

واکنش جریان غلیظ به بستر با تغییر ناگهانی زبری

پیمان ورجاوند^{۱*}، علی حسین زاده دلیر^۲، مهدی قمشی^۳ و داود فرسادی زاده^۴

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۰۶

^۱ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی - مهندسی آب، دانشگاه تبریز

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

^۳ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Email: pvarjavand@yahoo.com

چکیده

واکنش جریان غلیظ به بستر با تغییر ناگهانی زبری بدلیل شناوری، جریان مشابه با جریان‌های آب در کانال‌های روباز نمی‌باشد. در تحقیق حاضر رفتار جریان‌های غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر با تغییر ناگهانی زبری برای دو شکل زبری استوانه‌ای و مخروطی، بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با برداشت پروفیل سرعت و غلظت در مقاطع مختلف بدنه جریان، زبری موثر بستر، تنش برشی کف و ضریب کشش سطحی تعیین شد. نتایج نشان داد که شناوری تاثیر زیادی بر روی زبری موثر و تنش برشی کف دارد بطوری که با تغییر ناگهانی زبری بستر، زبری موثر و تنش برشی کف بصورت تدریجی تغییر می‌کند، بویژه در آزمایش‌هایی که پدیده برخاستگی مشاهده گردید. استفاده از قانون لگاریتمی سرعت در ناحیه جدار نشان داد که فاصله‌ای از کف که این قانون در آن بیشترین دقت را دارا می‌باشد برای جریان غلیظ نمکی و رسوبی به ترتیب ۹۰٪ و ۷۵٪ فاصله سرعت حداکثر از کف است.

واژه های کلیدی: پدیده برخاستگی، پروفیل غلظت، تنش برشی کف، جریان غلیظ، زبری موثر

Response of Density Currents to Sudden Change of Bed Roughness

P Varjavand^{1*}, A Hosseinzadeh Dalir², M Ghomeshi³ and D Farsadizadeh⁴

Received: 9 February 2013 Accepted: 28 September 2013

¹- Ph.D. Student, Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

²- Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

³- Prof., Faculty of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahwaz, Iran

⁴- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author Email: pvarjavand@yahoo.com

Abstract

Because of buoyancy effect, the response of density currents to sudden change of bed roughness is different from that at the water flows in open-channels. In this study, hydraulic behavior of sediment-laden and saline density currents on the bed with conic and cylindrical suddenly changing roughness was investigated experimentally. Velocity and concentration profiles were measured for different flow sections and bed effective roughness, and then bed shear stress and drag coefficient were calculated. Results showed that buoyancy had significant effect on the bed shear stress and effective roughness, as with the sudden change in the bed roughness these parameters changed gradually, especially in the presence of lifting phenomenon. According to the results, logarithmic velocity law had the highest accuracy in the intervals from the bed, located at the 90% and 75% of the maximum velocity distance from the bed for saline and sediment-laden density currents, respectively.

Keywords: Bed shear stress, Concentration profile, Density current, Effective roughness, Lifting phenomenon

مقدمه

کف دریا و مخازن باشند (آل‌وین ۱۹۸۶). محققین زیادی بر روی رفتار جریان‌های غلیظ در شرایط مختلف مطالعه نموده‌اند. ترابی و همکاران (۱۳۸۶) اثرات گذر جریان غلیظ و شیب بستر در میزان اختلاط در یک مقطع واگرا را توسط مدل فیزیکی و یک مدل ریاضی بصورت سه-بعدی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. مشاهدات بیانگر افزایش سرعت بی‌بعد جبهه جریان در مقطع واگرا می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که

سیال لایه‌ای بدلیل اختلاف دما، مواد محلول و یا ذرات نامحلول در سیال بوجود آمده و باعث ایجاد گرادیان چگالی نسبت به عمق می‌شود. گرادیان چگالی افقی نیروی رانش ایجاد کرده و سیال سنگین‌تر را به حرکت در می‌آورد. چنین جریان‌هایی در مصب رودخانه‌ها، مخازن سدها، کف دریا و اقیانوس‌ها و یا در اتمسفر دیده می‌شود. این جریان‌ها، جریان چگال نامیده می‌شوند و می‌توانند رسوب‌گذار و یا شوینده بستر در

راستای محور مرکزی کانال است، میزان رسوبگذاری در واحد سطح در خط مرکزی کانال بیشتر می‌باشد. در حالت V شکل، جریان با پیشروی در طول نازک‌تر می‌شود ولی در حالت معمولی جریان با پیشروی در طول گسترش می‌یابد.

بویان و همکاران (۲۰۱۰) تاثیر جریان غلیظ را بر روی تشکیل توپوگرافی بستر بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای شبیه‌سازی از رسوب درشت دانه که بصورت آزاد شدن ناگهانی است، استفاده نمودند. آنها توسعه طولی و ارتفاعی توپوگرافی بستر را برای سه حالت جریان مورد تحلیل قرار دادند. اسلام و عمران (۲۰۱۰) به بررسی آزمایشگاهی پروفیل توزیع سرعت و غلظت و همچنین تلاطم در بدنه و پیشانی جریان غلیظ نمکی و رسوبی پیوسته بصورت آزمایشگاهی پرداختند. جریان از روی یک شیب به بستر افقی می‌رسید. پروفیل‌های تنش رینولدز و انرژی جنبشی تلاطم شباهت زیادی را در منطقه نزدیک دیواره نشان دادند. نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) ساختار جریان غلیظ رها شده بر روی بستر شیب‌دار را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی این‌طور نتیجه شد که اگر جریان غلیظ در یک کانال حرکت کند ممکن است که بدلیل پرش هیدرولیکی ضخامت آن افزایش یابد. این پدیده در حالت‌های خاص جریان ورودی اتفاق می‌افتد و بر روی ساختار جریان که شامل سرعت، عمق جریان و تنش برشی بستر می‌باشد، تاثیر محسوس می‌گذارد. آنتونیا و لاکستون (۱۹۷۱) به بررسی رفتار هیدرولیکی آب در عبور از تغییر ناگهانی زبری بستر صاف به زیر پرداختند. آنها به منظور به حداقل رساندن تاثیر تغییر زبری بر روی توزیع فشار، تاج زبری را در بستر زیر هم‌تراز بستر صاف بالادست قرار دادند. همچنین در تحقیق دیگر، چن و چو (۲۰۰۳) به بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تلاطم بر روی بستر با تغییر ناگهانی زبری پرداختند. آنها از قانون لگاریتمی سرعت برای محاسبه سرعت برشی کف استفاده نمودند و از رابطه $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ به محاسبه تنش برشی پرداختند که در آن

میزان اختلاط در بدنه جریان غلیظ در مقطع و اگر نسبت به مقطع ثابت با شدت بیشتری انجام می‌گیرد.

فانگ و استفان (۲۰۰۰) مدل انتگرالی برای دبی جریان غلیظ که به یک بستر افقی و یا شیب‌دار وارد می‌شود را باتمرکز بر روی رقیق شدگی جریان ارائه دادند. فرم انتگرالی معادلات مومنتوم و پیوستگی حل شدند. مومنتوم در طول جریان بدلیل تاثیر اصطکاک کاهش می‌یابد و نرخ ورود آب پیرامون به درون جریان غلیظ زیاد می‌شود. تاثیر دیواره‌های جانبی و سیال پیرامون خیلی عمیق کاملاً مشهود می‌باشد. دالی‌مور و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی جریان غلیظ نمکی ورودی از اقیانوس آرام به دریاچه اوگاوارا^۱ در کشور ژاپن پرداختند. آنها به منظور بررسی تنش برشی کف از چهار روش تخمین تنش رینولدز^۲، نرخ تولید و استهلاک انرژی جنبشی تلاطم^۳، مدل طول اختلاط^۴ و سرعت متوسط جریان^۵ استفاده نمودند. آنها از معادله $u = \left(\frac{u_*}{k}\right) \ln\left(\frac{z}{k_s}\right)$ نمودند. که در آن u سرعت متوسط زمانی در فاصله Z از کف، k ثابت وون-کارمن و k_s ارتفاع موثر زبری می‌باشد. او‌هی و اشلیس (۲۰۰۷) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر موانع نفوذپذیر و غیرقابل نفوذ بر روی جریان غلیظ پرداخته و نتایج را با شبیه‌سازی عددی مقایسه کردند. توزیع سرعت و نحوه رسوب‌گذاری در مدل فیزیکی بررسی شد. بهترین حالت برای موانع نفوذپذیر با تخلخل بین ۳۶ تا ۴۱ درصد و اندازه شبکه با قطر هیدرولیکی ۰/۵ تا ۱/۲ میلی متر برآورد شد. موناقان و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی تاثیر مقطع V شکل بر روی جریان غلیظ بصورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. جریان غلیظ بصورت رها شدن ناگهانی ایجاد شد. الگوی حرکت و رسوب‌گذاری بسیار متفاوت با حالت جریان بر روی مقطع مستطیلی است. جبهه جریان از نمای بالا تقریباً بصورت سهموی می‌باشد که محور مرکزی آن هم -

¹ Ogawara

² Reynolds stress estimate

³ Production of turbulent kinetic energy versus its dissipation rate

⁴ Mixing length method

⁵ Mean flow velocity

چپو ۲۰۰۳) مقایسه نمود که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های تحقیق حاضر در آزمایشگاه مدل-های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلوم مورد استفاده دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۸، ۰/۳۵ و ۰/۷۰ متر می‌باشد و با دارا بودن مخزن اختلاط و هد تانک امکان ایجاد جریان‌های غلیظ نمکی و رسوبی را با حداکثر شیب ۳٪ بصورت ره‌اشدن ناگهانی^۳ دارا می‌باشد. به منظور ایجاد جریان غلیظ نمکی و رسوبی از نمک پودری با چگالی ۱۸۲۵/۳۶ گرم در لیتر و میکرو سیلیس به عنوان مواد رسوب غیر چسبنده با چگالی ۲۶۵۰ گرم در لیتر و قطر متوسط ۱۳/۵۶ میکرومتر استفاده گردید. اندازه‌گیری پروفیل سرعت بوسیله دستگاه *DOP2000* انجام گردید و پروفیل غلظت با استفاده از سیفون نمونه‌گیری با لوله‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر و فاصله قائم ۱۵ میلی‌متر برداشت شد. غلظت وزنی نمونه‌های رسوبی با روش خشک نمودن نمونه اندازه‌گیری شد و برای نمونه‌های نمکی از دستگاه *EC* سنج استفاده گردید. دبی جریان غلیظ با استفاده از یک دبی سنج الکترومغناطیس با دقت ± 0.05 لیتربرثانه اندازه‌گیری شد. به منظور دسترسی بهتر و سریعتر به شرایط یکنواخت در بدنه جریان غلیظ، بازشدگی دریچه برای جریان نمکی ۵ و برای جریان رسوبی ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور حصول اطمینان از قابل صرفنظر بودن تاثیر دما در آزمایش‌ها، دمای سیال غلیظ و سیال پیرامون کنترل گردید بطوری‌که حداکثر اختلاف دمای آنها ± 0.5 درجه سلسیوس باشد. آرایش زبری‌ها بصورت زیگزاگ بوده و زبری‌ها دارای دو شکل استوانه-ای و مخروطی مطابق شکل ۱ می‌باشند، فاصله طولی آنها ۷ و فاصله عرضی ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در کل دو سری آزمایش تعریف و انجام شد.

می‌باشد (ترم اول این رابطه از $\tau = -\rho u'v' + \mu \frac{du}{dy}$ بخش سمت راست تنش متلاطم و ترم دوم تنش ورقه‌ای می‌باشد)، که در آن τ تنش برشی کف و ρ چگالی می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در تحلیل جریان‌ها ضریب کشش سطحی (C_D) می‌باشد. این ضریب در جریان‌های چگال که دارای شناوری بالایی هستند رفتار متفاوتی با جریان‌های معمولی دارد. شلختینگ (۱۹۷۹) رابطه ۱ را برای محاسبه ضریب کشش سطحی در شرایطی که یک سیال با سرعت نزدیک شونده U_∞ به یک صفحه نزدیک شود، ارائه نمود. مقدار ضریب کشش سطحی در فاصله l از ابتدای صفحه بقرار زیر است:

$$C_D = 2 \frac{\delta_{2\infty}}{l} \quad [1]$$

که در آن $\delta_{2\infty}$ ضخامت مومنتوم^۱ است که از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$\delta_{2\infty} = \frac{1}{U_\infty^2} \int_{y=-\infty}^{+\infty} u(U_\infty - u) dy \quad [2]$$

که در آن u سرعت در فاصله y از صفحه است. از طرف دیگر ترنر (۱۹۷۳) رابطه ۳ را با نوشتن قانون بقای مومنتوم در یک سطح کنترل برای جریان‌های لایه-ای بدست آورد.

$$\frac{dh}{dx} (1 - F_{rd}^2) = (\theta - C_D F_{rd}^2) \quad [3]$$

که در آن h ضخامت جریان، x بازه طولی سطح کنترل، θ زاویه شیب بستر و F_{rd} عدد فرود چگال^۲ می‌باشد.

هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر تغییر ناگهانی زبری بستر بر روی جریان غلیظ نمکی و رسوبی و تاثیر شناوری بر روی پارامترهایی مانند زبری موثر و تنش برشی بستر می‌باشد. از آنجایی که طبق بررسی منابع انجام شده تحقیق در زمینه مشابه تا بحال انجام نشده است، رفتار دو فازی جریان غلیظ را می‌توان بصورت کیفی با جریان تک فازی در کانال (تحقیق چن و

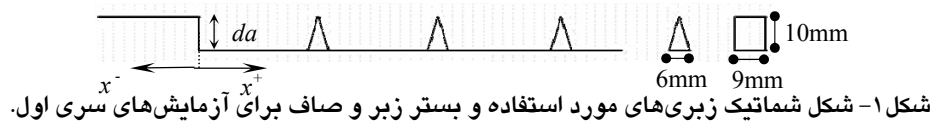
³ Sudden exchange

¹ Momentum thickness

² Densimetric Froude number

گرفته شد. آزمایش‌ها برای سه غلظت مختلف و برای دو حالت $da=0$ و $da=10$ میلی‌متر (da فاصله قائم یا اختلاف تراز) بستر زبر از بستر صاف بالادست است (شکل ۱) انجام گردید. پروفیل سرعت و غلظت در ۵ مقطع به فاصله -25 ، 30 ، 70 ، 125 و 180 سانتی‌متر نسبت به ابتدای بستر زبر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها بصورت مجزا و به دو صورت آزمایش نمکی و رسوبی انجام شده‌اند.

سری اول- در این آزمایش‌ها هدف بررسی تاثیر تغییر ناگهانی زبری بستر بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان غلیظ نمکی و رسوبی برای دو شکل زبری می‌باشد. بدین منظور تعداد ۲۴ آزمایش مطابق جدول ۱ انجام شد که در آنها شیب ثابت و برابر $1/25$ می‌باشد. شرایط تغییر زبری بستر در شکل ۱ آورده شده است. فاصله شروع بستر زبر از دریچه بالادست 150 سانتی‌متر و طول بستر زبر 200 سانتی‌متر در نظر

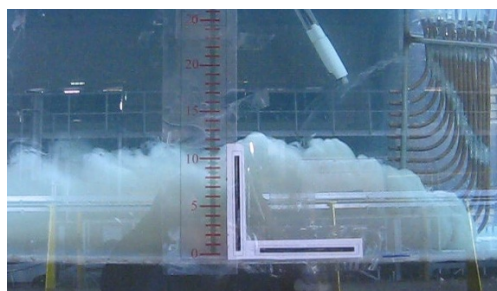


جدول ۱- خلاصه مشخصات آزمایش‌های سری اول.

تعداد آزمایش	شکل زبری	da (mm)	نوع آزمایش	عدد رینولدز $\times 10^3$	غلظت پشت دریچه (g/L)	دبی (L/s)
۳	مخروطی	۰	نمکی	۲/۳-۳/۹	۱۰/۵-۲۱/۹	۰/۹۹۵-۱/۰۰۸
۳	مخروطی	۱۰	نمکی	۲/۶-۴/۱	۱۱/۶-۲۱/۵	۰/۸۹۰-۰/۹۸۵
۳	مخروطی	۰	رسوبی	۳/۷-۴/۹	۸/۰-۱۳/۸	۰/۸۶۰-۰/۹۳۵
۳	مخروطی	۱۰	رسوبی	۳/۶-۵/۰	۷/۰-۱۳/۸	۰/۹۹۲-۰/۹۹۸
۳	استوانه‌ای	۰	نمکی	۳/۷-۴/۶	۱۰/۸-۲۲/۷	۱/۰۰۴-۱/۰۱۸
۳	استوانه‌ای	۱۰	نمکی	۳/۰-۴/۳	۱۱/۲-۲۰/۳	۰/۹۵۰-۱/۰۱۰
۳	استوانه‌ای	۰	رسوبی	۳/۵-۵/۲	۶/۲-۱۳/۴	۰/۹۱۲-۱/۰۱۰
۳	استوانه‌ای	۱۰	رسوبی	۳/۴-۴/۷	۶/۸-۱۳/۸	۰/۹۵۶-۱/۰۰۳

بستر زبر برخلاف آزمایش‌های سری اول بلافاصله پس از دریچه بالادست بطول 200 سانتی‌متر ایجاد گردید. پروفیل‌های سرعت در فواصل 50 ، 100 ، 140 و 180 سانتی‌متر از دریچه (ابتدای بستر زبر) اندازه‌گیری شد. آزمایش‌های سری دوم برای زبری استوانه‌ای به ارتفاع 10 میلی‌متر و همان آرایش سری اول انجام شد و در آنها $da=10$ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۲ عکس‌هایی از بدنه و پیشانی جریان رسوبی را نشان می‌دهد.

سری دوم- این آزمایش‌ها به منظور بررسی ضریب کشش سطحی بستر انجام شده‌اند. در این آزمایش‌ها فقط از جریان غلیظ نمکی استفاده گردیده و شامل ۱۲ آزمایش بودند. آزمایش‌ها دارای چهار غلظت ($25/6$ - $10/2$ گرم در لیتر) و سه شیب بستر ($2/0$ - $0/5$ درصد) بوده و از آنجایی که هدف مقایسه ضریب کشش سطحی محاسباتی از رابطه ۱ با نتیجه رابطه ۲ می‌باشد و در رابطه ۲ سرعت بینهایت (U_{∞}) همان سرعت نزدیک شونده به سطح صلب است.



ب) پیشانی جریان



الف) بدنه جریان

شکل ۲- بدنه و پیشانی جریان غلیظ رسوبی بر روی بستر صاف.

دینامیک سیال پیرامون و C_{sw} غلظت وزنی سیال غلیظ می‌باشد (روسکو ۱۹۵۲).

نتایج و بحث

پروفیل سرعت

به منظور مقایسه پروفیل سرعت در تحقیق حاضر با نتایج محققین دیگر از رابطه ۴ (سرعت در منطقه دیواره) و رابطه ۵ (سرعت در منطقه اختلاط) استفاده گردید (نورمحمدی و همکاران ۲۰۱۱).

$$\frac{u(z)}{u_m} = \left(\frac{z}{h_m} \right)^{1/\alpha_v} \quad [4]$$

$$\frac{u(z)}{u_m} = \exp \left[-\beta_v \left(\frac{z-h_m}{h-h_m} \right)^{\gamma_v} \right] \quad [5]$$

که در آنها α_v ، β_v و γ_v ضرایب معادله می‌باشند. جدول ۲ ضرایب این معادله را برای تحقیق حاضر و آزمایش‌های نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) نشان می‌دهد.

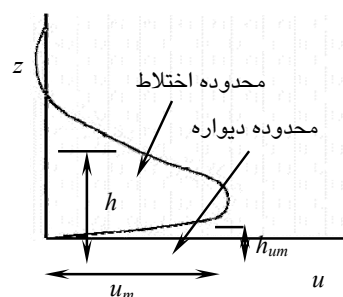
جدول ۲- ضرایب معادلات سرعت.

نوع بستر	α_v	β_v	γ_v
نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) بستر صاف جریان رسوبی	۵/۸	۰/۶	۲/۷
بستر صاف جریان نمکی	۵/۸۲۱	۱/۴۳۲	۱/۶۶۷
بستر صاف جریان رسوبی	۵/۸۱۳	۱/۱۴۶	۱/۸۲۷
بستر زیر جریان نمکی	۲/۸۴۲	۱/۵۱۹	۱/۶۷۷
بستر زیر جریان رسوبی	۲/۴۰۶	۱/۴۴۵	۱/۴۴۸

تحقیق حاضر

پارامترهای مورد استفاده در تحقیق حاضر به

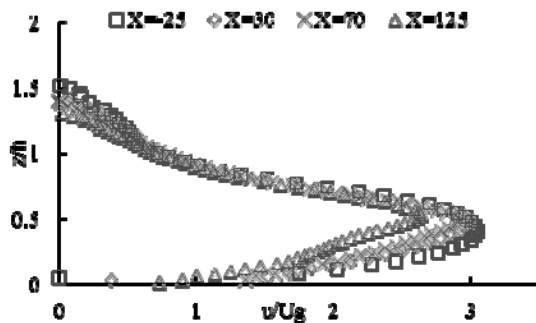
قرار شکل ۳ می‌باشند:



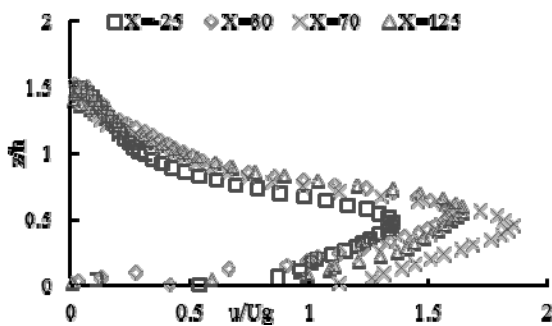
شکل ۳- پارامترهای مورد استفاده.

پارامترهای فوق عبارتند از: u سرعت متوسط زمانی در فاصله z از کف، u_m و h_{um} سرعت حداکثر و فاصله آن تا کف و h ضخامت بدنه جریان با استفاده از رابطه ترنر (ترنر ۱۹۷۳). به منظور محاسبه لزجت دینامیک سیال غلیظ برای استخراج عدد رینولدز جریان از رابطه $\mu = \mu_w (1 - 1.35 C_{sw})^{-2.5}$ استفاده شده است، که در آن μ لزجت دینامیک سیال غلیظ، μ_w لزجت

برخلاف انتظار سرعت حداکثر افزایش یافته و فاصله آن از کف افزایش می‌یابد. این روند تا فاصله ۷۰ سانتی‌متر از ابتدای بستر زبر ادامه دارد و در فاصله ۱۲۵ سانتی‌متر سرعت حداکثر بشدت کاهش می‌یابد. این رفتار بدلیل شناوری بالای جریان غلیظ و کوچک بودن نیروی ثقل کاهش یافته است که با برخورد جریان با یک مانع در مقابل آن در سیال پیرامون شناور شده و از روی مانع (بستر زبر) عبور می‌کند. این روند تا تاثیر دوباره زبری کف و افزایش زبری موثر ادامه دارد. این رفتار جریان غلیظ بر روی پارامترهای هیدرولیکی مانند تنش برشی بستر و یا زبری موثر بشدت تاثیر گذاشته و رفتار جریان را با جریان معمولی بر روی بستر زبر کاملا متمایز می‌کند. این پدیده در تحقیق حاضر به عنوان پدیده برخاستگی^۱ نامگذاری شده است.



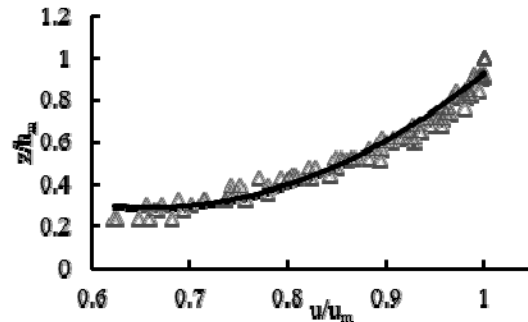
الف: زبری استوانه‌ای، دبی ۰/۹۵۶ لیتر بر ثانیه، غلظت پشت دریچه ۶/۸ گرم در لیتر، $da=10$.



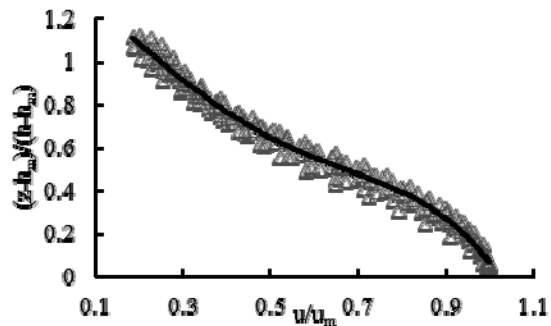
ب: زبری مخروطی، دبی ۰/۹۹۵ لیتر بر ثانیه، غلظت پشت دریچه ۲۱/۹ گرم در لیتر، $da=0$.

شکل ۵- تغییرات طولی پروفیل سرعت در جهت جریان.

شکل ۴ مقادیر بدون بعد سرعت را (طبق رابطه- های ۴ و ۵) برای جریان غلیظ رسوبی بر روی بستر صاف نشان می‌دهد.



الف) منطقه دیواره



ب) منطقه اختلاط

شکل ۴- مقادیر بدون بعد سرعت برای جریان غلیظ رسوبی بر روی بستر صاف.

شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات طولی پروفیل سرعت در جهت جریان را نشان می‌دهد (U_g بیانگر سرعت متوسط سیال غلیظ عبوری از زیر دریچه بالادست و u_m سرعت حداکثر مقطع بدنه جریان غلیظ می‌باشد). پارامتر x بیانگر فاصله از ابتدای بستر زبر می‌باشد. شکل ۵ الف پروفیل‌های سرعت را برای آزمایشی نشان می‌دهد که زبری بستراز نوع استوانه‌ای بوده و $da=10$ می‌باشد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با حرکت در طول جریان غلیظ رسوبی مقدار سرعت حداکثر کاهش یافته و فاصله آن از کف افزایش می‌یابد که نشان دهنده توسعه یافتگی جریان می‌باشد. شکل ۵ ب بیانگر حالتی است که جریان غلیظ نمکی از روی بستر صاف وارد بستر زبر مخروطی شده که در این حالت $da=0$ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد با حرکت در طول بستر زبر

¹ Lifting phenomena

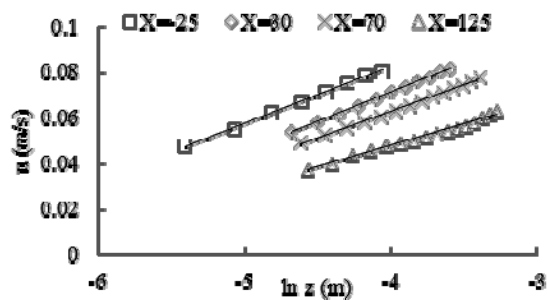
پروفیل غلظت

شکل ۶ تغییرات پروفیل غلظت در طول جریان برای دو مقطع به فواصل ۲۵- و ۱۲۵ سانتی‌متر نسبت به شروع بستر زیر را نشان می‌دهد (c_a نشان‌دهنده غلظت سیال پیرامون و c بیانگر غلظت در فاصله z از کف است). در شکل ۶ الف می‌توان مشاهده نمود که با ورود جریان غلیظ نمکی از بستر صاف به بستر زبر، ضخامت بدنه جریان افزایش یافته و همچنین غلظت به مقدار غیر محسوس کاهش یافته است. در شکل ۶ ب می‌توان مشاهده نمود که جریان غلیظ رسوبی پس از پیمودن مسافت بر روی بستر زبر، بدلیل رسوب‌گذاری و ورود سیال پیرامون به درون بدنه جریان، از غلظت آن کاهش یافته و ضخامت بدنه نیز افزایش یافته است. هردو پروفیل غلظت مربوط به آزمایش‌هایی است که در آنها برخاستگی رخ داده است، مشاهده می‌گردد که این پدیده تاثیر محسوس بر روی شکل پروفیل غلظت نداشته است.

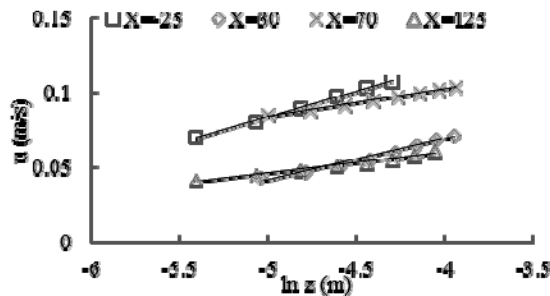
عملیات ریاضی بر روی رابطه استفاده شده توسط دالیمور و همکاران (۲۰۰۱) به رابطه ۶ می‌رسیم.

$$u = A \ln z + B, \quad A = \frac{u_*}{k}, \quad B = -\frac{u_*}{k} \ln k_s \quad [۶]$$

با کاربرد رگرسیون خطی و استخراج ضرایب رابطه ۶ می‌توان مقادیر سرعت برشی و زبری موثر را تعیین نمود. از آنجایی‌که طبق بررسی‌های انجام شده در منابع موجود جریان غلیظ اشاره نشده است که در چه فاصله‌ای از کف می‌توان از قانون لگاریتمی سرعت استفاده نمود، این رگرسیون از بستر تا فاصله‌ای از آن انجام گردید که رابطه ۶ کاملاً خطی بوده و بهترین ضریب تبیین (R^2) حاصل گردد. شکل ۷ نتایج این رابطه را برای دو نمونه از آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

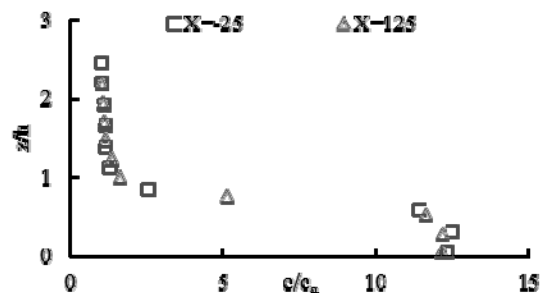


الف: غلظت پشت دریچه: ۶/۸ گرم در لیتر، دبی: ۰/۹۵۶ لیتر بر ثانیه.

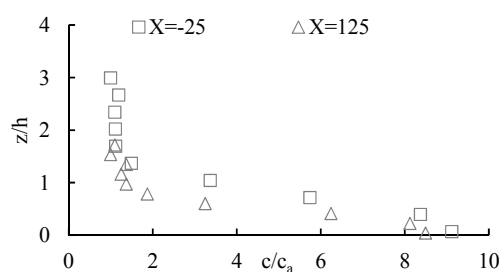


غلظت پشت دریچه: ۱۳/۴ گرم در لیتر، دبی: ۱/۰۱۰ لیتر بر ثانیه.

شکل ۷- نتایج رابطه ۶ برای دو نمونه از آزمایش‌ها (جریان غلیظ رسوبی بر روی بستر زبری استوانه‌ای).



الف) جریان غلیظ نمکی.



ب) جریان غلیظ رسوبی

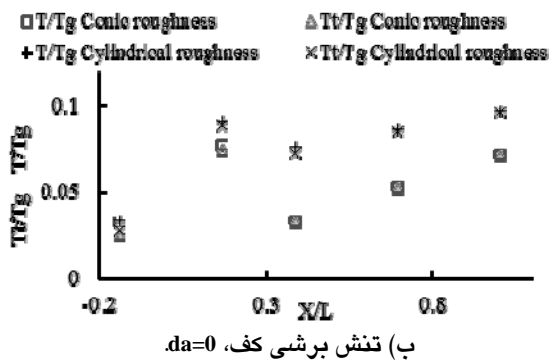
شکل ۸- تغییرات پروفیل غلظت در طول بدنه جریان برای زبری استوانه‌ای با $da=0$

تنش برشی کف و زبری موثر

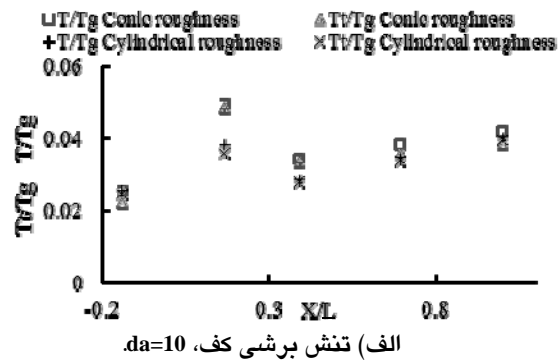
به منظور بررسی تنش برشی کف و زبری موثر، از روش سرعت متوسط جریان استفاده گردید. با انجام

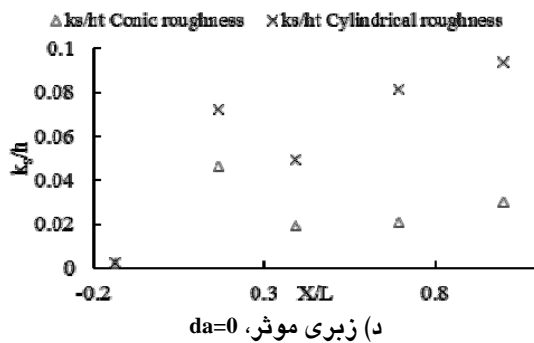
با جمع‌بندی نمودارهای رگرسیونی، مشخص گردید که در آزمایش‌های انجام شده، قانون لگاریتمی سرعت در بدنه برای جریان غلیظ رسوبی تا فاصله

بستر زبر تنش ورقه‌ای تقریباً حذف می‌گردد. در مورد حالت $da=10$ (شکل ۸ الف) این افزایش ناگهانی تنش در بدو ورود به بستر زبر ناشی از پایین افتادگی بستر می‌باشد (شکل ۱) و پس از آن دوباره جریان به حالت عادی خود بازگشته و تنش شروع به افزایش می‌کند، در این حالت تنش در بستر زبر استوانه‌ای مقدار بزرگتری نسبت به زبری مخروطی دارد که ناشی از شکل زبری می‌باشد. ولی در حالتی که $da=0$ می‌باشد (شکل ۸ ب) دلیل برخورد بدنه جریان غلیظ با زبری‌ها، تنش ابتدا بشدت افزایش یافته و پس از آن دلیل وقوع پدیده برخاستگی و عبور بخش عمده‌ای از جریان از روی زبری‌ها، کاهش شدید یافته و سپس دوباره افزایش می‌یابد. از آنجایی‌که در این حالت برخاستگی اتفاق افتاده است نرخ رشد این تنش نسبت به حالت $da=10$ کمتر می‌باشد. در فاصله $X/L=1$ در شکل ۸ ب مشاهده می‌گردد، برای زبری‌های مخروطی، در اثر برخاستگی و کاهش تلاطم در نزدیکی بستر سهم تنش ورقه‌ای در تنش کل نسبت به مقاطع قبلی افزایش یافته است. در مقایسه دو شکل زبری در دو حالت $da=0$ و $da=10$ مشاهده می‌گردد که دلیل تشدید پدیده برخاستگی در زبری‌های استوانه‌ای، مقدار تنش آن کمتر از تنش زبری‌های مخروطی می‌باشد ولی این روند در حالتی که پدیده برخاستگی اتفاق نیافتاده است برعکس می‌باشد.

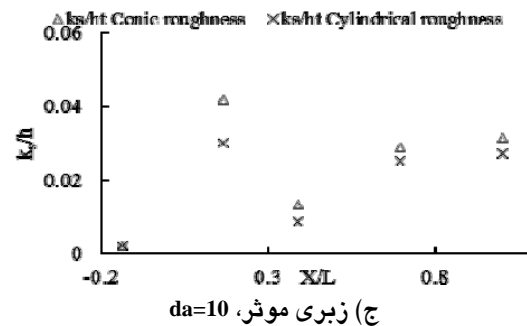


از $z/h_{um}=0.75$ و برای جریان غلیظ نمکی $z/h_{um}=0.90$ کف بهترین مقدار ضریب تبیین و برازش خطی را دارا می‌باشد. شکل ۸ نشان‌دهنده تنش برشی کف و زبری موثر برای جریان غلیظ نمکی در طول جریان است. مقادیر تنش با استفاده از سرعت سیال زیر دریچه ورودی (U_g) و چگالی آن در پشت دریچه (ρ_g) با استفاده از رابطه $T_g = \rho_g U_g^2$ بدون بعد شده و طول جریان با استفاده از طول بخشی از بستر زبر که در آن اندازه‌گیری انجام شده (L) و فاصله هر مقطع از ابتدای بستر زبر (X) بدون بعد شده است. زبری موثر بصورت زبری نسبی نسبت به ضخامت جریان (h) بیان شده است. همچنین در این شکل محور تنش به دو بخش تنش کل (T) و تنش تلاطم (T_i) تقسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد بر روی بستر صاف ($X/L=-0.139$) مقادیر تنش کل برای تمامی حالت‌ها تقریباً ثابت است که این روند مشابه نتایج آزمایش‌های نورمحمدی و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد. پس از ورود جریان از بستر صاف به بستر زبر، ابتدا مقدار تنش کل افزایش ناگهانی یافته و سپس کاهش شدید داشته و پس از آن با نرخ رشد بسیار کمتر افزایش می‌یابد و همچنین مشاهده می‌گردد بر روی بستر صاف در مقایسه با بستر زبر مقدار تنش ورقه‌ای (حاصل تفاضل تنش کل و تنش تلاطم) سهم بیشتری در تنش کل دارد و با ورود جریان به





دا=0، زبری موثر، (د)

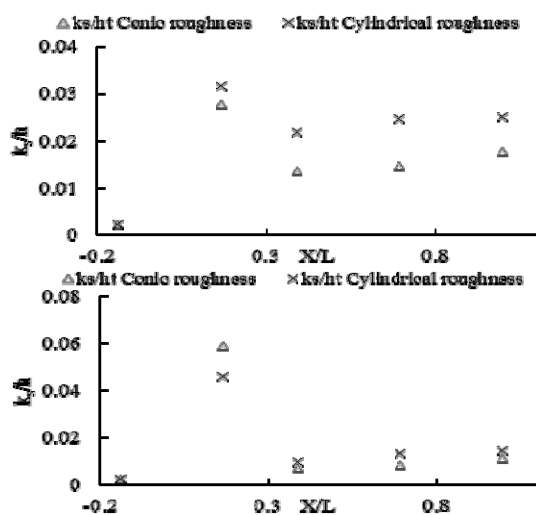


دا=10، زبری موثر، (ج)

شکل ۸- تغییرات تنش برشی و زبری موثر برای جریان غلیظ نمکی.

آنجایی که پدیده برخاستگی در زبری‌های استوانه‌ای تشدید شده است، مقدار زبری موثر آن نسبت به زبری مخروطی کمتر است. در کل در شرایطی که پدیده برخاستگی اتفاق افتاده است مقدار تنش و زبری موثر کمتر مشاهده شده است. شکل ۹ تغییرات تنش برشی و زبری موثر را در جریان غلیظ رسوبی نشان می‌دهد، رفتار جریان رسوبی مشابه جریان نمکی بوده ولی با این تفاوت که بدلیل شناوری بیشتر و مقدار g' کمتر در مقایسه با جریان غلیظ نمکی مقادیر زبری موثر کمتر شده و پدیده برخاستگی و تاثیر آن بر روی روند پارامترهای بستر تشدید شده است.

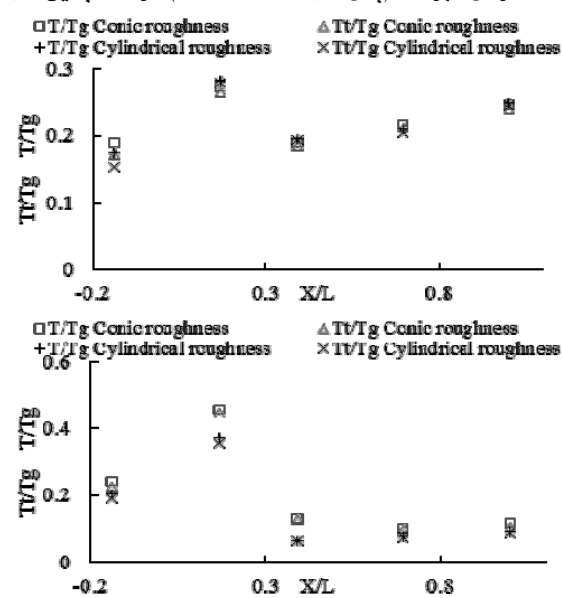
شکل‌های ۸ ج و د مقادیر زبری موثر را برای حالت‌های $da=0$ و $da=10$ نشان می‌دهند. در شکل ۸ ج بدلیل پایین افتادن ناگهانی بستر، زبری موثر بصورت مجازی بطور ناگهانی افزایش یافته و سپس رو به کاهش گذاشته و با حرکت در طول جریان تاثیر زبری‌ها بیشتر شده و مقدار زبری موثر افزایش یافته است. در این حالت نرخ رشد و مقدار زبری موثر در بستر زبر استوانه‌ای از مخروطی بیشتر می‌باشد که تاثیر شکل زبری را بیان می‌دارد. این روند در شکل ۸ د بدلیل وقوع پدیده برخاستگی اتفاق افتاده است با این تفاوت که پس از پایین افتادن مقدار زبری نسبی نرخ رشد آن بسیار نامحسوس بوده (پس از $X/L=0.694$) و همچنین از



دا=10، زبری موثر، (د)

زبری موثر، $da=0$.

شکل ۹- تغییرات تنش برشی و زبری موثر برای جریان غلیظ رسوب.

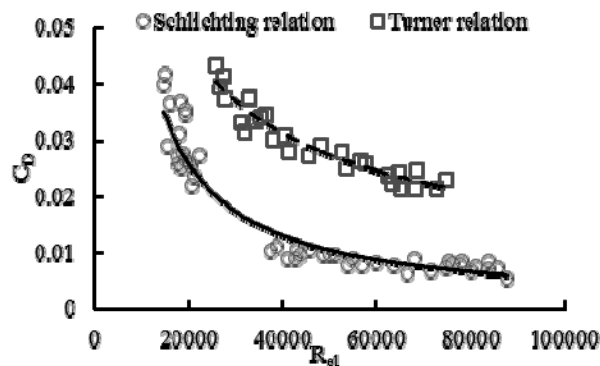
الف) تنش برشی کف، $da=10$.تنش برشی کف، $da=0$.

تغییر می‌کند. عدد رینولدز طولی با استفاده از رابطه $R_{el} = \frac{\bar{\rho} \bar{U} l}{\bar{\mu}}$ محاسبه شده است که در آن R_{el} عدد رینولدز طولی، l فاصله از ابتدای بستر زبر، \bar{U} سرعت متوسط مقطع جریان، $\bar{\rho}$ غلظت متوسط مقطع جریان و $\bar{\mu}$ لزجت متوسط مقطع می‌باشد. در محاسبه این مقادیر مقدار سرعت بینهایت در رابطه ۱ همان مقدار سرعت حداکثر فرض گردید و از آنجایی که این فرض بسختی قابل پذیرش بوده و همچنین مقادیر ضریب کشش سطحی محاسبه شده از رابطه ۳ به واقعیت نزدیکتر است، میتوان به منظور انطباق ضرایب محاسبه شده از هر دو رابطه، مقدار سرعت بینهایت را بصورت نسبی از سرعت حداکثر در نظر گرفت. محققان دیگر نیز در جریان‌های مختلف سعی در تخمین مقدار سرعت بینهایت با توجه به شرایط واقعی داشته‌اند از جمله می‌توان به اید و راجارتنام اشاره نمود که این نسبت را برای پرش هیدرولیکی بر روی بستر موجدار برابر یک در نظر گرفته‌اند (اید و راجارتنام ۲۰۰۲). در تحقیق حاضر از آنجایی که شناوری تاثیر مهمی در رفتار جریان غلیظ دارد، نمیتوان یک مقدار ثابت برای این نسبت نتیجه گرفت، لذا با تحلیل رگرسیون نتایج حاصل شده رابطه $\frac{U_{sc}}{U_m} = \frac{5.67}{R_{el}^{0.2}}$ به عنوان نسبت بین سرعت بینهایت و سرعت حداکثر حاصل شده است.

در مقایسه رفتار جریان غلیظ با رفتار هیدرولیکی آب بر روی بستر با تغییر ناگهانی زبری - مطالعه چن و چیو، (۲۰۰۳) - می‌توان بیان داشت که در جریان تک فاز آبی نیز زبری موثر با وجود تغییر ناگهانی زبری بستر، بطور ناگهانی افزایش نمی‌یابد و با حرکت در طول بستر به مقدار آن افزوده شده تا به مقدار واقعی زبری بستر برسد، ولی در جریان غلیظ بدلیل وجود شناوری شدید و پدیده برخاستگی ابتدا رفتار نوسانی شدید ملاحظه گردید و سپس زبری موثر شروع به افزایش با نرخ کمتر از جریان تک فاز آبی می‌نماید. در مورد تنش برشی بستر در جریان آب نیز تغییرات شدید و افزایش و کاهش شدید در ابتدای بستر زبری در برخی آزمایش‌ها دیده شده ولی در مقایسه با جریان غلیظ کمتر می‌باشد.

ضریب کشش سطحی

همانطور که بیان شد، سری دوم آزمایش‌ها در تحقیق حاضر به منظور بررسی ضریب کشش سطحی بستر در جریان غلیظ نمکی انجام شده است. ضریب کشش سطحی با استفاده از رابطه ۳ (رابطه ترنبر برای ضریب کشش سطحی) و رابطه ۱ (رابطه شلختینگ برای ضریب کشش سطحی) مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۰ مقادیر محاسباتی را برای دو رابطه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که مقادیر محاسباتی با استفاده از رابطه شلختینگ کمتر از مقادیر رابطه ترنر می‌باشند که این اختلاف با تغییر در عدد رینولدز طولی



شکل ۱۰- مقادیر محاسباتی ضریب کشش سطحی.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر تاثیر تبدیل ناگهانی بستر از صاف به زبر برای دوشکل مختلف زبری استوانه‌ای و مخروطی و برای دو حالت آستانه بستر زبر بر روی بدنه جریان غلیظ نمکی و رسوبی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که با توجه به حالت آستانه شروع بستر زبر ($da=0$ یا $da=10$) پروفیل سرعت شروع به کاهش و یا افزایش می‌کند که افزایش ناشی از وقوع پدیده برخاستگی می‌باشد. با بررسی مقادیر تنش برشی و

زبری موثر با استفاده از قانون لگاریتمی سرعت نتیجه شد که بدلیل حضور شناوری بالا، رفتار جریان غلیظ با رفتار جریان‌های تک فازی تفاوت چشمگیری دارد. با بررسی ضریب کشش سطحی در طول بستر زبر نتیجه شد که با افزایش عدد رینولدز طولی از مقدار این ضریب کاسته می‌شود. نسبت سرعت بینهایت به سرعت حداکثر در آزمایش‌های تحقیق حاضر بین $0/58-0/83$ متغیر می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- ترابی‌پوده ح، فتحی‌مقدم م، قمی‌شی م و شفافی بجستان م، ۱۳۸۶. بررسی سرعت جبهه و شدت اختلاط جریان‌های غلیظ ورودی به یک مقطع واگرا. مجله تحقیقات منابع آب، جلد ۳، شماره ۱، صفحه ۵۶-۶۷.
- Alavian V, 1986. Behavior of density currents on an incline. J Hydraul Eng ASCE 112(1): 27-42.
- Antonia RA and Luxton RE, 1971. The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness Part 1. Smooth to rough. J Fluid Mech 48(4): 721-761.
- Bhuiyan F, Rajaratnam N and Zhu DZ, 2010. An experimental study of mounds formed by dumping coarse sediment in channel flow. J Hydraul Res IAHR 48(3): 283-291.
- Chen X and Chiew YM, 2003. Response of velocity and turbulence to sudden change of bed roughness in open-channel flow. J Hydraul Eng ASCE 129(1): 35-43.
- Dallimore JD, Imberger J and Ishikawa T, 2001. Entrainment and turbulence in saline underflow in lake Ogawara. J Hydraul Eng ASCE 127(11): 937-948.
- Ead SA and Rajaratnam N, 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. J Hydraul Eng ASCE 128(7): 656-663.
- Fang X and Stefan HG, 2000. Dependence of dilution of a plunging discharge over sloping bottom on inflow conditions and bottom friction. J Hydraul Res IAHR 38(1): 15-25.
- Islam MA and Imran J, 2010. Vertical structure of continuous release saline and turbidity currents. J Geophysical Res 115: 1-14.
- Monaghan JJ, Merieux C, Huppert HE and Mansour J, 2009. Particulate gravity currents along V-shaped valleys. J Fluid Mech 631: 419-440.
- Nourmohammadi Z, Afshin H, and Firoozabadi B, 2011. Experimental observation of the flow structure of turbidity currents. J Hydraul Res IAHR 40(2): 168-177.
- Ohye CD and Schleiss AJ, 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. J Hydraul Eng ASCE 133(6): 637-648.
- Roscoe R, 1952. The viscosity of suspensions of rigid spheres. Br J Appl Phys 3(8): 267-269.
- Schlichting H, 1979. Boundary-Layer Theory. Seventh Edition McGraw-Hill press U.S.A.
- Turner JS, 1973. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge University Press U.K.