بررسی آزمایشگاهی سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی سطوح زبر

مهدی کاهه[1*]، مهدی قمشی[2] و سیدحبیب موسوی جهرمی[3]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز kaheh.17@gmail.commehdi.

۲- استاد گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- دانشیار گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰

چکیده

از بخش‌های بسیار مهم و قابل بررسی در دینامیک جریان غلیظ، بخش پیش رونده جریان غلیظ (پیشانی جریان) است. نیروی جلوبرنده و محرک در پیشانی جریان، گرادیان فشار حاصل از اختلاف چگالی میان پیشانی جریان و سیال محیطی است. به منظور بررسی اثر زبری بستر به عنوان عاملی مقاوم در برابر سرعت پیشروی جریان یک سری آزمایش‌های جریان غلیظ بر روی سطوح زبر با اندازه های اسمی ۰، ۴، ۷/۵، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر انجام شد. جریان غلیظ نمکی با سه دبی ورودی ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر ثانیه و سه غلظت اسمی ۱۰، ۱۶ و ۲۰ گرم بر لیتر ایجاد گردید. همچنین به منظور بررسی تأثیر توام شیب و زبری آزمایش‌ها در محدوده شیب‌های ۰ تا ۲/۲ درصد صورت پذیرفت. پس از انجام آنالیز ابعادی و بررسی تأثیر هریک از پارامترهای بی‌بعد مؤثر، مدل رگرسیون خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۰ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۷ و درصد خطای نسبی حدود ۱۰ درصد برای تخمین سرعت پیشروی جریان ارائه شد. با استاندارد سازی داده‌ها به روش خطی و مدل رگرسیونی، تأثیر هریک از پارامترهای شیب، زبری نسبی و دبی بی بعد جریان غلیظ بر روی سرعت پیشروی جریان غلیظ به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۵۰- و ۰/۳۵- محاسبه گردید.

کلید واژه‌ها: *جریان غلیظ، سرعت پیشروی، بستر زبر.*

مقدمه

جریان‌های غلیظ در بسیاری از محیطهای طبیعی و کاربردهای مهندسی هنگامی رخ می‌دهد که یک سیال با دانسیته بالاتر در سیال سبکتری جریان یابد (ایونگ و همکاران[1]، ۲۰۰۶). ورود جریان‌های غلیظ ناشی از پسابها در اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها، فعالیت‌های بیولوژیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مخازن سدها جریان‌های غلیظ رسوبی باعث رسوبگذاری در مخزن سد شده و باعث کاهش ظرفیت ذخیره در آنها می شوند. عامل حرکت در جریان‌های غلیظ، اختلاف دانسیته میان سیال اصلی و سیال محیطی است که این امر باعث کاهش نیروی ثقل شده و ایجاد تفاوت‌های اساسی با جریان در مجاری روباز می‌گردد. همانند جریان در مجاری باز، در جریان‌های غلیظ نیز اثر نیروی ثقل به نیروی اینرسی بسیار با اهمیت است به‌طوری‌که عدد فرود در جریان غلیظ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g'h\cos\theta}} \qquad (۱)$$

به این عدد عدد فرود دنسیومتریک می‌گویند. فرم متداول در برگیرنده نیروی ثقل و اینرسی به صورت رابطه زیر است که تحت عنوان عدد ریچاردسون بیان می‌شود:

$$Ri = \frac{1}{{Fr_D}^2} = \frac{g'.h.\cos\theta}{U^2} \qquad (۲)$$

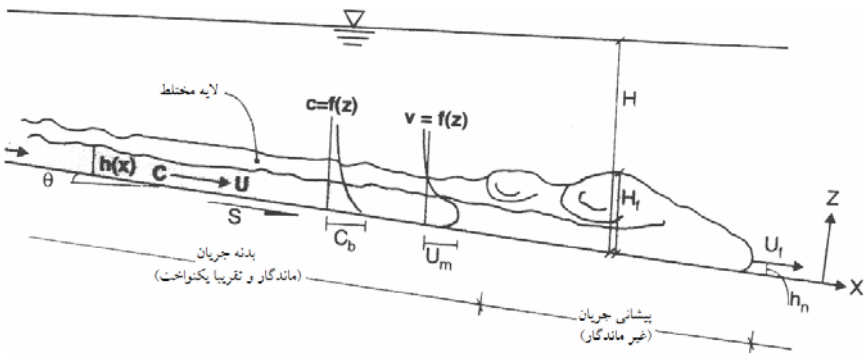
یکی از قسمتهای بسیار مهم و قابل بررسی در دینامیک جریان غلیظ، بخش پیش رونده جریان غلیظ (پیشانی جریان) است (شکل ۱). برخلاف جریان نسبتاً یکنواخت و دائمی بدنه جریان غلیظ، پیشانی جریان دارای جریان غیر دائمی بوده و باعث جابجایی سیال محیطی می‌شود. نیروی جلوبرنده و محرک در پیشانی جریان گرادیان فشار حاصل از اختلاف چگالی میان پیشانی جریان و سیال محیطی است. در زمینه پیشروی جریان غلیظ تحقیقات بسیاری صورت گرفته است (گارسیا و پیرسون[2]، ۱۹۹۶؛ فتحی‌مقدم و همکاران، ۲۰۰۸؛ و موناگان و همکاران[3]، ۲۰۰۹؛ ژانگ و همکاران[4]، ۲۰۱۰).

1- Ieong et al.

2- Garcia and Parsons

3- Monaghan et al.

4- Zhang et al



شکل ۱- شمای کلی از جریان غلیظ و قسمت‌های مختلف آن (آلتیناکار و همکاران[1]، ۱۹۹۰)

پارامتر بسیار مهم در بررسی پیشانی جریان میزان سرعت پیشرفت و پخش آن در سیال محیطی است. با فرض یکنواخت بودن جریان غلیظ بر روی یک شیب افقی و بدون در نظر گرفتن اصطکاک سرعت پیشروی جبهه جریان می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$U_f = \sqrt{2g'h} \qquad (۳)$$

که در آن g' شتاب ثقل کاهش یافته تحت تأثیر تغییر غلظت و دانسیته سیال بوده و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$g' = g\left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a}\right)C_s \qquad (۴)$$

آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) با استفاده از آزمایش‌های مختلف رابطه‌ای برای تعیین سرعت پیشروی ارائه نمودند:

$$U_f = 0/75\sqrt{2g'H_f} \qquad (۵)$$

طبق نظر بریتر و لیندن[2] (۱۹۸۰) و آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) مقدار سرعت جریان در طی مسیر ثابت بوده و مستقل از فاصله‌ای است که توسط جریان غلیظ پوشش می‌دهد. طبق نظر آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۰) مقدار سرعت پیشانی در زوایای کمتر از پنج درجه تحت تاثیر شیب بوده و مقدار ضریب بی‌بعد $U_f/\sqrt[3]{g'q}$ در محدوده ۰/۷-۱/۵ تغییر می کند.

قمشی(۱۹۹۵) در بررسی آزمایشگاهی با شیب کف ثابت و برابر ۰/۰۰۶۳۵ و استفاده از جریان غلیظ رسوبی و جریان غلیظ نمکی و نیز با استفاده از داده‌های سایر محققین، برای سرعت پیشانی جریان رابطهٔ زیر را به دست آورد:

$$U_f = 0/72\sqrt{g'H_f} \qquad (۶)$$

که در آن H_f ضخامت جبهه جریان است.

پترز[3] (۱۹۹۹) با استفاده از تکنیک LIF و با ایجاد زبریهای دو بعدی (به اندازه ۶، ۱۳، ۱۹ و ۲۵ میلی‌متر) در طول یک فلوم آزمایشگاهی با شیب افقی، سرعت پیشروی جریان غلیظ نمکی را بر روی سطوح زبر مورد بررسی قرار داد. ایشان نشان دادند که سطوح زبر با کاهش سرعت پیشروی در جریان غلیظ باعث افزایش اثر ویسکوزیته در مقایسه با اینرسی در مسیر پیشروی جریان شده و ایجاد دو رژیم مختلف جریان طی مسیر می‌کند که در حالت اول نیروی شناوری و اینرسی غالب بوده و در رژیم دوم نیروی شناوری و ویسکوزیته سیال غالب می‌باشد. همچنین ایشان با اصلاح روابط مکان- زمان پیشروی جریان در سطوح صاف روابطی را برای سطوح زبر ارائه دادند:

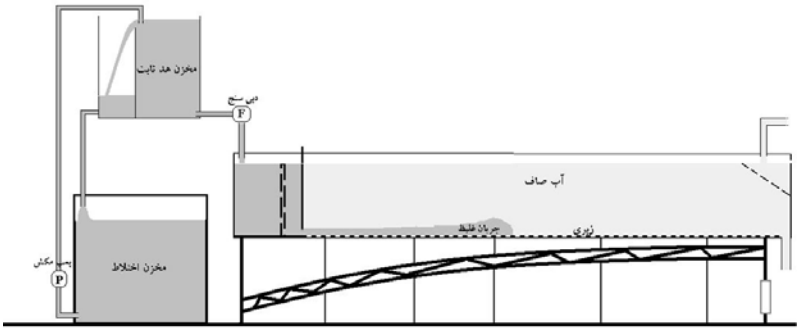
$$X = C\alpha^{\frac{1}{3}}\left(g'_s Q\right)^{\frac{1}{3}}t \quad \text{رژیم اینرسی- شناوری} \qquad (۷)$$

$$X = k\alpha^{\frac{1}{5}}\left(\frac{g'_s Q^3}{\nu_{EFF}}\right)^{\frac{1}{3}}t^{\frac{4}{5}} \quad \text{رژیم ویسکوزیته-شناوری} \qquad (۸)$$

ایشان با نرمال سازی ارتفاع پیشانی با ارتفاع جریان غلیظ بر روی سطوح زبر نشان دادند که پارامترنرمال شده ارتفاع پیشانی جریان حدود ۳۰درصد بیشتر از مقدار آن بر روی سطوح صاف است.

لاروکا و همکاران[4] (۲۰۰۸) با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی، دینامیک یک جریان غلیظ سه بعدی را بر روی سطوح زبر مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که مقدار

1- Altinakar et al.
2-Britter and Linden
3- Peters
4- La Rocca et al.



شکل۲- طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده

جدول۱- خلاصه‌ای از آزمایشات انجام شده در این تحقیق

غلظت (g/lit)	دبی جریان غلیظ (lit/s)	شیب (٪)	زبری (mm)	تعداد آزمایش‌ها
۱۰	۱	۰/۰۵، ۰/۵، ۱/۱، ۱/۵، ۲/۲		۲۵
۱۵	۰/۷، ۱، ۱/۳	۰/۰۵، ۰/۵، ۱/۱، ۱/۵، ۲/۲	۰، ۴، ۷/۵، ۱۲، ۱۵	۷۵
۲۰	۱	۰/۰۵، ۰/۵، ۱/۱، ۱/۵، ۲/۲		۲۵

کاهش سرعت پیشروی جریان در زبری‌های مختلف یکواخت نبوده و کمترین مقدار آن در زبری نسبی $0/005 < \frac{\varepsilon}{H} < 0.01$ بوده و در $\frac{\varepsilon}{H} > 0.01$ مقدار کاهش سرعت پیشروی ثابت است.

اسکویروس و همکاران[1] (۲۰۱۰) با یک سری آزمایش‌های جریان غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر متحرک، شکل‌گیری فرم بستر را مورد مطالعه قرار داده و اثر زبری و فرم بستر ایجاد شده بر روی پروفیل‌های سرعت و مقدار افزایش غلظت از طریق بستر متحرک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که شکل گیری فرم بستر در رژیم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و اثر متفاوتی نیز بر روی پروفیل سرعت در نزدیک بستر (بخش دیواره از پروفیل سرعت) و فاصله عمودی محل قرارگیری سرعت ماکزیمم دارد.

برهمند و شمسایی (۲۰۱۰) با استفاده از تئوری پرش هیدرولیکی در مجاری رو باز و اصلاح آن برای جریانهای غلیظ و با استفاده از یک سری آزمایش‌های جریان غلیظ، رابطه‌ای برای نسبت عمق مزدوج در پرش جریان‌های غلیظ روی سطوح زبر ارائه نمودند:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+7/12\exp\left[-0.5\left(\frac{K_s}{h_1}\right)^{0/85}\right]F_{D1}{}^2} - 1\right) \qquad (۹)$$

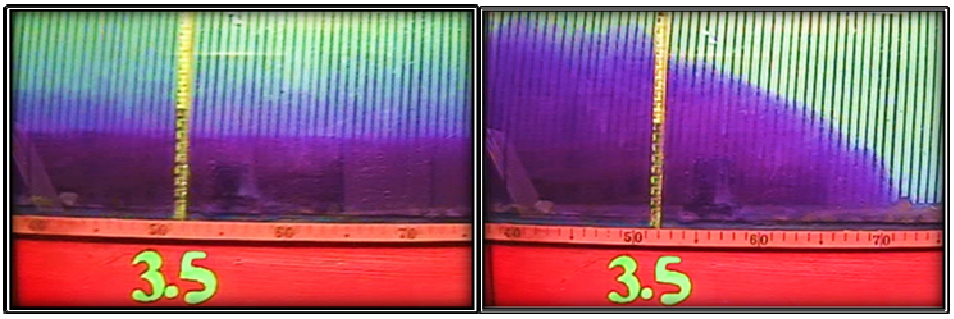
که در آن $\frac{h_2}{h_1}$ نسبت اعماق مزدوج، $\frac{K_s}{h_1}$ زبری نسبی در مقطع بالادست پرش و F_{D1} عدد فرود دنسیومتریک مقطع بالادست پرش جریان غلیظ می باشد.

با توجه به اینکه خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ تحت تأثیر زبری و شیب بستر قرار دارد و هریک از این پارامترها تأثیر عکسی نسبت به یکدیگر بر روی سرعت پیشروی دارند، در این تحقیق به مطالعه سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر پرداخته شده و تأثیر تغییرات مختلف دبی، شیب و غلظت جریان نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی: به منظور بررسی اثر زبری بر روی سرعت پیشروی جریان غلیظ از یک فلوم آزمایشگاهی با شیب قابل تغییر با عرض ۳۵ سانتی‌متر و طولی معادل ۹ متر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد (شکل ۲). آزمایش‌ها به صورت جریان غلیظ نمکی در سه دبی ورودی ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر ثانیه و در محدوده شیب ۰ تا ۲/۲ درصد صورت پذیرفت. برای زبر کردن بستر از ذرات شن طبیعی با اندازه های ۰، ۴، ۷، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر استفاده گردید. همچنین به منظور بررسی تأثیر توام میزان غلظت جریان بر سرعت پیشروی روی سطوح زبر از سه غلظت ۱۰، ۱۶ و ۲۰ گرم بر لیتر استفاده شد. جدول (۱) خلاصه‌ای از آزمایشات انجام شده و ترتیب آن به منظور بررسی تأثیر زبری و پارامترهای مختلف موثر بر سرعت پیشروی جریان غلیظ را نشان می دهد.

1- Sequeiros et al.



شکل۳- نمونه از جریان غلیظ ایجاد شده (پیشانی و بدنه جریان)

در همه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق با استفاده از یک دوربین فیلمبرداری صنعتی (CCD Camera)، پیشروی جریان غلیظ (که با استفاده از ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم از سیال محیطی متمایز شده بود) در طول فلوم آزمایشگاهی به صورت لحظه‌ای تصویر برداری شد و در نهایت متوسط سرعت پیشروی جریان در میانه کانال تعیین گردید. شکل (۳) نمونه‌ای از آزمایش جریان غلیظ ایجاد شده را نشان می‌دهد.

آنالیز ابعادی به منظور توسعه مدل فیزیکی: از آنجا که هدف بررسی اثر زبری بر سرعت پیشروی جریان غلیظ تحت تأثیر پارامترهای مختلف می‌باشد، لذا متغیرهای حاکم را می‌توان به صورت زیر درنظر گرفته شد:

$$U_f = \Phi\left(k_s, q, h, g', \nu, S\right) \qquad (۱۰)$$

که در رابطه فوق، U_f سرعت پیشروی جریان غلیظ، k_s زبری بستر، q دبی در واحد عرض جریان غلیظ، h عمق بدنه جریان غلیظ، g' نیروی ثقل کاهش یافته، ν لزجت سینماتیک سیال غلیظ و S شیب کف می‌باشد. با استفاده از روش باکینگهام و مروری بر منابع انجام شده پارمترهای بدون بعد به صورت زیر مورد نظر قرار گرفتند:

$$U_f/(g'q)^{1/3} = \Phi\left(S, \frac{g'h^3}{q^2}, {k_s}/{h}, {q}/{\nu}\right) \qquad (۱۱)$$

که در آن S شیب کانال، ${q}/{\nu}$ بیانگر عدد رینولدز جریان، $\frac{g'h^3}{q^2}$ دبی بی‌بعد شده و بیانگر عدد ریچاردسون R_i' و ${k_s}/{h}$ زبری نسبی بستر می‌باشد. با توجه به تغییرات کم غلظت و دما در همه آزمایش‌ها، از اثر عدد رینولدز صرفنظر شده است.

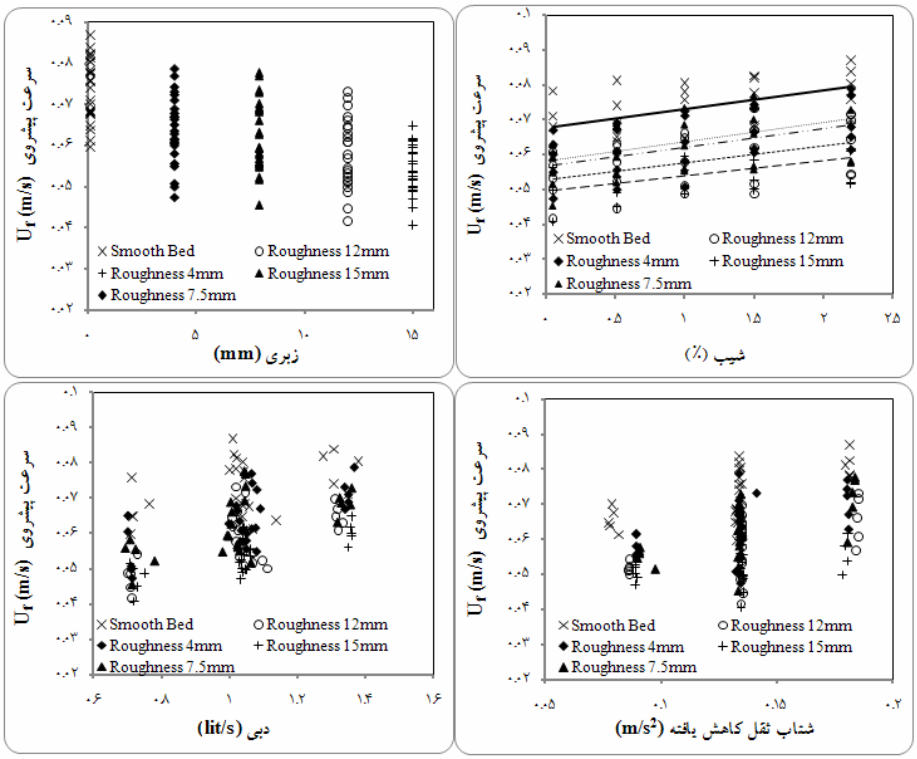
نتایج و بحث

پیشروی جریان غلیظ تحت تأثیر عوامل مهمی از جمله کشش سیال محیطی و اصطکاک بستر قرار دارد. در این تحقیق به منظور مطالعه سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی سطوح زبر و مقایسه آن با شرایط بستر صاف یک سری آزمایش جریان غلیظ نمکی بر اساس جدول (۱) صورت پذیرفت. شکل (۴) محدوده تغییرات سرعت پیشروی در مقابل هر یک از پارامترهای سرعت، دبی ورودی جریان غلیظ و زبری بستر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش پارامترهای غلظت، دبی ورودی و شیب، مقدار سرعت پیشروی افزایش یافته و با افزایش زبری بستر مقدار سرعت پیشروی به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد که بیانگر اثر کاهنده زبری بر روی سرعت پیشروی جریان می‌باشد. این کاهش سرعت به طور کلی می‌تواند به دو دلیل عمده افزایش ضریب اصطکاک و در ادامه افزایش ورود سیال محیطی به پیشانی جریان از طریق افزایش تنش برشی کف و کاهش گرادیان هیدرولیکی بین پیشانی و سیال محیطی باشد. در این تحقیق به جستجوی اثر زبری به عنوان عامل مقاوم در مقابل پیشروی جریان غلیظ پرداخته شده است.

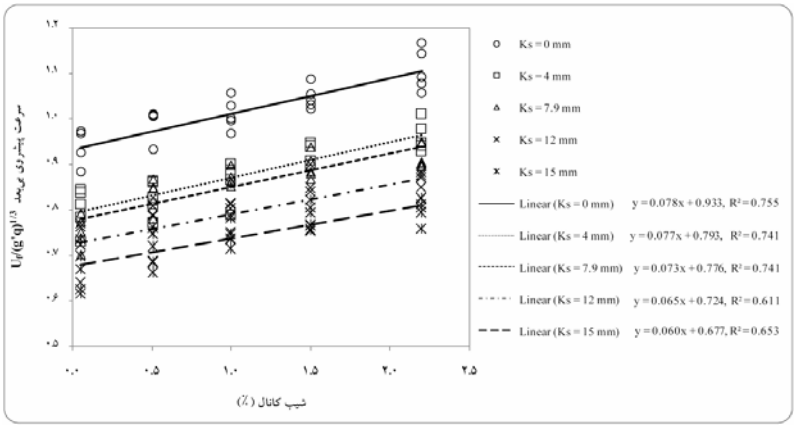
پس از انجام آزمایش‌های جریان غلیظ با توجه به رابطه (۱۱)، پارامتر سرعت پیشروی بی‌بعد تابعی از شیب، دبی بی‌بعد جریان و پارامتر زبری نسبی فرض شد و روابط موجود بین آنها مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق به منظور بررسی اثر شیب بر روی سرعت پیشروی جریان پارامتر بی‌بعد سرعت پیشروی جریان در مقابل شیب کانال ترسیم گردید (شکل ۵). نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش زبری ضریب شیب معادله سرعت بی‌بعد در مقابل شیب افزایش می‌یابد. شکل (۶) نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این تحقیق در مقایسه با نتایج محققین دیگر تطابق خوبی دارد و بر اساس آن در محدوده شیب کمتر از ۲/۵ درصد سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و به طور متوسط حدود ۲۰ درصد کمتر از مقدار آن بر روی سطوح صاف است. روابط زیر را می‌توان برای تخمین سرعت پیشروی جریان بر روی هر یک از سطوح صاف و زبر مورد استفاده قرار داد:

$$0/85 < U_f/(g'q)^{1/3} < 1/15 \quad \text{سطوح صاف} \qquad (۱۲)$$

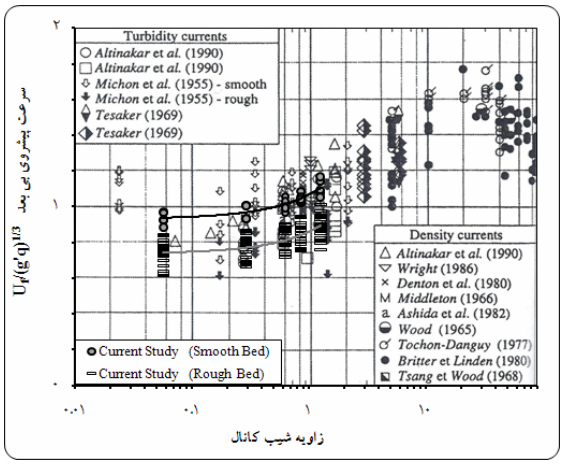
$$0/60 < U_f/(g'q)^{1/3} < 1 \quad \text{سطوح زبر} \qquad (۱۳)$$



شکل ۴- تغییرات سرعت پیشروی در مقابل پارامترهای مؤثر



شکل۵- تغییرات سرعت بی بعد پیشروی جریان غلیظ در مقابل شیب کانال در زبری‌های مختلف



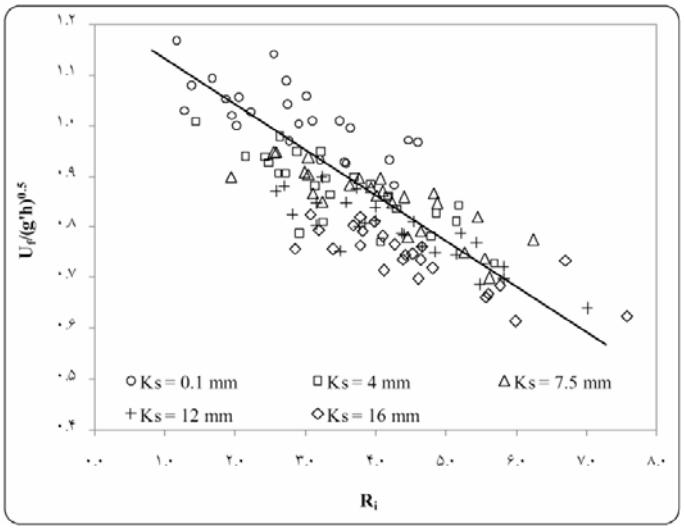
شکل۶- تغییرات سرعت بی‌بعد پیشروی جریان غلیظ در مقابل زاویه شیب کانال در مقایسه با نتایج محققین دیگر

به طور کلی با افزایش شیب مقدار سرعت پیشروی افزایش یافته و مقدار آن در بسترهای زبر نسبت به سطوح صاف بین ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر اینکه تغییرات سرعت پیشروی بین سطوح زبر و صاف به‌طورکلی بیش از تغییرات سرعت بر روی سطوح زبر (در اثر تغییر زبری) است.

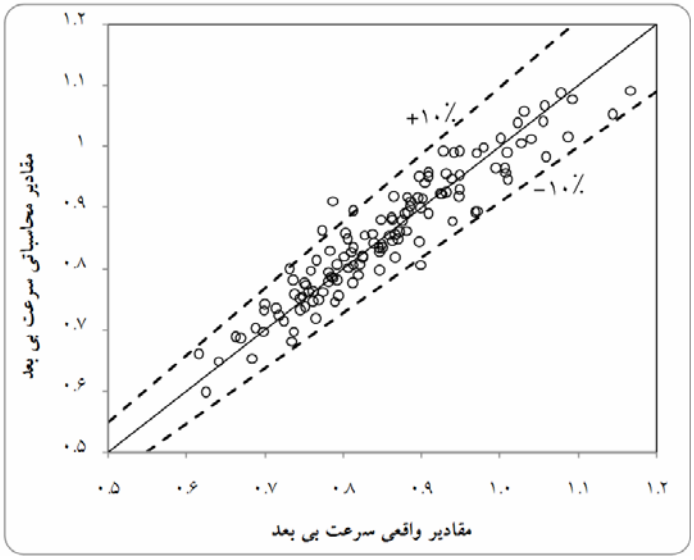
با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامتر بی‌بعد دیگری که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد دبی بی‌بعد جریان $\frac{g'h^3}{q^2}$ بوده که بیانگر عدد ریچادسون در جریان غلیظ است. شکل (۷) تغییر مقادیر سرعت پیشروی بی‌بعد در مقابل دبی بی بعد جریان را برای هر یک از سطوح صاف و زبر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود محدوده بازه مطالعات عدد ریچاردسون بین یک تا هشت بوده که با افزایش زبری و عدد ریچاردسون R_i سرعت بی بعد پیشروی جریان کاهش می‌یابد. رابطه پارامتر سرعت بی بعد در مقابل عدد ریچاردسون به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$U_f/(g'q)^{1/3} = 0.076(R_i) + 1.15 \qquad (۱۴)$$

رابطه فوق با ضریب همبستگی ۰/۸۰ و میانگین مربعات خطای ۰/۰۶ تخمین مناسبی از سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر و صاف ارائه می‌دهد.



شکل۷- تغییرات سرعت بی بعد پیشروی جریان در مقابل عدد ریچاردسون



شکل۸- نتایج حاصل از مدل‌سازی سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر

به منظور تخمین سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر، ایجاد مدلی براساس پارامترهای بی‌بعد مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس و با توجه به اینکه هر یک از پارامترهای مستقل به صورت تقریباً خطی با پارامتر سرعت جریان رابطه دارند بهترین رابطه با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره به دست آمد. معادله (۱۵) با ضریب همبستگی ۰/۹۰ و جذر میانگین مربعات خطایی حدود ۰/۰۳۷ رابطه مناسبی برای تخمین سرعت پیشروی جریان می‌باشد. شکل (۸) نتایج حاصل از این مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

$$U_f/(g'q)^{1/3} = 0/0455\,(S) - 0/03\left(\frac{g'h^3}{q^2}\right) - 0.0853\left(\mathrm{k_s}/h\right) + 1.03 \qquad (۱۵)$$

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود رابطه (۱۵) با خطای کمتر از پنج درصد پوشش مناسبی بر اکثر داده‌های آزمایشگاهی از پارامتر بی بعد سرعت ارائه می‌دهد.

به منظور بررسی بهتر میزان خطای مدل‌سازی از رابطه میانگین خطای نسبی به صورت زیر استفاده شد:

$$MRD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|Observed_i - Estimated_i\right|}{Observed_i} \qquad (۱۶)$$

براساس رابطه فوق، میزان خطای مدل‌سازی در سه ناحیه ۲۵ درصد کران بالا، ۲۵ درصد کران پایین و ۵۰ درصد میانه داده‌ها تعیین گردید. با توجه به شکل (۹) بیشترین میزان خطا مربوط به کران پایین مجموعه داده‌های سرعت بی‌بعد بوده و کمترین میزان آن مربوط به کران بالا با متوسط خطای نسبی حدود نه درصد می‌باشد.

پس از ایجاد رابطه‌ای برای تخمین سرعت پیشروی، ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترهای مستقل در مدل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور هر یک از پارامترهای مستقل در مدل رگرسیونی ارائه شده ابتدا به صورت خطی استاندارد شده و ضرائب مدل رگرسیونی برای داده‌های استاندارد شده، به عنوان ضرایب تأثیر هر یک از پارامترهای مستقل محاسبه شد. برای استاندارد سازی داده‌ها از رابطه زیر استفاده شد:

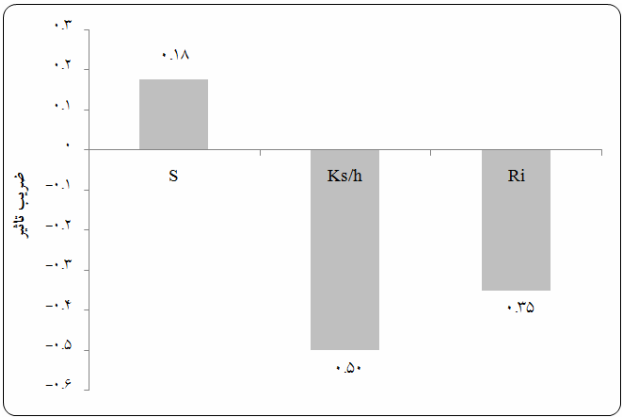
$$Xstd_i = \frac{x_i - \min\{X\}}{\max\{X\} - \min\{X\}} \qquad (۱۷)$$

که در آن x_i، iامین داده و $Xstd_i$ مقدار استاندارد شده متناظر با آن‌است. $\min\{X\}$ و $\max\{X\}$ به ترتیب حداقل و حداکثر مجموعه داده در پارامتر مورد نظر می باشد.

نتایج حاصل از این بررسی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که ضرایب تأثیر پارامترهای بی بعد شیب و زبری نسبی و عدد ریچاردسون بر روی سرعت بی‌بعد پیشروی جریانبه ترتیب ۰/۱۸، ۰/۵۰- و ۰/۳۵- می‌باشد که بیانگر این است که در محدوده مقادیر مورد بررسی در این آزمایش‌ها زبری نسبی بیشترین تأثیر را در تخمین سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر را دارند.



شکل ۹- متوسط درصد خطای نسبی در بخش‌های مختلف مجموعه داده‌ها



شکل ۱۰- ضرایب تاثیر هر یک از پارامترهای بی بعد در مدل‌سازی سرعت پیشروی جریان غلیظ

نتیجه‌گیری

پیشروی جریان غلیظ تحت تأثیر عوامل مهمی از جمله کشش سیال محیطی و اصطکاک بستر قرار دارد. نتایج حاصل از این تحقیق که به منظور مطالعه آزمایشگاهی سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی سطوح زبر و مقایسه آن با شرایط بستر صاف در یک سری آزمایش‌های جریان غلیظ نمکی صورت گرفته است، به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

۱- نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر اثر قابل ملاحظه زبری بستر، به عنوان نیروی مقاوم در مقابل پیشروی جریان می‌باشد.

۲- درمحدوده آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به طور کلی افزایش سرعت پیشروی در اثر افزایش شیب کف در بسترهای زبر حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد کمتر از جریان عبوری بر روی سطوح صاف می‌باشد.

۳- با توجه به روند تغییرات سرعت پیشروی بی‌بعد در مقابل دبی بی بعد (در زبری‌ها و شیب‌های مختلف) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش شیب، اثر اصطکاک از بین رفته و پارامتر سرعت پیشروی بی بعد در مقابل پارامتر دبی بی بعد به یک مقدار نسبتاً ثابت در شیب‌های مختلف می‌رسد.

۴- رابطه ارائه شده در این تحقیق به منظور تخمین سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر، بر اساس آنالیز ابعادی صورت گرفته با ضریب همبستگی ۰/۹ و جذر میانگین مربعات خطایی حدود ۰/۰۳۷ و با متوسط خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد پوشش مناسبی بر اکثر نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در این تحقیق دارد.

بر اساس آنالیز ابعادی صورت گرفته و به روش مدل رگرسیون خطی، ضریب تأثیر هر یک از پارامترهای بی بعد شیب و زبری نسبی و دبی بی‌بعد (عدد ریچاردسون) به ترتیب ۰/۱۸، ۰/۵۰- و ۰/۳۵- می‌باشد که بیانگر تأثیر قابل ملاحظه زبری نسبی در تخمین سرعت پیشروی جریان بر روی سطوح زبر است.

تشکر و قدردانی

در پایان از کلیه اساتید محترم و مسولان دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل همکاری فراوان در طی انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Altinakar, M. S., Graf, W. H. and E. J. Hopfinger. 1990. Weakly depositing turbidity current on a small slope. Journal of Hydraulic Research, 28(1):55-80

2. Barahmand, N. and A. Shamsai. 2010. Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 15(4): 285-307.

3. Britter, R. E. and P. Linden. 1980. The motion of the front of a gravity current traveling down an incline. Journal of Fluid Mechanics, 99(3): 531- 543.

4. Fathi Moghadam, M., Torabi Poudeh, H., Ghomshi, M. and M. Shafaei. 2008. The density current head velocity in expansion reaches. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 13(1): 63-68.

5. Garcia, M. H. and J. D. Parsons. 1996. Mixing at the front of gravity currents. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 24(1-4): 197-205.

6. Ghomeshi, M. 1995. Reservoir sedimentationmodeling. Ph.D. Thesis. University of Wollongong. Australia.

7. Ieong, K. K., Mok, K. M. and H. Yeh. 2006. Fluctuation of the front propagation speed of developed gravity current. Journal of Hydrodynamics, 18(3): 351-355.

8. La Rocca, M., Adduce, C., Sciortino, G. And A. B. Pinzon. 2008. Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom. Physics of Fluids, 20.

9. Monaghan, J. J., Mériaux, C. A., Huppert, H. E. and J. M. Monaghan. 2009. High Reynolds number gravity currents along V-shaped valleys . European Journal of Mechanics-B/Fluids, 28(5): 651-659.

10. Peters, W. D. 1999. Rough surface gravity current flows. Ph.D. Thesis. University of New Brunswick. Canada.

11. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun T., Garcia H. M. and G. Parker. 2010. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. Journal of Hydraulic Engineering, 136(7):412-433

12. Zhang, L. Z., Zeng, L., Zhang, B., Li, Z. and Z. L. Luo. 2010. Numerical study on head advancement of axisymmetric gravity currents. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 15(7): 1893-1898.