



بررسی آزمایشگاهی پدیده بر خاستگی در جریان‌های غلیظ رسوبی

پیمان ورجاوند*، مهدی قمشی، علی حسین‌زاده دلیر و داود فرسادی‌زاده**

* نگارنده مسئول: بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران. تلفن: ۳۷۳۷۳۵۸ (۰۶۱۱). پیام‌نگار: pvarjavand@yahoo.com
 ** به‌ترتیب: استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز؛ و استادان گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز
 تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱

چکیده

جریان غلیظ زمانی اتفاق می‌افتد که اختلاف چگالی بین دو سیال وجود داشته باشد. این نوع جریان یکی از مکانیزم‌های مهم در انتقال و رسوبگذاری مواد غیرچسبنده در مخازن با دره‌های باریک و عمیق هستند. در تحقیق حاضر ۶۳ آزمایش جریان غلیظ رسوبی اجرا شد تا تأثیر دو شکل و سه ارتفاع زبری مصنوعی روی رفتار این جریان نسبت به بستر صاف بررسی شود. پروفیل‌های قائم سرعت و غلظت در بدنه جریان برداشت شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که وجود زبری باعث افزایش ضخامت بدنه جریان غلیظ به مقدار متوسط ۴۷ درصد، کاهش سرعت حداکثر به مقدار متوسط ۲۹ درصد، و افزایش فاصله سرعت حداکثر از بستر به مقدار متوسط ۱۶۳ درصد می‌شود. همچنین، برای زبری‌های مختلف در شرایط خاص هیدرولیکی و تحت تأثیر عوامل عدد فرود جریان، زبری نسبی و عامل انسداد پدیده بر خاستگی مشاهده گردید. این رفتار پروفیل سرعت را در بدنه جریان تحت تأثیر می‌دهد به نحوی که با وقوع بر خاستگی مقدار سرعت حداکثر ۵ تا ۲۵ درصد در طول جریان افزایش می‌یابد. با بررسی مقدار رسوبگذاری در طول جریان، مشخص گردید که وجود زبری‌ها، به شرط وقوع نیافتن بر خاستگی، رسوبگذاری را به‌طور متوسط ۲۲۳ درصد افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

بستر زبر مصنوعی، پدیده بر خاستگی، پروفیل سرعت، جریان غلیظ رسوبی، مقدار رسوبگذاری

مقدمه

سیال با سیال اطراف خود ایجاد می‌شود که بدان معناست که نیروی ثقل به نسبت $\frac{\Delta\rho}{\rho_a}$ کاهش یافته است. این شتاب ثقل کاهش یافته که بر جریان غلیظ موثر است به‌صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

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

که در آن،

g' = شتاب ثقل کاهش یافته؛ C = غلظت حجمی

امروزه احداث سدها یکی از مهمترین راهکارها برای ذخیره‌کردن آب‌های سطحی است. همه ساله بخشی بزرگ از حجم مفید این مخازن به واسطه رسوبگذاری از بین می‌رود. با توجه به این موضوع که عامل مهم حرکت رسوبات در مخازن عمیق و باریک پدیده‌ای به نام جریان غلیظ است، مطالعه و شناخت دقیق این پدیده اهمیت خاصی دارد. جریان غلیظ، جریانی است که در نتیجه تأثیر شتاب ثقل روی اختلاف چگالی یک

تا حد معینی، می‌توان سرعت جریان را کاهش داد. این محققان همچنین گزارش دادند که کاهش سرعت بیشینه بدنه در بستر زبر به ارتفاع زبری بستگی دارد به نحوی که می‌توان گفت زبری نسبی با ارتفاع نصف فاصله سرعت حداکثر از بستر تأثیر چندانی بر حداکثر سرعت جریان ندارد. ورجاوند و همکاران (Varjavand *et al.*, 2014) با بررسی تأثیر زبری مصنوعی استوانه‌ای و مخروطی شکل با سه ارتفاع روی پروفیل سرعت و غلظت جریان غلیظ نمکی وقوع رفتاری به نام پدیده برخاستگی^۲ را نشان دادند که در نتیجه آن پروفیل سرعت تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این محققان در تحقیقات خود این رفتار را تابعی از عامل انسداد گزارش دادند که برای زبری استوانه‌ای ۱۰ درصد و برای زبری مخروطی ۱۴ درصد است.

در گذشته، مطالعات آزمایشگاهی، مانند مطالعات الیسون و ترنر (Ellison & Turner, 1959) و گارسیا و پارکر (Garcia & Parker, 1993)، روی جریان غلیظ بوده است. برخی از محققان چون لیندن و سیمپسون (Linden & Simpson, 1986) و اوهی و همکاران (Oehy *et al.*, 2010) به بررسی امکان توقف جریان غلیظ در مخزن پرداخته‌اند. تعداد محدودی از مطالعات آزمایشگاهی در باره تأثیر توپوگرافی بستر بر جریان غلیظ یا تأثیر این جریان بر توپوگرافی بستر بوده است مانند مطالعات ایمران و همکاران (Imran *et al.*, 2004) یا مطالعات آز و همکاران (Ezz *et al.*, 2013).

کوبو (Kubo, 2004) با بررسی تأثیر توپوگرافی مانند سطح شیب‌دار یا پشته بر جریان غلیظ رسوبی نشان داد که رسوبگذاری نسبی در محل تغییر شیب سطح شیب‌دار به دلیل کاهش سرعت جریان به وقوع می‌پیوندد که این پدیده باعث افزایش رسوبگذاری در کل جریان و کاهش قدرت جریان و طولانی شدن زمان عبور آن می‌شود. سکیوریس و همکاران (Sequeiros *et al.*, 2010) تأثیر

متوسط رسوبات غیرچسبنده پپ؛ $\rho_a =$ دانسیته سیال پیرامون؛ $\rho =$ دانسیته سیال غلیظ؛ $\rho_w =$ دانسیته آب؛ و $\rho_s =$ دانسیته ذرات رسوب (Daryaee *et al.*, 2014).

بسته به اختلاف جرم مخصوص سیال محیطی با سیال ورودی، جریان ممکن است به سه صورت زیرگذر، میان‌گذر یا روگذر درآید. نسبت نیروی اینرسی به نیروی ثقل در جریان‌های غلیظ عدد بی‌بعد فرود حجمی^۱ است که به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

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

که در آن،

$Fr_d =$ عدد فرود حجمی؛ $U =$ سرعت متوسط؛ $h =$ عمق جریان؛ و $\alpha =$ زاویه بستر با افق.

مطالعات بسیار زیادی در خصوص شناخت جریان غلیظ انجام گرفته و روابط تجربی و تئوری زیادی نیز برای رفتارهای مختلف آن ارائه شده است. دریایی و همکاران (Daryaee *et al.*, 2014) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر همزمان موانع و زبری روی جریان غلیظ رسوبی نشان دادند که به کار بردن مانع به اندازه ارتفاع بدنه جریان غلیظ، حدود ۳۱ درصد جریان را کنترل می‌کند، حال آنکه با کاربرد زبری همراه با این مانع حدود ۱۰۰ درصد جریان کنترل می‌شود و به مفهومی دیگر، با عبور جریان از روی مانع و زبری، تقریباً تمامی جریان تحت تأثیر ورود سیال پیرامون به درون سیال غلیظ قرار می‌گیرد و جریان غلیظ عملاً از بین می‌رود. نصب زبری در بالادست مانع، در مقایسه با نصب آن در پایین‌دست مانع، ۱۱ درصد تأثیر بیشتری در کنترل جریان غلیظ خواهد داشت.

شیخی‌نژاد و قمشی (Sheikhi-Nejad & Ghomeshi, 2014) به بررسی تأثیر بستر زبر استوانه‌ای بر جریان غلیظ نمکی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش شیب، سرعت بدنه افزایش می‌یابد و با افزایش ارتفاع زبری

در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی رفتار جریان غلیظ رسوبی بر بستر با زبری مصنوعی استوانه‌ای و مخروطی شکل پرداخته شده است. سه ارتفاع زبری و سه شیب و یک دبی نیز بررسی و تأثیر وجود زبری بر میزان رسوبگذاری بدنه جریان ارزیابی شده است.

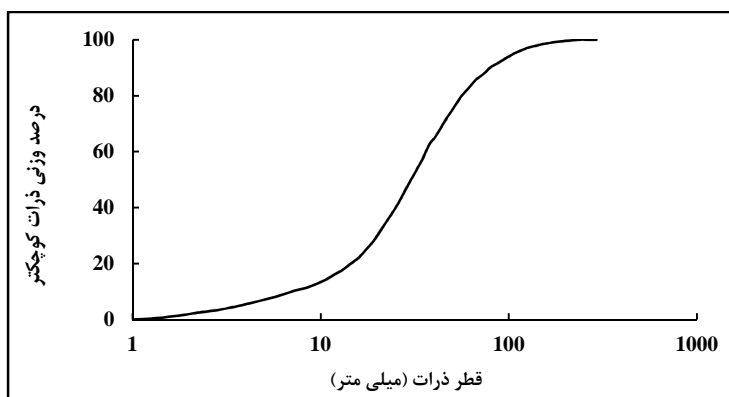
مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در یک فلوم شیب‌پذیر آزمایشگاهی با جدار شیشه‌ای اجرا شده است که ۸ متر طول، ۰/۳۵ متر عرض و ۰/۷۰ متر ارتفاع دارد. دریچه کشوی بالادست که از آن به منظور ورود جریان غلیظ استفاده می‌شود دارای بازشدگی ۱۰ سانتی‌متری است که اندازه بازشدگی این دریچه به روش سعی و خطا به‌صورتی تعیین شده است که بتوان در فاصله حداکثر ۱/۵ متر پایین‌دست دریچه به جریان یکنواخت دست یافت. بستر زیر با طول ۴ متر در فاصله ۱/۵ متری پایین‌دست دریچه نصب شده است. زبری مورد استفاده در تحقیق حاضر دارای دو شکل مخروطی و استوانه‌ای با ارتفاع‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر روی بستر زیر با نتایج بستر صاف مقایسه می‌شوند. حداکثر اختلاف دما بین سیال غلیظ و سیال پیرامون در آزمایش‌ها ± 0.5 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده که می‌توان از تأثیر دما در تشکیل جریان غلیظ صرف‌نظر کرد. برای تثبیت سطح آب سیال پیرامون در فلوم از یک سرریز روگذر در انتهای فلوم به‌نحوی استفاده شده که با توجه به شیب مقدار عمق سیال پیرامون را بین ۵۹ تا ۶۷ سانتی‌متر تثبیت کند. آزمایش به این نحو است که در ابتدا سیال پیرامون در فلوم وارد می‌شود تا ارتفاع مورد نظر پر شود، پس از آن با باز شدن دریچه بالادست جریان غلیظ به‌صورت پیوسته به فلوم وارد و در انتهای فلوم این جریان از تخلیه‌کننده تحتانی خارج می‌گردد.

زبری طبیعی و فرم بستر را بر پروفیل سرعت و غلظت جریان غلیظ در آزمایشگاه بررسی و چهار نوع فرم بستر را مشاهده کردند. در جریان فوق‌بحرانی تأثیر فرم بستر بسیار قوی‌تر از جریان زیربحرانی مشاهده گردید. این محققان پارامترهای شکل پروفیل سرعت را برای انواع فرم بستر و بستر صاف استخراج کردند. اوشاکی و همکاران (Oshaghi et al., 2013) در مطالعات آزمایشگاهی تأثیر موانع با ارتفاع‌های مختلف را بر جریان غلیظ با عدد فرود حجمی ورودی متفاوت بررسی کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که جریان با عدد فرود ورودی کمتر، در مقایسه با جریان با عدد فرود بالاتر، سریع‌تر به موانع واکنش نشان می‌دهد. نتایج تحقیقات این محققان نشان داد که افزایش ارتفاع مانع باعث کاهش شتاب جریان و کاهش سرعت حداکثر آن می‌شود و نیز با عبور جریان از مانع، سرعت آن افزایش چشمگیری خواهد داشت.

نوگیرا و همکاران (Nogueira et al., 2013) با رهاسازی جریان غلیظ نمکی روی بستر زیر مصنوعی با سه نوع دانه‌بندی ۲/۹ تا ۲۴/۶ میلی‌متر با استفاده از تکنیک تصویربرداری و تحلیل تصویر^۱ با بررسی تأثیر زبری کف و غلظت ورودی جریان بر پیشانی جریان غلیظ نشان دادند که زبری کف نقش مهمی در مومنتوم جریان به‌ویژه در کاهش سرعت پیشانی دارد که دلیل آن افزایش نیروی پسای کف است. با افزایش غلظت و ورودی جریان غلیظ، سرعت پیشانی و مقدار پیشروی آن افزایش می‌یابد. بستر با دو دانه‌بندی اول که ریز هستند، تأثیر کمی در کاهش سرعت پیشانی نشان می‌دهد حال آنکه، طبق انتظار، با بزرگ شدن قطر دانه‌بندی این تأثیر بیشتر می‌شود. با افزایش اندازه مواد بستر، یکنواختی بیشتری در ارتفاع جریان دیده خواهد شد و امواج بزرگ‌مقیاس^۲ نیز کمتر دیده می‌شود که دلیل آن می‌تواند تولید تلاطم بیشتر در سطوح پایین‌تر جریان و در نتیجه آن اختلاط بیشتر در جریان باشد.

از مخزن اختلاط به حجم ۳۰۰۰ لیتر برای تهیه مخلوط آب و رسوب جریان استفاده شد که با لوله‌ای به یک مخزن ارتفاع ثابت به فاصله ۳ متر از زمین انتقال می‌یابد و با استفاده از سرریز تعبیه شده در این مخزن ۶۲۵ لیتری سطح آن ثابت می‌شود. سپس سیال غلیظ از مخزن با ارتفاع ثابت با لوله‌ای مجهز به دبی‌سنج الکترومغناطیس با دقت ± 0.05 لیتر در ثانیه وارد بالادست دریچه کشوی می‌شود. در این تحقیق ۶۳ آزمایش جریان غلیظ رسوبی با استفاده از رسوبات غیرچسبنده از نوع میکروسیلیس با وزن مخصوص ۲۶۵۰ کیلوگرم در مترمکعب اجرا شد. جدول ۱ مشخصات تمامی آزمایش‌ها را به صورت خلاصه نشان می‌دهد. برای استخراج منحنی دانه‌بندی (شکل ۱) از دستگاه Mastersizer استفاده شد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی رسوبات

جدول ۱- مشخصات کلی آزمایش‌ها

سری	تعداد آزمایش	شکل زبری	ارتفاع زبری (میلی‌متر)	غلظت (گرم در لیتر)	دبی (لیتر در ثانیه)	شیب کف فلوم (درصد)
۱	۹	بستر صاف	-----	۸/۲-۱۷/۰	۰/۹۶۷-۱۱/۰۶۰	۰/۵-۱/۲۵-۲/۰
۲	۹		۱۰	۶/۸-۱۶/۰	۰/۹۶۱-۱۱/۰۵۸	
۳	۹	بستر زبر مخروطی	۲۵	۸/۰-۱۶/۷	۰/۹۷۵-۰/۹۹۷	۰/۵-۱/۲۵-۲/۰
۴	۹		۴۰	۹/۶-۱۹/۲	۰/۹۷۵-۱۱/۰۲۵	
۵	۹		۱۰	۶/۰-۱۶/۸	۰/۹۹۲-۱۱/۰۳۹	
۶	۹	بستر زبر استوانه‌ای	۲۵	۷/۰-۱۸/۲	۰/۹۹۰-۱۱/۰۵۵	۰/۵-۱/۲۵-۲/۰
۷	۹		۴۰	۹/۲-۲۱/۲	۰/۹۹۷-۱۱/۰۳۰	

زبری کوچک‌تر در ناحیه دیوار^۱ و زبری بزرگ‌تر از آن در ناحیه جت^۲ قرار دارد. فاصله طولی و عرضی مرکز به مرکز زبری‌ها از هم به ترتیب ۷۵ و ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۲ ب). آرایش زبری‌ها به نحوی انتخاب شده که

بستر زبر به صورت زیگزاگ آماده شد و ارتفاع زبری ۲۵ میلی‌متر، به عنوان زبری با ارتفاع میانه معادل متوسط فاصله سرعت حداکثر از کف (h_m در شکل ۳ الف) در آزمایش‌های روی بستر صاف، در نظر گرفته شد. بنابراین،

$$\mu = \mu_w (1 - 1.35 C_{sw})^{-2.5} \quad (3)$$

که در آن،

C_{sw} : غلظت حجمی رسوبات، μ : لزوجت دینامیک سیال

غلیظ، و μ_w : لزوجت دینامیک سیال پیرامون (آب).

پس از انجام آزمایش پارامترهای غلظت متوسط

(C_{av}) ، سرعت متوسط (U_{av}) و ضخامت جریان (h_t) با

استفاده از معادلات بیان شده توسط ترنر (Turner, 1973)

به ترتیب به صورت روابط ۴، ۵ و ۶ بیان می‌شوند:

$$C_{av} = \frac{\int_0^\infty cudz}{\int_0^\infty udz} \quad (4)$$

$$U_{av} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty udz} \quad (5)$$

$$h_t = \frac{(\int_0^\infty udz)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} \quad (6)$$

که در آنها،

Z = محور قائم مختصاتی در جهت عمق جریان؛

u = مقدار سرعت متوسط زمانی در فاصله Z از بستر.

مقدار ورود سیال پیرامون در سیال غلیظ به‌عنوان ضریب

اختلاط^۱ در نظر گرفته می‌شود که پارکز

و همکاران (Parker et al., 1987) به‌صورت رابطه ۷

تعریف کرده‌اند:

$$E_w = \frac{1}{U_{av}} \frac{\delta U_{av} h_t}{\delta x} \quad (7)$$

که در آن،

E_w = ضریب اختلاط؛ و x = فاصله طولی در جهت جریان

از ابتدای محور مختصات.

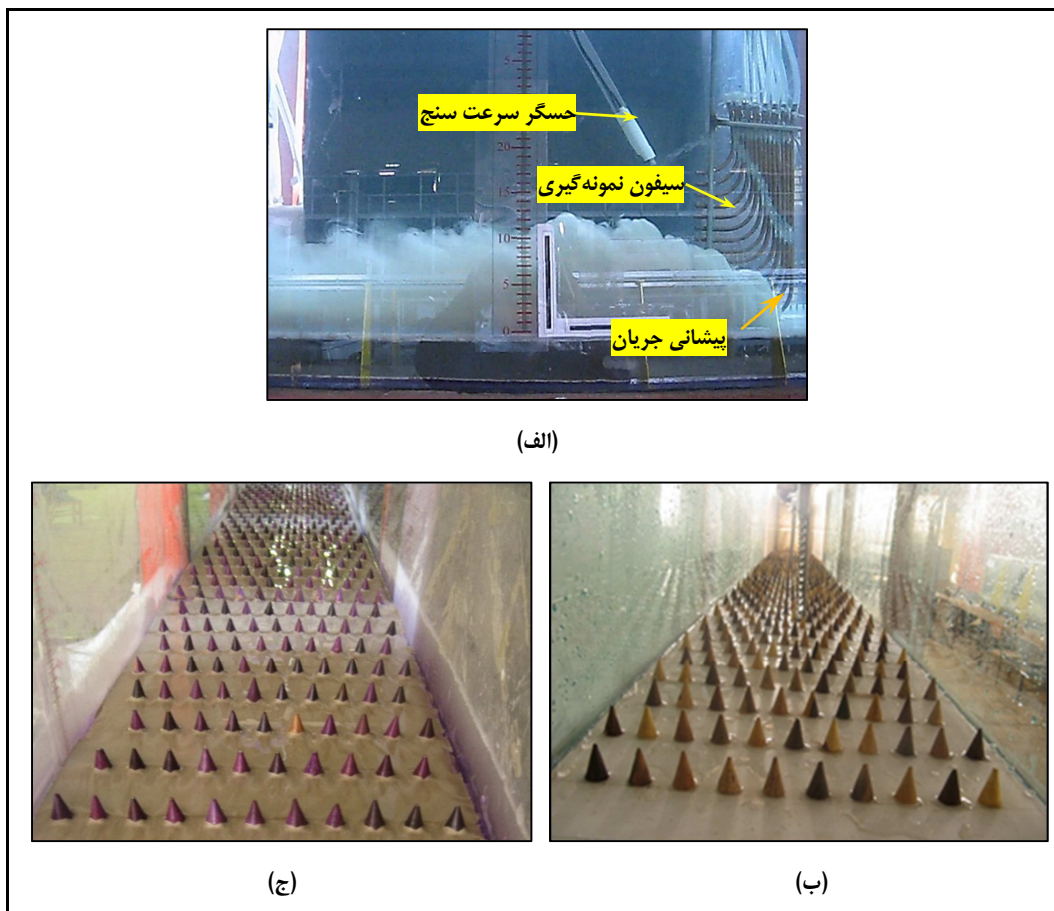
سه هدف را تامین کند: ۱- پروفیل سرعت و غلظت در نزدیکی بستر قابل اندازه‌گیری باشد. ۲- افزایش ارتفاع زبری‌های استوانه‌ای ممکن باشد و ۳- روند توسعهٔ جریان در طول فلوم برای بیشتر آزمایش‌ها قابل مشاهده باشد.

اندازه‌گیری سرعت: چهار پروفیل قائم سرعت در فاصله‌های ۷۵، ۱۵۰، ۱۹۸ و ۲۲۵ سانتی‌متری از شروع بستر زبر با استفاده از دستگاه برداشت پروفیل سرعت فراصوت^۱ در هر آزمایش برداشت شد. سرعت‌سنج مورد استفاده از نوع DOP2000 ساخت شرکت Signal Processing با دقت ۱-۲ درصد است. برای هر پروفیل حدود ۲۵ ثانیه زمان برداشت اطلاعات در نظر گرفته شد و حسگر سرعت‌سنج با زاویهٔ ۲۵ درجه نسبت به قائم در جهت پایین‌دست نصب شد (همان‌طور که در شکل ۲-الف نشان داده شده است). برای تمامی آزمایش‌ها طول حجم نمونه‌گیری سرعت‌سنج و فرکانس موج ارسالی به ترتیب ۱/۲۹ میلی‌متر و ۳/۶ مگاهرتز بوده است.

اندازه‌گیری غلظت: سه ردیف سیفون نمونه‌گیر در فاصله‌های ۷۵، ۱۵۰ و ۲۲۵ سانتی‌متر از شروع بستر زبر برای برداشت نمونهٔ غلظت در پروفیل قائم به‌کار گرفته شد. هر سیفون ۱۴ لولهٔ نمونه‌گیر با فاصله مرکز به مرکز ۱/۵ سانتی‌متر دارد که در مرکز فلوم نصب شدند (همان‌طور که در شکل ۲-الف نشان داده شده است). سیفون‌ها با استفاده از لولهٔ مسی با قطر بیرونی و داخلی به ترتیب ۵ و ۳ میلی‌متر ساخته شدند. غلظت رسوبات با استفاده از روش خشک کردن در آون و توزین تعیین شدند.

پارامترهای آزمایشگاهی

در آزمایش‌ها عدد رینولدز بر مبنای ضخامت جریان، بین ۲۲۰۰ تا ۵۶۰۰ نتیجه شد. لزوجت دینامیکی سیال غلیظ با استفاده از رابطهٔ ۳ (Roscoe, 1959) محاسبه شد:



شکل ۲- الف) سیفون نمونه‌گیر و حسگر سرعت در پیشانی جریان غلیظ رسوبی، ب) بستر زبر مخروطی با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر قبل از انجام آزمایش و ج) بستر زبر مخروطی با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر

نتایج و بحث

مقایسه نتایج تحقیق با نتایج تحقیقات دیگر

زمانی که پیشانی جریان غلیظ به انتهای فلوم رسید اندازه‌گیری سرعت در بدنه با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج آغاز شد. پروفیل سرعت در تمامی آزمایش‌ها مشابه هم‌اند. از آنجا که اساس اندازه‌گیری سرعت با دستگاه سرعت‌سنج تغییر در مشخصات موج ارسالی است و این روش اندازه‌گیری نیاز به وجود ذرات در جریان دارد و با فاصله گرفتن از کف در پروفیل قائم غلظت، مقدار معلق در جریان غلیظ رسوبی کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود خطای اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی مرز بین دو سیال بیشتر از خطای اندازه‌گیری در نزدیکی بستر باشد.

با توجه به تأثیر اصطکاک و نیروی برشی بر پروفیل سرعت در نزدیکی بستر و مرز بین دو سیال، پروفیل سرعت را می‌توان با استفاده از دو معادله بی‌بعد برای ناحیه کف و ناحیه جت تخمین زد. آلتیناکار و همکاران (Altinakar *et al.*, 1996) این معادلات بی‌بعد را برای ناحیه کف به صورت رابطه ۸ بیان کردند:

$$\frac{u(z)}{u_m} = \left(\frac{z}{h_m}\right)^{1/\alpha_v} \quad (8)$$

که در آن،

$u(z)$ = سرعت متوسط زمانی در فاصله z بالای بستر؛ u_m = سرعت حداکثر؛ h_m = فاصله حداکثر

به اینکه بازه تغییرات عدد فرود در این دو تحقیق به ترتیب ۱-۲/۳۳ و ۰/۶-۳/۶ است، عدد فرود ورودی برای بستر صاف و زیر در تحقیق حاضر بین ۰/۳۰-۰/۴۵ است.

با توجه به جدول ۲ بیشترین اختلاف در ضرایب تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات در ناحیهٔ جت است که دلیل آن را می‌توان اختلاف در شرایط هیدرولیکی آزمایش‌ها و همچنین خطای ناشی از روش اندازه‌گیری سرعت در دستگاه سرعت‌سنج دانست که در بالا گفته شد. بنابراین می‌توان گفت که این اختلاف منطقی به نظر می‌رسد. ضرایب معادلات سرعت نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع زبری، فاصلهٔ سرعت حداکثر در پروفیل سرعت از کف افزایش یافته است.

سرعت در بالای بستر؛ و $\alpha_v =$ ضریب تجربی. همچنین برای ناحیهٔ جت، این رابطه به صورت رابطه ۹ بیان شده است:

$$\frac{u(z)}{u_m} = \exp \left[-\beta_v \left(\frac{z - h_m}{h_t - h_m} \right)^{\gamma_v} \right] \quad (9)$$

که در آن،

β_v و γ_v ضرایب تجربی هستند.

در جدول ۲ ضرایب تجربی این معادلات برای آزمایش‌های تحقیق حاضر و دیگر تحقیقات ارائه شده است. توجه شود که آزمایش‌های آلتینکار و همکاران (Altinakar *et al.*, 1996) و نورمحمدی و همکاران (Nourmohammadi *et al.*, 2011) برای جریان غلیظ رسوبی روی بستر صاف بوده است و با توجه

جدول ۲- ضرایب روابط سرعت

α_v	β_v	γ_v	ارتفاع زبری	شکل زبری	رابطه
۵/۸۰	۰/۶۰	۲/۷۰			نورمحمدی و همکاران (Nourmohammadi <i>et al.</i> , 2011)
۶/۰۰	۱/۴۰	۲/۰۰			آلتینکار و همکاران (Altinakar <i>et al.</i> , 1996)
۶/۷۰	۲/۱۰	۱/۴۷		بستر صاف	
۲/۹۲	۱/۷۱	۱/۳۴	۱۰		تحقیق حاضر
۱/۶۶	۱/۴۰	۱/۶۴	۲۵	بستر زیر مخروطی	
۱/۲۰	۱/۳۵	۱/۷۸	۴۰		
۲/۳۴	۱/۵۴	۱/۳۵	۱۰		
۱/۶۶	۱/۳۸	۱/۵۱	۲۵	بستر زیر استوانه‌ای	
۱/۱۵	۱/۲۳	۱/۷۰	۴۰		

کم، شیب بستر ۰/۵ درصد و ارتفاع زبری ۱۰ میلی‌متر جریان روی بستر زبر دچار انسداد و پس‌زدگی، که نتیجهٔ آن افزایش عمق بالادست بستر زبر خواهد بود، نشده است. حال آنکه برای بقیهٔ شرایط آزمایشگاهی، بالآمدگی جریان

تأثیر غلظت ورودی بر ساختار جریان

برای یک دبی ورودی مشخص، ساختار جریان غلیظ را با غلظت ورودی، شیب بستر و زبری کنترل می‌کنند. در تحقیق حاضر مشخص شد که برای غلظت ورودی نسبتاً

جریان غلیظ رسوبی، غلظت کاهش یابد. این رفتار به دلیل تغییر شیب نمودار پروفیل قائم سرعت در منطقه دیوار است. بنابراین با افزایش ارتفاع زبری، مقدار زبری موثر افزایش می‌یابد و در نتیجه آن پروفیل سرعت نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که شیب نمودار پروفیل سرعت در نزدیکی بستر برای بستر صاف و زبر با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر تقریباً ثابت است حال آنکه برای زبری با ارتفاع بیشتر این شیب (به‌ویژه در نزدیکی بستر) تغییر کرده است و در نتیجه آن مقدار $\partial u/\partial z$ نیز در نزدیکی بستر زبر شده است و به همین دلیل مقدار عدد ریچاردسون محلی^۱ کاهش و اختلاط درون لایه‌های سیال غلیظ افزایش یافته است که موجب کاهش غلظت در نزدیکی بستر شده است. عدد ریچاردسون محلی به‌صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود (Turner, 1973):

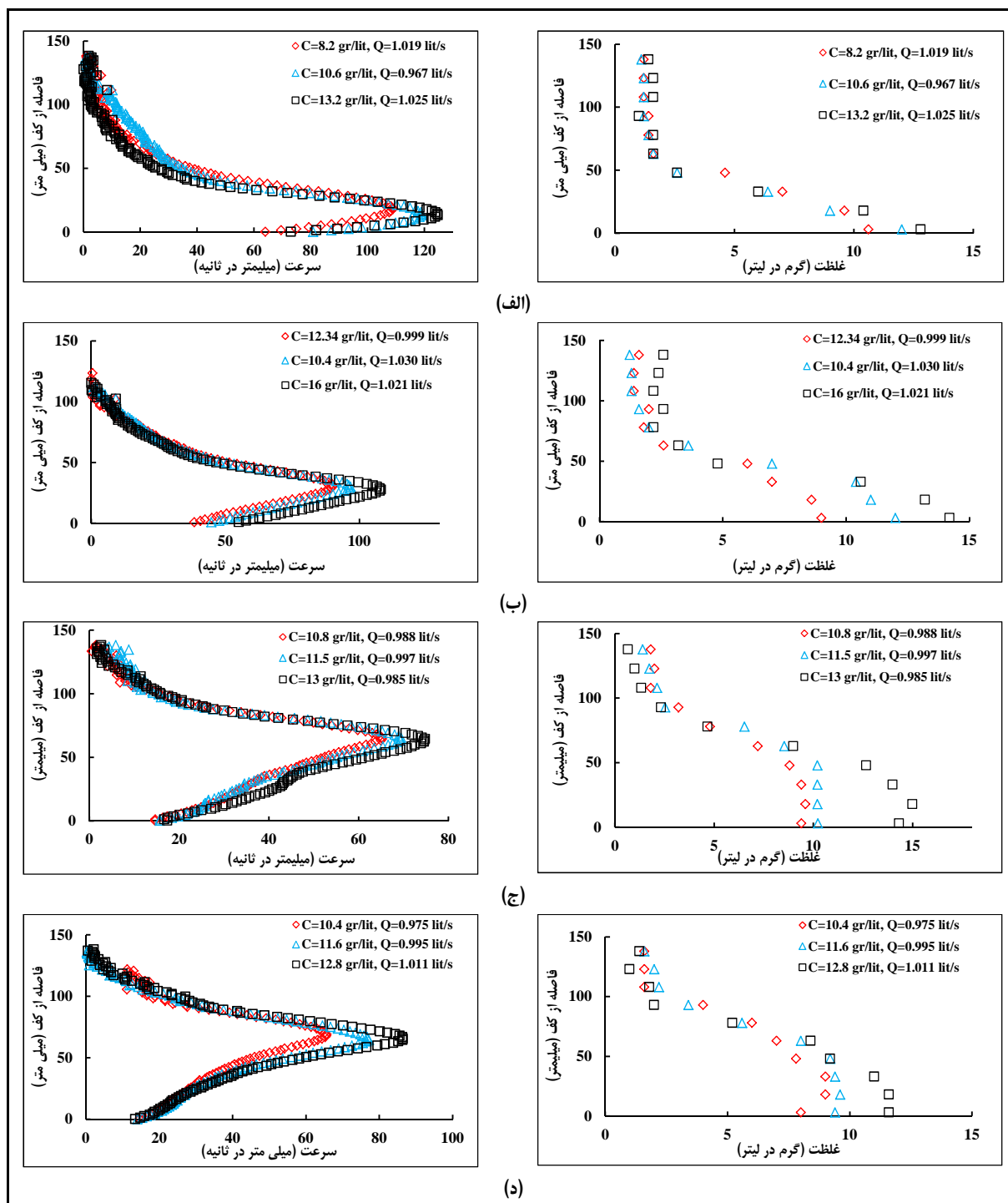
$$R_{ig} = -\frac{g(\delta\rho/\delta z)}{\rho(\delta u/\delta z)^2} \quad (10)$$

که در آن، ρ = غلظت در فاصله z از بستر. این پارامتر بدون بعد مقیاسی است برای تعیین تولید شناوری در مقابل تولید تلاطم در سیال لایه‌بندی شده. از عدد ریچاردسون برای تعیین مقدار پایداری لایه‌بندی و تولید تلاطم در سیال غلیظ استفاده می‌شود. مقدار بحرانی این عدد را ترنر (Turner, 1973) ۰/۲۵ بیان کرده است که با کاهش مقدار آن از مقدار بحرانی، اختلاط در بین لایه‌های سیال رخ می‌دهد.

در بالادست مشاهده و جریان ماندگار در مدت زمان طولانی‌تر ایجاد شده است.

تأثیر غلظت ورودی بر ساختار جریان غلیظ رسوبی برای بستر صاف و زبر در شکل ۳ آورده شده است (در تمامی نمودارها، C: غلظت ورودی، Q: دبی ورودی، و r: ارتفاع زبری است). این شکل پروفیل قائم سرعت و غلظت را در فاصله ۲۲۵ سانتی‌متر از شروع بستر زبر نشان می‌دهد. شیب بستر ۱/۲۵ درصد و غلظت ورودی ۸/۲ تا ۱۶ گرم در لیتر تغییر می‌کند. دبی ورودی در حدود ۱ لیتر در ثانیه است. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت ورودی، حداکثر سرعت ۱۳/۱ درصد افزایش دارد و غلظت مواد رسوبی در مقطع جریان نیز افزایش می‌یابد ولی فاصله سرعت حداکثر از بستر ۱۲/۵ درصد کاهش یافته است که دلیل آن افزایش مومنتوم جریان ورودی به دلیل افزایش غلظت آن است، با افزایش مومنتوم انرژی جریان افزایش می‌یابد و قابلیت انتقال مواد رسوبی بیشتر و در نتیجه آن از میزان رسوبگذاری در طول جریان کاسته می‌شود و غلظت مواد رسوبی افزایش می‌یابد. افزایش انرژی و مومنتوم جریان باعث کاهش ضخامت بدنه و افزایش مقدار سرعت نیز می‌شود. حال آنکه برای زبری ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر، این فاصله با تغییرات غلظت تقریباً ثابت است. این رفتار به دلیل تأثیر ارتفاع زبری است به نحوی که زبری بزرگ‌تر قابلیت بیشتری برای کنترل جریان دارد و اجازه تغییرات زیاد به h_m را نمی‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۳ (ج) و ۳ (د)، غلظت در نزدیکی بستر کمتر از غلظت در نقاط بالایی آن است در صورتی که انتظار هست که با فاصله گرفتن از بستر در



شکل ۳- تأثیر غلظت ورودی و زبری بر پروفیل غلظت و سرعت جریان

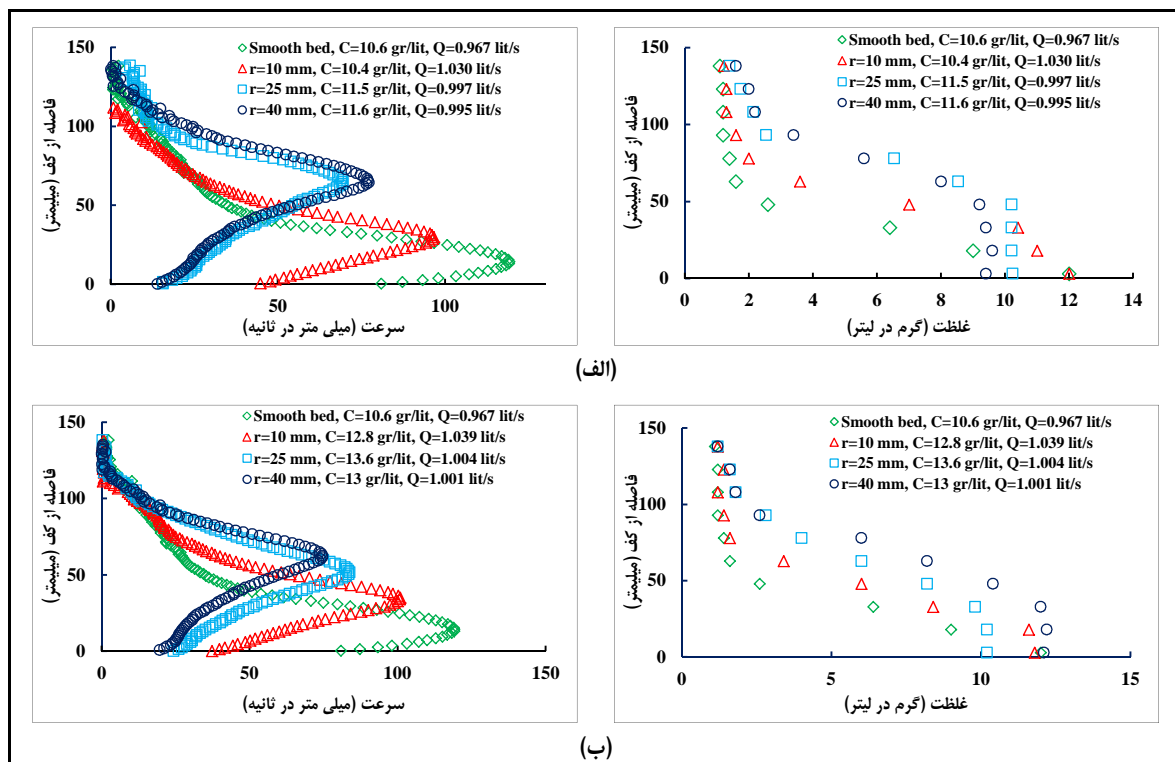
(الف) بستر صاف، (ب) بستر زبر مخروطی ۱۰ میلی‌متر، (ج) بستر زبر مخروطی ۲۵ میلی‌متر و (د) بستر زبر مخروطی ۴۰ میلی‌متر

از شروع بستر زبر و برای شیب بستر ۱/۲۵ درصد است. در این شکل، غلظت و دبی ورودی تقریباً ثابت هستند. در این شکل مشاهده می‌شود که با وجود تشابه شکل پروفیل‌های سرعت در دو نوع زبری، مقدار حداکثر سرعت و فاصلهٔ آن

تأثیر زبری بر ساختار جریان غلیظ رسوبی در شکل ۴ آورده شده است. این شکل نشان‌دهندهٔ پروفیل قائم سرعت در فاصلهٔ ۲۲۵ سانتی‌متر

پروفیل غلظت را روی بستر صاف و زبر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ مشخص است که پروفیل غلظت روی بستر صاف به صورت یکنواخت در جهت قائم کاهش می‌یابد و نقطه عطفی در آن مشاهده نمی‌شود حال آنکه در بستر زبر یک نقطه عطف در بالای بستر دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع زبری، فاصله آن نیز از کف افزایش می‌یابد. حال آنکه برای زبری به ارتفاع ۴۰ میلی‌متر تغییرات محسوسی در فاصله این نقطه مشاهده نمی‌شود. توزیع یکنواخت غلظت ناشی از توزیع تلاطم در ناحیه دیوار جریان غلیظ به واسطه وجود زبری بستر است که با افزایش زبری، افزایش می‌یابد.

از بستر در زبری مخروطی نسبت به حداکثر سرعت و فاصله آن از بستر در زبری استوانه‌ای به ترتیب کمتر و بیشتر است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که در زبری مخروطی با ارتفاع ۴۰ میلی‌متر، مقدار سرعت حداکثر از ارتفاع ۲۵ میلی‌متر همان زبری بیشتر است که این رفتار به دلیل پدیده برخاستگی (گزارش شده توسط ورجاوند و همکاران (Varjavand *et al.*, 2014) است. زمانی که این پدیده اتفاق می‌افتد، جریان به دلیل شناوری بسیار زیاد شتاب می‌گیرد و تمایل به عبور دادن بخش عمده خود از روی زبری‌های بستر دارد؛ بنابراین زبری موثر کاهش و سرعت حداکثر افزایش خواهد یافت. این شکل همچنین



شکل ۴- تأثیر زبری بر ساختار جریان
الف) زبری مخروطی و ب) زبری استوانه‌ای

به دلیل نبود شناوری، تأثیر تغییر ناگهانی زبری بر شرایط دینامیکی جریان، مانند تنش برشی بستر، به صورت ناگهانی دیده می‌شود ولی در مورد جریان غلیظ به دلیل تمایل جریان به شناور شدن، این تأثیر تدریجی است.

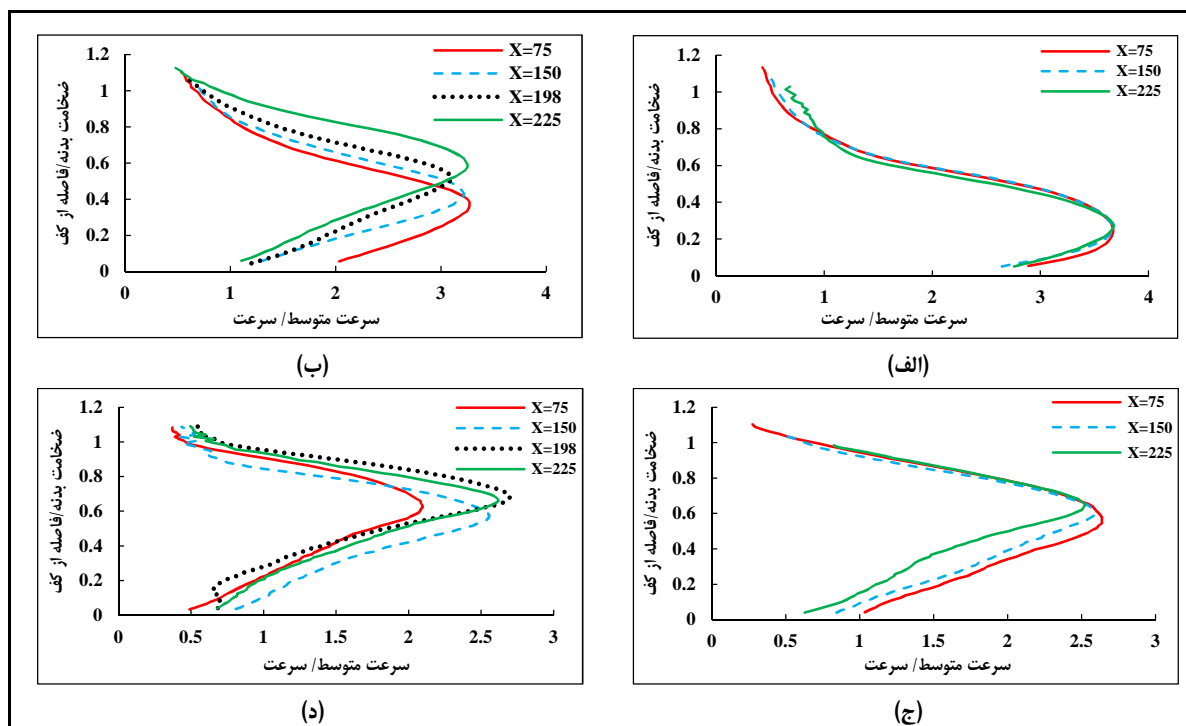
پدیده برخاستگی

رفتار جریان غلیظ روی بستر با تغییر ناگهانی زبری با جریان کانال‌های باز به دلیل شناوری زیاد آن متفاوت است. این تفاوت به صورتی است که در جریان کانال‌های باز

نشان می‌دهد.

در جریان غلیظ رسوبی به دلیل رسوبگذاری در طول مسیر، مقدار شتاب ثقل کاهش بیشتری نسبت به جریان غلیظ نمکی داشته و در نتیجهٔ آن شناوری بیشتر می‌شود از این رو پدیدهٔ برخاستگی در تحقیق حاضر برخلاف جریان غلیظ نمکی که فقط در زبری به ارتفاع ۴۰ میلی‌متر مشاهده شده است (طبق گزارش ورجاوند و همکاران (Varjavand *et al.*, 2014) در تمامی ارتفاع زبری‌ها دیده می‌شود). برای زبری به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر در شکل ۵، به دلیل شتاب ثقل به اندازهٔ کافی بزرگ که باعث چسبیده شدن بدنهٔ جریان به کف فلوم می‌شود، پدیدهٔ برخاستگی تا فاصلهٔ ۱۹۸ سانتی‌متری از ابتدای بستر زبر مشاهده نشد ولی همان‌طور که در شکل مشخص است با وقوع رسوبگذاری در ابتدای بستر زبر و کاهش شتاب ثقل موثر، این رفتار در فاصلهٔ بین ۱۹۸ تا ۲۲۵ سانتی‌متری بستر زبر با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر رخ داده است.

پیشتر گفته شد که این تغییر در رفتار را ورجاوند و همکاران (Varjavand *et al.*, 2014) به نام پدیدهٔ برخاستگی در جریان غلیظ نمکی گزارش کرده‌اند. در تحقیق حاضر نیز با توجه به شرایط آزمایشگاهی، این رفتار در جریان غلیظ رسوبی مشاهده شد. شکل ۵ تأثیر زبری مخروطی شکل را بر جریان غلیظ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روند توسعه یافتگی پروفیل سرعت روی بستر صاف کاملاً عادی است و رفتار خاصی در طول جریان اتفاق نمی‌افتد. با بررسی توسعه یافتن جریان روی بستر با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر نیز رفتار خاصی دیده نمی‌شود. با بررسی زبری با ارتفاع ۱۰ و ۴۰ میلی‌متر در شکل ۵ مشاهده می‌شود که پدیدهٔ برخاستگی در فاصلهٔ ۱۹۸ تا ۲۲۵ سانتی‌متر و ۷۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متر زبری‌های ۱۰ و ۴۰ میلی‌متر مشاهده شده است. به نحوی که با حرکت در طول جریان برای این دو ارتفاع زبری، به جای کاهش در حداکثر سرعت در این فواصل سرعت حداکثر افزایش



شکل ۵- پروفیل سرعت در محور طولی جریان غلیظ رسوبی (زبری مخروطی، شیب ۰/۵ درصد)

(الف) بستر صاف، (ب) بستر زبر با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، (ج) بستر زبر با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر و (د) بستر زبر با ارتفاع ۴۰ میلی‌متر

معیار وقوع برخاستگی

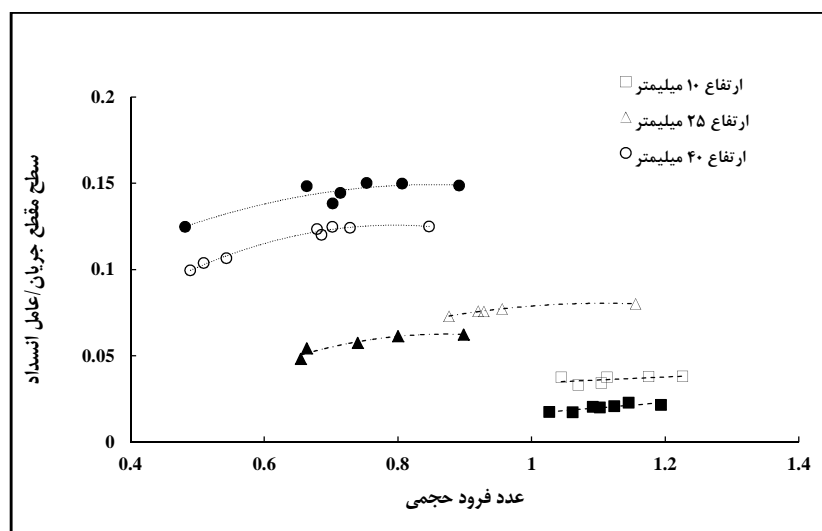
$$L_f = \text{معیار وقوع برخاستگی.}$$

شکل ۶ تغییرات حداقل عامل انسداد، A_r/A مورد نیاز را در مقابل عدد فرود حجمی برای وقوع برخاستگی در جریان غلیظ رسوبی نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که عامل انسداد کوچک‌تری برای زبری مخروطی، نسبت به زبری استوانه‌ای، در دو زبری ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر نیاز است که این رفتار برای زبری ۴۰ میلی‌متر برعکس شده است. این تغییر رفتار با افزایش ارتفاع زبری به دلیل تأثیر شکل زبری است. به نحوی که سطح مقطع عمود بر جریان زبری مخروطی با ارتفاع ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر کمتر از سطح مقطع متناظر در زبری استوانه‌ای است که در مورد ارتفاع ۴۰ میلی‌متر برعکس است. روند کلی تغییرات برای هر ارتفاع زبری در شکل ۶ مشابه نموداری است که ورجاوند و همکاران (Varjavand *et al.*, 2014) گزارش داده اند به نحوی که در تمامی حالات نمودار تمایل به رسیدن به مقدار نسبتاً ثابت دارد.

به منظور تعیین معیار مشخص برای وقوع برخاستگی، ورجاوند و همکاران (Varjavand *et al.*, 2014) با تعیین حجم کنترل در محدوده وقوع، این رفتار را وابسته به سرعت متوسط جریان، شتاب ثقل کاهش یافته و عامل انسداد (نسبت بدون بعد سطح مقطع زبری به سطح مقطع کل بدنه جریان غلیظ) گزارش کردند. در این تحقیق از آنجا که ارتفاع زبری نیز در وقوع این رفتار موثر شناخته شده است با آنالیز ابعادی روی متغیرهای موثر که شامل سطح مقطع جریان A ، سرعت متوسط جریان U_{av} ، ضخامت بدنه جریان h_t و ارتفاع زبری r هستند رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$L_f = f(F_{rd}, A/A_r, r/h_t) \quad (11)$$

که در آن،



شکل ۶- تغییرات حداقل عامل انسداد مورد نیاز برای وقوع برخاستگی در مقابل عدد فرود حجمی (توپر: زبری مخروطی، توخالی: زبری استوانه‌ای)

مقدار رسوبگذاری

به‌منظور تعیین مقدار رسوبگذاری در تحقیق حاضر از رابطهٔ ۱۲ استفاده شد:

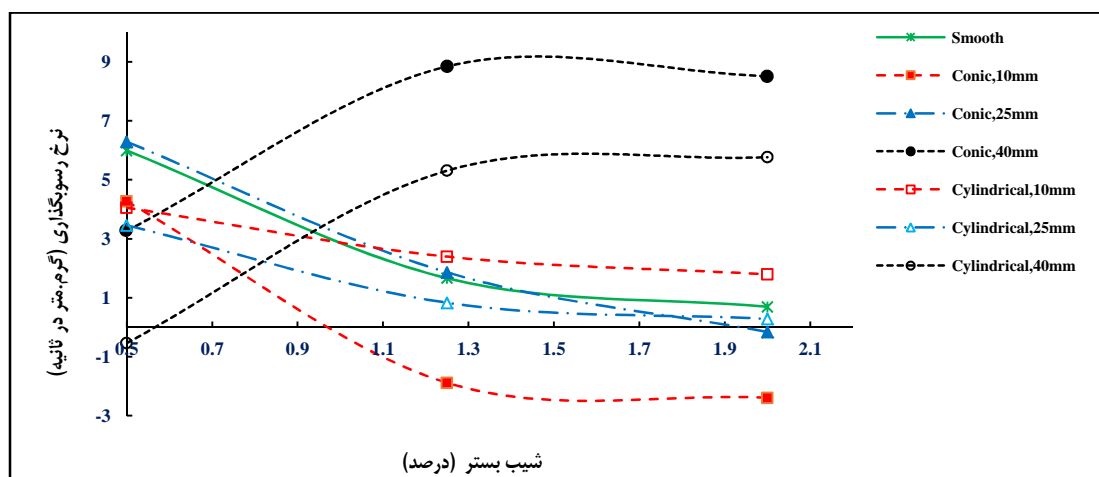
$$I_s = \frac{[U_{av} \cdot h_t \cdot C]_{75} - [U_{av} \cdot h_t \cdot C]_{225}}{dx} \quad (12)$$

که در آن،

dx = فاصلهٔ بین دو مقطع؛ I_s = مقدار رسوبگذاری در بازه ۷۵ تا ۲۲۵ سانتی‌متر از ابتدای بستر زبر برای واحد طول و واحد عرض فلوم؛ U_{av} = سرعت متوسط مقطع جریان؛ و C = غلظت رسوبات در مقطع جریان. مقدار رسوبگذاری برای شیب‌ها و زبری‌های مختلف در شکل ۷ آورده شده است. در این شکل دیده می‌شود که برای بسترهای صاف و زبر تا ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، با افزایش شیب مقدار رسوبگذاری کاهش یافته است. به‌نحوی که تقریباً به مقدار ثابت میل می‌کند. دلیل این روند را می‌توان این‌طور گفت که با افزایش شیب، قدرت حمل رسوبات افزایش و در نتیجهٔ آن مقدار رسوبگذاری کاهش می‌یابد. حال با افزایش

شیب بستر انرژی جریان افزایش و در عوض مقدار استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد. به این دلیل است که افزایش بیش از حد شیب تأثیر چندانی بر مقدار رسوبگذاری ندارد و نمودار به مقدار ثابت رسوبگذاری میل می‌کند.

با بررسی شکل ۷ همچنین مشاهده می‌شود که برای زبری استوانه‌ای به ارتفاع ۲۵ میلی‌متر و مخروطی به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر و بخشی از زبری مخروطی به ارتفاع ۲۵ میلی‌متر و استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، مقدار رسوبگذاری برخلاف انتظار کمتر از بستر صاف شده است. دلیل این امر آن است که با حضور زبری بستر، جریان به‌دلیل شناوری بالا ترجیح به عبور بخش عمدهٔ خود از روی زبری‌ها دارد و به‌دلیل افزایش سرعت آن، قدرت حمل رسوبات زیاد شده و رسوبگذاری نسبت به بستر صاف کاهش یافته است (این رفتار همان پدیدهٔ برخاستگی است). این رفتار در زبری استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر کمتر مشاهده شده است.



شکل ۷- تغییرات مقدار رسوبگذاری در برابر شیب به ازای بسترهای صاف و زبر مختلف

افزایش یافته است و همچنین در کل مقدار رسوبگذاری برای زبری مخروطی بیشتر از مقدار رسوبگذاری برای زبری استوانه‌ای است. با افزایش شیب، همان‌طور که در

برای زبری با ارتفاع ۴۰ میلی‌متر، روند تغییرات مقدار رسوبگذاری با شیب برعکس تمامی زبری‌های دیگر است. به‌نحوی که با افزایش شیب بستر مقدار رسوبگذاری

به دلیل رسوبگذاری در طول جریان در جریان غلیظ رسوبی و در نتیجه آن کاهش چگالی جریان، در مقایسه با جریان غلیظ نمکی، چسبندگی به کف کاهش یافته و در نتیجه آن در تمامی ارتفاع‌های زبری رفتار پرخاستگی در جریان غلیظ رسوبی مشاهده می‌شود حال آنکه این رفتار برای جریان غلیظ نمکی در ارتفاع‌های ۲۵ و ۴۰ میلی‌متر مشاهده گردید.

با بررسی مقدار رسوبگذاری در جریان غلیظ روی بستر زبر، مشخص گردید که بسته به شرایط تعامل جریان با شیب و پدیده پرخاستگی، مقدار رسوبگذاری در جریان می‌تواند با حضور بستر زبر، در مقایسه با بستر صاف، کاهش یا افزایش نشان دهد. البته کاهش و یا منفی شدن مقدار رسوبگذاری همزمان با وقوع پرخاستگی، بر اساس تغییرات سرعت و تأثیر آن بر رابطه ریاضی محاسبه‌کننده مقدار رسوبگذاری است و ناشی از افزایش غلظت در پایین‌دست نیست زیرا نتایج آزمایشگاهی نشان‌دهنده کاهش غلظت در مقطع پایین‌دست نسبت به مقطع بالادست در تمامی آزمایش‌هاست. نتایج بررسی‌ها بیان‌کننده آن است که وجود زبری باعث افزایش ۴۷ درصد برای ضخامت بدنه جریان غلیظ و ۱۶۳ درصد برای فاصله سرعت حداکثر از بستر و باعث کاهش ۲۹ درصد (به‌طور متوسط) برای سرعت حداکثر است. همچنین، در کل برای بستر صاف و زبر با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر، افزایش غلظت ورودی که باعث افزایش مومنتوم جریان می‌شود موجب افزایش سرعت حداکثر به مقدار ۱۴/۳ درصد و کاهش فاصله آن از بستر به مقدار متوسط ۱۳/۶ درصد می‌شود. با تحلیل رفتار رسوبگذاری در طول جریان مشخص می‌شود در بستر زبر با عدم وقوع پرخاستگی مقدار رسوبگذاری را به‌طور متوسط ۲۲۳ درصد نسبت به بستر صاف افزایش نشان می‌دهد.

زبری‌های قبل مشاهده شد، انتظار می‌رود که قدرت جریان افزایش و در نتیجه آن مقدار رسوبگذاری کاهش یابد. ولی در زبری با ارتفاع ۴۰ میلی‌متر، از آنجا که ارتفاع زبری زیاد است و زبری تا ناحیه جت جریان وجود دارد و از طرف دیگر با افزایش شیب ضخامت بدنه جریان کاهش می‌یابد، سطح بسیار زیادی از مقطع عبوری جریان با زبری پوشش داده می‌شود و رفتار زبری عملاً به رفتار مانع در مقابل جریان نزدیک خواهد شد و در نتیجه باعث افزایش شدید مقدار رسوبگذاری می‌شود. حال با افزایش شیب از ۱/۲۵ به ۲ در صد، انرژی جریان افزایش می‌یابد و زبری توانایی کنترل رسوبگذاری را مشابه ارتفاع شیب کمتر نخواهد داشت از این‌رو مقدار رسوبگذاری تقریباً ثابت شده است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با اجرای ۶۳ آزمایش، تأثیر زبری‌های مصنوعی با دو شکل مخروطی و استوانه‌ای بر ساختار جریان غلیظ رسوبی در آزمایشگاه بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش غلظت ورودی، حداکثر سرعت و غلظت افزایش و فاصله نقطه حداکثر سرعت از بستر کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش شیب باعث بیشتر شدن سرعت حداکثر و کمتر شدن فاصله آن از بستر می‌شود. وجود زبری باعث جابه‌جایی سرعت حداکثر به سمت فاصله دورتر از کف می‌شود و پروفیل غلظت را در نزدیکی بستر یکنواخت‌تر می‌کند. در جریان غلیظ، به دلیل شناوری بسیار زیاد جریان، چسبندگی جریان به کف کمتر است و در نتیجه آن با برخورد جریان با بستر زبر تمایل به عبور از بالای زبری دارد که در نتیجه آن پدیده پرخاستگی دیده می‌شود. شناوری بیشتر جریان غلیظ رسوبی نسبت به جریان غلیظ نمکی با کاهش چسبندگی این جریان به کف فلوم می‌شود و همچنین

مراجع

- Altinakar, M. S., Graf, W. H. and Hopfinger, E. J. 1996. Flow structure in turbidity current. *J. Hydraul. Res.* 34(5): 713-718.
- Daryaei, M., Kashefipour S. M. and Ghomeshi, M. 2014. Study of obstacle and roughness impacts on controlling sedimentary density current. *J. Water. Soil. Sci.* 24(4): 1-9. (in Persian)
- Ellison, T. H. and Turner, J. S. 1959. Turbulent entrainments in stratified flows. *J. Fluid Mech.* 6(3): 423-448.
- Ezz, H., Cantelli, A. and Imran, J. 2013. Experimental modeling of depositional turbidity currents in a sinuous submarine channel. *Sediment. Geol.* 290, 175-187.
- Garcia, M. H. and Parker, G. 1993. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. *J. Geophys. Res.* 98(C3): 4793-4807.
- Imran, J., Kassem, A. and Khan, S. M. 2004. Three-dimensional modeling of density current. I. Flow in straight confined and unconfined channels. *J. Hydraul. Res.* 42(6): 578-590.
- Kubo, Y. 2004. Experimental and numerical study of topographic effects on deposition from two-dimensional, particle-driven density currents. *Sediment. Geol.* 164: 311-326.
- Linden, P. F. and Simpson, J. E. 1986. Gravity-driven flows in a turbulent fluid. *J. Fluid Mech.* 172: 481-497.
- Nogueira, H. I. S., Adduce, C., Alves, E. and Franca, M. J. 2013. Analysis of lock-exchange gravity currents over smooth and rough beds. *J. Hydraul. Res.* 51(4): 417-431.
- Nourmohammadi, Z., Afshin, H. and Firoozabadi, B. 2011. Experimental observation of the flow structure of turbidity currents. *J. Hydraul. Res.* 40(2): 168-177.
- Oehy, C. D., Cesar, G. D. and Schleiss, A. J. 2010. Effect of inclined jet screen on turbidity current. *J. Hydraul. Res.* 48(1): 81-90.
- Oshaghi, M. R., Afshin, H. and Firoozabadi, B. 2013. Experimental investigation of effect of obstacles on the behavior of the density currents. *Can. J. Civil Eng.* 40, 343-352.
- Parker, G., Garcia M., Fukushima, Y. and Yu, W. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *J. Hydraul. Res.* 25(1): 123-147.
- Roscoe, R. 1952. The viscosity of suspensions of rigid spheres. *Brit. J. Appl. Phys.* 3(8): 267-269.
- Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun, T., Garcia, M. H. and Parker, G. 2010. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile Bed. *J. Hydraul. Eng.* 136(7): 413-433.
- Sheikhi-Nejad, B. and Ghomeshi, M. 2014. Investigate of effect of cylinder roughness on maximum velocity of density current body. *J. Irrig. Sci. Eng.* 37(4): 97-107. (in Persian)
- Turner, J. S. 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press. U. K.
- Varjavand, P., Ghomeshi, M., Hosseinzadeh-Dalir, A. and Farsadzadeh, D. 2014. Experimental study on the effects of artificial Bed roughness on hydraulic parameters of saline density currents. *J. Irrig. Sci. Eng.* 37(3): 95-105. (in Persian)



Experimental Investigation of lifting phenomenon in Sediment-Laden Density Currents

P. Varjavand^{*}, M. Ghomeshi, A. Hosseinzadeh-Dalir and D. Farsadizadeh

^{*}Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Ahwaz, Iran. Email: pvarjavand@yahoo.com

Received: 28 June 2016, Accepted: 21 November 2016

Density currents are formed when gravity acts upon a density difference between two different fluids. These currents are the most important transport mechanisms and deposition of noncohesive sediments in narrow and deep reservoirs. In this research, 63 experiments were performed to investigate the effects of two shapes and three heights of artificial roughness on sediment-laden density currents. Velocity and concentration profiles were measured in the body of current. Results showed that presence of roughness causes 47% increasing in the density current body thickness, 29% decreasing in the maximum value of velocity and 163% increasing in the distance of peak value of velocity point from the bed in the normal velocity profile. Also for different roughness and with special hydraulic conditions, Lifting phenomenon has been observed, which is affected by densimetric Froude number, relative roughness and blockage factors. This phenomenon effects on the velocity and causes 5-25% increasing in the maximum value of velocity the stream line of current. Sedimentation rate in the current over rough bed is approximately 223% more than smooth bed if lifting phenomenon has not be occurred.

Keywords: Artificial Rough Bed, Lifting Phenomenon, Sediment-Laden Density Current, Sedimentation Rate, Velocity Profile