f/H_f)، در شرایط بستر متحرک تا ۴۰ درصد افزایش یافته است و این به دلیل کاهش ارتفاع پیشانی جریان و افزایش ارتفاع دماغه به دلیل ورود ذرات بستر از ناحیه زیر دماغه به پیشانی است، که با افزایش تنش برشی و شسته شدن فرم‌های بستر روند کاهشی پیدا می‌کند.

۵- در مقایسه سرعت بدون بعد پیشانی جریان با عدد ریچاردسون، به ترتیب روابطی برای شرایط بستر صلب و متحرک با ضرایب همبستگی ۰/۸ و ۰/۶۵ ارائه شده است که در مقایسه با شرایط بستر صلب مقادیر بیشتری دارد.

۶- با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره، رابطه‌ای کلی برای تخمین سرعت پیشانی ارائه شده

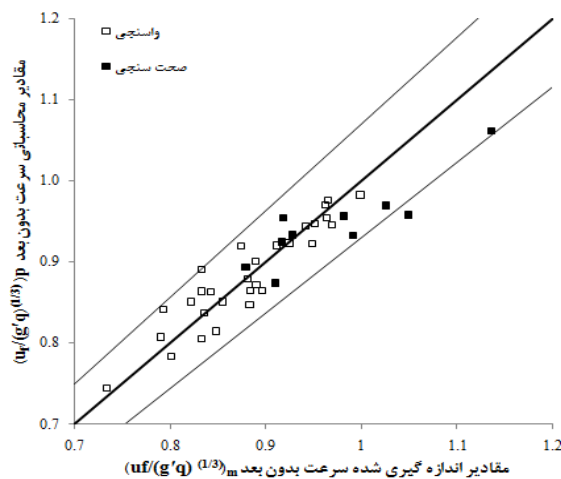
متغیره، رابطه ۹ برای تخمین سرعت پیشانی به دست آمد. در این رابطه ضریب همبستگی ۰/۸۶ می‌باشد.

[۹]

$$\frac{U_f}{(gq)^{1/3}} = 0.3(s) - 0.21(g'h_f^3/q^2) - 8.7(K_s/h_f) + 1.26$$

شکل ۶، نتایج حاصل از این مدل‌سازی است. قابل ذکر است که این نمودار، با استفاده از ۷۵٪ از داده‌ها توسعه یافته است و دقت آن بر همین اساس محاسبه شده است (جدول ۵) و ۲۵٪ از داده‌ها بمنظور صحت‌سنجی رابطه استفاده شده‌اند.

در این تحقیق با انجام آنالیز حساسیت به روش حذف تک پارامتر، تغییر دقت رابطه ۹ ارزیابی گردید و بدین ترتیب اهمیت هر یک از پارامترهای و میزان تأثیر آن‌ها در دقت نتایج تعیین گردید. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۵ بیشترین تأثیر را پارامتر عدد ریچاردسون و کمترین تأثیر را شیب کف فلوم داشته است.



شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سرعت بدون بعد پیشانی جریان غلیظ.

جدول ۵- نتایج مربوط به آنالیز حساسیت رابطه ۹.

پارامتر حذف شده	میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین مطلق خطا (MAE)	ضریب همبستگی (R-Squared)
س (%)	۰/۰۰۵	۲/۹	۰/۸۳
$g'h^3/q^2$	۰/۰۲۸	۲۶/۸	۰/۰۶
K_s/h	۰/۰۲	۱۳/۷	۰/۷۳

است که به کمک آنالیز حساسیت و معیارهای خطا نشان داده شد که پارامتر عدد ریچاردسون بیشترین تأثیر را در تخمین سرعت پیشانی در بستر متحرک خواهد داشت.

منابع مورد استفاده

- Akiyama J and Stefan HG, 1985. Plunging flow into a reservoir: Theory. *J. Hydraul. Eng* 110(4): 484-499.
- Altinakar MS, Graf WH and Hopfinger EJ, 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. *Hydraul Res* 28(1): 55-80.
- Bahrami H, 2009. study the effect of slope failure on turbidity current characteristics using a physical model. Phd thesis. Faculty of Water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz (In Persian).
- Daryaee M, Kashefipour SM and Ghomshi M, 2014. Study of Obstacle and Roughness Impacts on Controlling Sedimentary Density Current. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 24(4): 1-9(In Persian).
- Garcia MH, 2008. Sedimentation Engineering, Manual 110, Chapter 2, ASCE, Reston, Va.
- Garcia MH and Parker G, 1993. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. *J. Geophys. Res* 98(C3): 4793-4807.
- Graf WH, 1971. *Hydraulics of sediment transport*. Mc Graw-Hill, New York.
- Hosseini SA, Shamsai A and Ataie-Ashtiani B, 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an acoustic Doppler Velocimeter. *Flow Measurement and Instrumentation* 17(1): 59-68.
- Huang H, Imran J and Pirmez C, 2012. The depositional characteristics of turbidity currents in submarine sinuous channels. *J. Marine Geology*, 329-331.
- Kaheh M, 2012. Experimental investigation of Gravity Current Dynamics on Rough Beds. PHD thesis, Chamran university. Ahwaz, 124p (In Persian).
- Keulegan GH, 1957. An experimental study of the motion of saline water from locks into fresh water channels. *U. S. Natl. Bur. Stand. Rept* 5168.
- Khavasi A, 2009. Experimental Study on Deposition Behavior of Turbidity Current. Master's thesis, Faculty of Mechanical Engineering. Sharif University of Technology. 122 pages (In Persian).
- Kneller BC, Bennett SJ and McCaffrey WD, 1999. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *J. Geophys. Res* 104(C3), 5381-5391.
- Kullenberg G, 1977. Entrainment velocity in natural stratified vertical shear flow. *Est and Coast Mar Sci* 5(3):329-338.
- Little WC and Mayer PG, 1976. Stability of channel beds by armoring. *J. Hydr. Div* 102(11), 1647-1661.
- Lu J, Liao X and Zhao G, 2013. Experimental study on effects of geometric distortion upon suspended sediments in bending channels. *J. Sedimentary Geology* 294:27-36.
- Middleton GV, 1966. Experiments on density and turbidity currents, II. Uniform flow of density currents. *Can. J. Earth Sci* 3, 627-637.
- Parker G and Sutherland AJ, 1990. Fluvial armor. *J. Hydraul. Res* 28(5): 529-544.
- Parker G, García M, Fukushima Y and Yu W, 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *J. Hydraul. Res* 25(1):123-147.
- Rastello M, Ancy C, Ousset F, Magnard R and Hopfinger EJ, 2002. An experimental study of particle-driven gravity currents on steep slopes with entrainment of particles. *J. Natural Hazards and Earth System Sciences* 2: 181-185.
- Sequeiros O, Naruse H, Endo N, Garcia M and Parker G, 2009. Experimental study on self-accelerating turbidity currents, *J. Geophys. Res* 114, C05025.
- Sequeiros O, Spinewine B, Beaubouef R, Sun T, García M and Parker G, 2010a. Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed. *J. Hydraul. Eng* 136(7):412-433.

- Sequeiros O, Spinewine B, Beaubouef R, Sun T, García M and Parker G, 2010b. Bedload transport and bed resistance associated with density and turbidity currents. *Sedimentology* 57: 1463–1490.
- Shafae bejestan M, 1999. *Sediment hydraulic*. Chamran University Press, 548p (In Persion).
- Sheikhinejad B and Ghomeshi M, 2014. Providing an Empirical Relationship for Estimating Velocity of Density Current Head over the Bed with Cylindrical Roughness. *Water and Soil Science-University of Tabriz*. 25(1): 193-204 (In Persion).
- Xu JP, Sequiros OE and Noble MA, 2014. Sediment concentrations, flow condition and downstream evolution of two turbidity currents, Monterey canyon, USA. *J. science Direct. Deep-Sea Research I* 89:(11-34).