

بررسی پارامترهای مؤثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریان‌های غلیظ رسوبی در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل

حسین بشاورد^۱، مهدی قمشی^{۲*} و مهوش منصوری هفشجانی^۳

۱- کارشناس ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- نویسنده مسئول: استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز m.ghomeshi@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۴/۲۱

چکیده

جریان‌های غلیظ مهم‌ترین عامل انتقال رسوب به مخازن سدها و دریاچه‌ها هستند. یکی از پارامترهای مؤثر در جریان‌های غلیظ، ظرفیت حمل رسوب در بدنه جریان می‌باشد. در تحقیق حاضر به بررسی عوامل مؤثر در تغییرات ظرفیت حمل رسوب بدنه پرداخته شده است. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در یکی از فلوم‌های آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده. فلوم دارای ۹/۲۵ متر طول، ۵۰ سانتی‌متر عرض و ۷۵ سانتی‌متر عمق می‌باشد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت برشی و غلظت جریان ورودی، ضریب حمل رسوب بدنه افزایش و با دور شدن از دریچه، غلظت بدنه در جریان‌های غلیظ رسوبی به دلیل رسوب گذاری کاهش یافت و این کاهش غلظت در جریان‌های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل، به دلیل عدم رسوب گذاری کمتر مشاهده شد. در نهایت روابطی برای ظرفیت حمل رسوب بدنه پیشنهاد شده است.

کلید واژه‌ها: جریان‌های غلیظ، ظرفیت حمل رسوب بدنه، انتقال رسوب، جریان‌های ثقی.

مقدمه

می‌کنند، که جریان‌های کدر آئیز نامیده می‌شوند (۲). شکل (۱) تصویری از یک جریان غلیظ دو بعدی را نشان می‌دهد که سیال ورودی با چگالی ρ_1 با سرعت متوسط U در جهت محور x بر روی سطحی شیبدار با زاویه θ وارد سیال ساکن با چگالی $\rho_2 = \rho_a$ شده است.

تئوری جریان غلیظ:

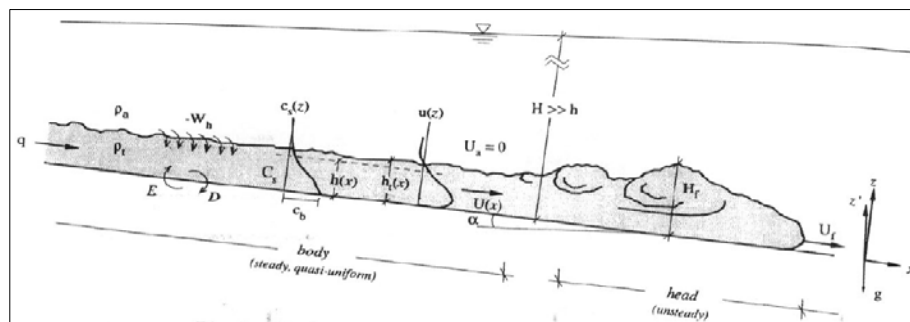
جریان‌های غلیظ عموماً جریانی مانند جریان‌های کانال‌های باز دارند، با این تفاوت که به علت نیروی شناوری سیال غلیظ، شتاب ثقل مؤثر وارده بر جریان کم است و همین پارامتر سبب حرکت جریان غلیظ در شیب‌ها می‌گردد. در این جریان‌ها شتاب ثقل مؤثر g' را به صورت زیر نشان می‌دهند:

$$g' = g(\rho_1 - \rho_2) / \rho_2 = g\Delta\rho / \rho_2 \quad (1)$$

اگر یک سیال با چگالی معلوم وارد سیال ساکن با چگالی متفاوت شود، جریان ممکن است به سه حالت زیر گذر، میان گذر یا روگذر اتفاق بیفتد که وقوع هر یک از این حالات به اختلاف چگالی بستگی دارد. این تفاوت چگالی‌ها ممکن است به وسیله درجه حرارت، مواد محلول و ماده معلق به وجود آید. اگر چگالی جریان غلیظ ورودی $\rho_{in} = \rho_1$ کوچک‌تر از چگالی ساکن $\rho_2 = \rho$ باشد به عنوان یک روگذر حرکت خواهد کرد. اگر چگالی جریان غلیظ ورودی از چگالی سیال ساکن بزرگتر باشد به عنوان یک زیرگذر حرکت خواهد کرد و اگر سیال لایه‌بندی باشد یک جریان غلیظ به مقتضای چگالی اطراف آن پیدا خواهد کرد و به صورت میان گذر حرکت خواهد کرد (۴). جایی که اختلاف چگالی به وسیله ماده معلق ایجاد می‌شود جریان‌های غلیظ یا جریان‌های ثقی به عنوان زیر گذرها حرکت

1-Density currents
2-Gravity currents

3-Turbidity currents



شکل ۱- شماتیکی از بدنه و پیشانی جریان غلیظ زیرگذر (۴)

غلظت رسوبات نزدیک بستر، C_s : غلظت رسوبات معلق، θ : زاویه کف کانال، R : چگالی ویژه مستغرق ذره، u_{*b} : تنش برشی کف کانال و g : شتاب ثقل می‌باشد.

ضریب حمل رسوب:

به طور کلی به مقدار غلظت رسوبات نزدیک بستر، ضریب حمل رسوب اطلاق می‌شود (E_s). مفاهیم تعریف شده متفاوتی برای نقطه‌ای که غلظت در نزدیک کف در آن محاسبه می‌شود وجود دارد. برای مثال، انیشیتین^۱، انگلوند^۲ و فردسو^۳ فاصله‌ای معادل دو برابر قطر متوسط رسوب بالای بستر، D_s را استفاده کرده‌اند. ون رینج^۴ فاصله‌ای برابر نصف ارتفاع فرم بستر را استفاده کرده است، ایتاکورا و همکاران^۵، کیشی^۶، آکیاما و فوکوشیما^۷، آکیاما و استفان^۷ و گارسیا و پارکر^۸ مقداری برابر $0.5D$ را استفاده کرده‌اند، که D عمق آب است و استفاده از مقدار $0.5D$ در تحقیقات اخیر، به علت سادگی محاسبات عمومی‌تر است (۳).

معادله‌های ضریب حمل رسوب: بر اساس تحلیل انجام

شده توسط پارکر و اندرسون عمومی‌ترین رابطه بی بعد برای جریان آب- رسوب به صورت زیر بیان شده است (۳):

$$E_s = f\left(\frac{u_*}{v_s}, \frac{D}{D_s}, R_p, R\right) \quad (۶)$$

در معادله (۱)، g : شتاب ثقل، ρ_1 : چگالی جریان ورودی و ρ_2 : چگالی سیال ساکن می‌باشد. در جریان‌های غلیظ، فلاکس رسوبی مؤثر در واحد عرض به این صورت تعریف می‌شود:

$$B = g' h U = g R (C_s U h) = g' q \quad (۲)$$

حال با توجه به فلاکس رسوبی، جریان‌های کدر به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱- جریان‌های کدر پایدار اگر $dB/dx=0$

۲- جریان‌های کدر ناپایدار اگر $dB/dx \neq 0$

که جریان‌های کدر اغلب جریان‌های ناپایداری هستند، اما انواع دیگر جریان‌های غلیظ اغلب جریان‌های پایداری هستند (۵). به‌طور خلاصه معادلات انتگرالی عمودی بالای جرم جریان کدر یک بعدی و یکنواخت اما ناپایدار و در حال حرکت بر روی شیب به صورت زیر هستند (۷):

$$\frac{d}{dx}(Uh) = E_w U \quad (۳)$$

$$\frac{du}{dx}(c_s u h) = v_s (E_s - C_B) \quad (۴)$$

$$\frac{d}{dx}(U^2 h) = -\frac{1}{2} g R \cos \theta \frac{d}{dx}(C_s h^2) + (g R C_s h) \sin \theta - u_{*b}^2 \quad (۵)$$

در معادله‌های فوق، E_s : ضریب حمل رسوب، U : سرعت متوسط در جریان، h : ارتفاع بدنه جریان، E_w : ضریب اختلاط آب شفاف، c_b :

- 1- Einstein
- 2- Engelund and Fredsoe
- 3- Van Rijn
- 4- Itakura et al.
- 5- Kishi
- 6- Akiyama and Fukushima
- 7- Akiyama and Stefan
- 8- Garcia and Parker

$$E_s = 3.3 \times 10^{-7} Z^4 \quad (۱۳)$$

$$Z = \frac{u_*}{v_s} R_p^{0.65} \quad (۱۴)$$

فن^۱ ظرفیت انتقال رسوب جریان‌های غلیظ را وابسته به اندازه ذرات حمل شده دانست. وی با آزمایش در فلوم آزمایشگاهی ثابت کرد که رسوبات درشت تقریباً بلافاصله ته نشین می‌شوند، در حالی که ذرات ریزتر ($d_{90} = 0.008$ تا 0.018 میلی‌متر و $d_{50} = 0.002$ تا 0.003 میلی‌متر) در یک تغییرات ثابت و با سرعت‌های نقطه غوطه‌وری ۴۰ تا ۸۰ میلی‌متر بر ثانیه انتقال می‌یابند (۱).

میدلتون^۲ ته نشینی در رأس جریان‌های غلیظ ایجاد شده به وسیله دانه‌های پلاستیک با $S_g = 1/52$ و اندازه متوسط 0.18 میلی‌متر را مطالعه کرد. زمانی که جلوی دماغه یک ناحیه فرسایش پذیر است، در آن محل، رأس جریان کف را شسته و بعد از عبور از رأس ته‌نشینی در پشت رأس رخ می‌دهد، به عبارت دیگر ذرات درشت که در معرض جریان غلیظ یکنواخت‌تر قرار می‌گیرند (بعد از رأس) ته‌نشین خواهند شد (۶).

با توجه به اینکه جریان‌های غلیظ عبوری از مخازن با ورود به شیب‌های تند، ظرفیت حمل آنها نسبت به بدنه بالا خواهد رفت لذا شناخت پدیده‌های حاکم بر این نوع جریان‌ها می‌تواند گامی در جهت شناخت بیشتر پدیده جریان‌های غلیظ باشد که این تحقیق سعی دارد به این مسئله پاسخ دهد. هدف از تحقیق حاضر بررسی عوامل مؤثر بر ضریب حمل رسوب بدنه در جریان‌های غلیظ رسوبی و مقایسه آن با ضریب حمل رسوب بدنه در جریان‌های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل می‌باشد.

آنالیز ابعادی

در آنالیز ابعادی پارامترهای وابسته به جریان غلیظی که در شکل (۱) نشان داده شده است عبارتند از:

U_f : سرعت پیشانی جریان، U : سرعت بدنه، H_f : ارتفاع رأس،
 h : ارتفاع بدنه، C_f : غلظت رأس و C_b : غلظت بدنه. همچنین پارامترهای مستقل جریان نیز شامل g : شتاب ثقل مؤثر، q : دبی در واحد عرض و S : شیب کف فلوم می‌باشند که پس از آنالیز ابعادی و معادلاتی که در بخش قبلی به آن‌ها اشاره شد، برای محاسبه روابط مربوط به ضریب حمل رسوب بدنه از معادله‌های (۹) و (۱۲) استفاده شد

که چگالی ویژه مستغرق ذره (R) و عدد رینولدز ذره (R_p) بر اساس معادلات (۷) و (۸) محاسبه می‌شود:

$$R = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w \quad (۷)$$

$$R_p = \frac{(RgD_s)^{0.5} D_s}{\nu} \quad (۸)$$

که در معادله‌های فوق، ρ_s : چگالی رسوبات، ρ_w : چگالی آب شفاف، u_* : سرعت برشی کف، V_s : سرعت سقوط ذرات رسوبی، D : عمق آب، D_s : قطر ذره رسوبی، ν : لزوجت آب و g : شتاب ثقل می‌باشد.

آکیاما و فوکوشیما و گاریسا و پارکر نشان دادند که داده‌های اندازه‌گیری شده وابستگی واضحی بین D/D_s و E_s را نشان نمی‌دهد (۳):

$$E_s = f\left(\frac{u_*}{v_s}, R_p\right) \quad (۹)$$

و در نهایت متغیر شدت اختلاط رسوبات به صورت زیر انتخاب شده است:

$$Z = \frac{u_*}{v_s} R_p^n \quad (۱۰)$$

بر این اساس، آکیاما و فوکوشیما و آکیاما و استفان داده‌ها را برای رسوبات یکنواخت استفاده کردند تا رابطه زیر را برای E_s به دست بیاورند (۳):

$$E_s = \begin{cases} 0, & \text{for } Z < Z_c \\ 3 \times 10^{-12} Z^{10} \left(1 - \frac{Z_c}{Z}\right), & \text{for } Z_c < Z < Z_f \\ 0.3, & \text{for } Z > Z_f \end{cases} \quad (۱۱)$$

که

$$Z = \frac{u_*}{v_s} R_p^{0.5} \quad (۱۲)$$

در معادله‌های فوق Z_c و Z_f مقادیر ثابتی هستند که طبق نظر آکیاما و فوکوشیما مقادیر Z_c و Z_f به ترتیب برابر با ۵ و $13/2$ می‌باشند (۳).

قشمی نیز برای داده‌های آزمایشگاهی خود که بر روی رسوبات با اندازه‌های مختلف انجام داده است رابطه زیر را پیشنهاد داده است (۳):

1- Fan

2 - Middleton

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در یکی از فلوم‌های موجود در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد، که دارای ۹/۲۵ متر طول، ۵۰ سانتی‌متر عرض و ۷۵ سانتی‌متر ارتفاع می‌باشد. نمایی از این فلوم در شکل (۲) نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مخزن بزرگ جریان غلیظ به وسیله پمپ به میزان لازم از آب پر می‌شد سپس به مقدار لازم از مواد رسوبی در مخزن ریخته و به وسیله پمپی که کنار مخزن بود ماده رسوبی با آب کاملاً مخلوط می‌شد، سپس آب زلال توسط پمپ اول به مخزن آب زلال با ارتفاع پمپاژ می‌شد که از آن طریق آب زلال وارد انتهای فلوم که به منزله مخزن آب ساکن در آزمایش‌ها بود وارد می‌شد. منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده نیز در شکل (۳) نشان داده شده است. فلوم مورد استفاده در این تحقیق از دو بخش تشکیل شده، قسمت اول شامل مخزنی برای ورود جریان غلیظ به فلوم بود که با یک دریچه از فلوم آب زلال جدا شده بود و قسمت دوم فلوم که حدود ۸ متر طول داشت همان مخزن سیال ساکن آزمایش‌ها بود. در حین پر شدن فلوم از آب زلال جریان غلیظ توسط پمپی که در کنار مخزن جریان غلیظ بود به مخزن جریان با هد ثابت پمپاژ می‌شد که با باز کردن شیر پمپ مقدار دبی مورد نیاز به مخزن پمپاژ شده و از آن طریق وارد مخزن جریان پشت دریچه می‌شد. پس از این که سطح جریان غلیظ با سطح آب ساکن در فلوم برابر می‌شد دریچه را به مقدار حدود یک سانتی‌متر باز کرده تا جریان غلیظ وارد فلوم آب ساکن شود. هنگامی که جریان غلیظ وارد سیال ساکن می‌شد در طول مسیر در شش نقطه از فلوم مستقیماً از بدنه و پیشانی جریان نمونه‌گیری می‌شد. در مجموع تعداد ۱۰۸ بار غلظت از بدنه و پیشانی جریان غلیظ رسوبی نمونه‌گیری شد. سرعت پیشانی جریان غلیظ با استفاده از کرنومتر اندازه‌گیری و هنگامی که جریان غلیظ به انتهای فلوم می‌رسید دریچه خروجی فلوم را به اندازه‌ای باز کرده که هم جریان غلیظ اضافی از فلوم خارج شود و هم جریان برگشتی به وجود نیاید.

در تعدادی از آزمایش‌ها که جهت بررسی ضریب حمل رسوب بدنه در جریان‌های غلیظ با غلظت کمتر از ظرفیت حمل انجام شد، از غلظت‌ها به مقداری استفاده شد که کمتر از ظرفیت حمل رسوب جریان در بدنه و رأس بود و در اکثر آزمایش‌ها رسوب‌گذاری وجود نداشت. لذا هدف از این تحقیق، بررسی عوامل مؤثر بر ضریب حمل رسوب بدنه جریان‌های غلیظ در شرایط غلظت کمتر از ظرفیت حمل می‌باشد در تحقیق حاضر برای نمونه‌گیری از غلظت بدنه جریان در طول فلوم، شیلنگ‌هایی به بدنه فلوم و در فاصله حدود دو تا سه سانتی‌متری از کف فلوم قرار داده شد تا به محض عبور جریان غلیظ

از این نقاط بتوان مستقیماً نمونه گرفت. لذا از متوسط غلظت‌های بدنه که در نزدیک کف نمونه‌گیری شده به عنوان ضرایب حمل رسوب در بدنه استفاده گردید

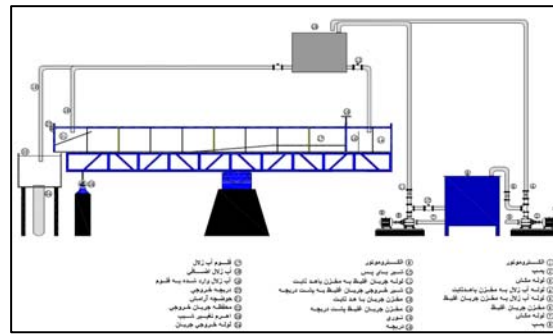
تجزیه و تحلیل نتایج

همچنین چون در تحقیق حاضر از یک نوع ماده رسوبی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده، لذا برای محاسبه پارامتر بی بعد Z از معادله (۱۲) استفاده شده گردید. در شکل‌های (۴) و (۵) روند تغییرات غلظت با فاصله از دریچه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با دور شدن از دریچه، غلظت بدنه به دلیل رسوب‌گذاری کاهش یافته است.

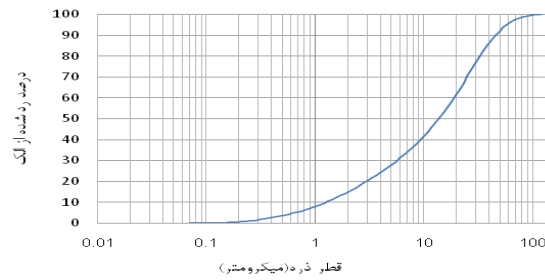
با توجه به این که تغییرات غلظت در سه نقطه انتهایی فلوم کم مشاهده شد، لذا برای محاسبه روابط مربوط به ضریب حمل رسوب بدنه از غلظت‌های این سه نقطه در محاسبات استفاده شد.

در شکل (۶) تغییرات E_{sb} نسبت به پارامتر Z برای جریان‌های غلیظ رسوبی نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی (که در شرایط آزمایشی با افزایش شیب کف و یا دبی جریان محتمل است) ضریب حمل رسوب بدنه افزایش یافته است. همچنین با افزایش غلظت جریان، پارامتر بی بعد Z افزایش یافته و منجر به افزایش E_{sb} می‌شود. همچنین در شکل (۷) تغییرات E_{sb} نسبت به پارامتر Z برای جریان‌های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش Z ضریب حمل رسوب در جریان‌های غلیظ با غلظت کمتر از ظرفیت حمل به شکل توانی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش شیب کف و یا دبی جریان، پارامتر Z افزایش یافته و باعث افزایش E_{sb} خواهد شد.

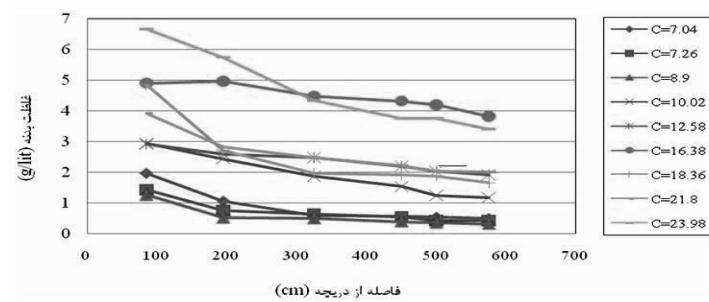
در شکل (۸) نتایج مربوط به تحقیقات محققینی که در مورد ضریب حمل رسوب بدنه در جریان‌های غلیظ تحقیقاتی را انجام داده‌اند به همراه نتایج مربوط به تحقیق حاضر نشان داده شده است. همچنین در شکل (۹) تغییرات E_{sb} نسبت به پارامتر Z در جریان‌های غلیظ رسوبی و جریان‌های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل یکجا نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای Z های یکسان، ظرفیت حمل رسوب در بدنه جریان‌های غلیظ بیشتر از ظرفیت حمل رسوب در بدنه جریان‌های غلیظ رسوبی است. یکی از دلایل این امر آنست که چون در جریان‌های غلیظ با غلظت کمتر از ظرفیت حمل، رسوب‌گذاری وجود ندارد، این جریان‌ها در شرایط یکسان نسبت به جریان‌های غلیظ رسوبی، رسوب بیشتری را با خود به پایین دست حمل می‌کنند و بیشتر فرسایش ایجاد می‌کنند نه رسوب‌گذاری. همچنین لازم به ذکر است که غلظت بدنه در آزمایش‌ها در محدوده ۶۶۶۰-۳۲۰ میلی‌گرم بر لیتر قرار داشت.



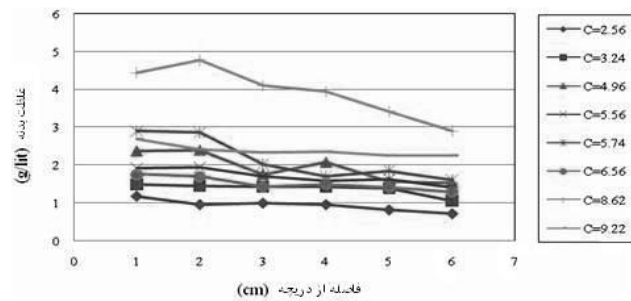
شکل ۲- شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی



شکل ۳- منحنی دانه بندی رسوبات مورد استفاده

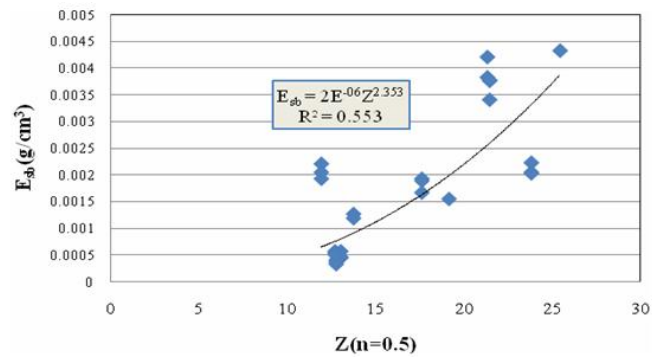


شکل ۴- روند تغییرات غلظت بدنه با فاصله از دریچه در جریان غلیظ رسوبی

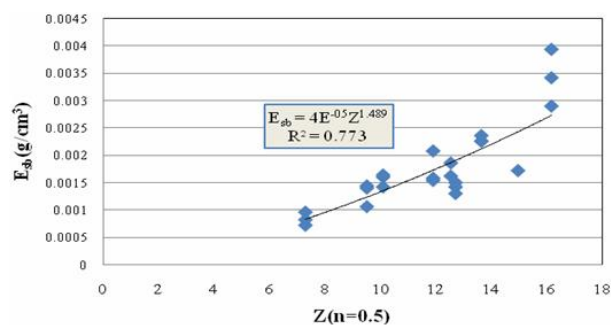


شکل ۵- روند تغییرات غلظت بدنه با فاصله از دریچه در جریان غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل

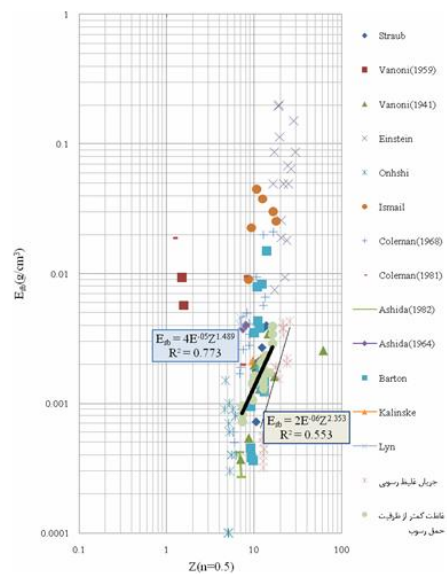
بشاورد و همکاران: بررسی پارامترهای مؤثر بر ضریب حمل...



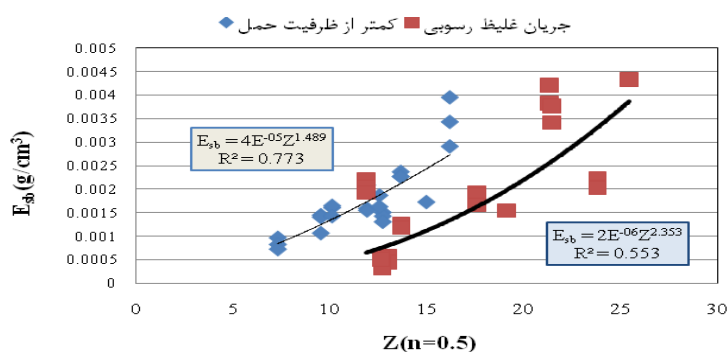
شکل ۶- تغییرات E_{sb} نسبت به پارامتر Z در جریان های غلیظ رسوبی



شکل ۷- تغییرات E_{sb} نسبت به پارامتر Z در جریان های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل



شکل ۸- نتایج تحقیقات محققین و تحقیق حاضر در مورد ضریب حمل رسوب بدنه



شکل ۹- مقایسه ضریب حمل رسوب در جریان های غلیظ رسوبی و جریان های غلیظ با غلظت کمتر از ظرفیت حمل

نتیجه گیری

• تغییرات E_{sb} نسبت به پارامتر Z در هر دو نوع جریان به شکل توانی بود و با افزایش شیب کف و یا دبی جریان، سرعت برشی افزایش یافت که در نهایت منجر به افزایش E_{sb} می شود.

به دلیل عدم رسوب گذاری در جریان های غلیظ با غلظت کمتر از ظرفیت حمل، به ازای Z های یکسان، E_{sb} در جریان های غلیظ با غلظت کمتر از ظرفیت حمل، بیشتر از E_{sb} در جریان های غلیظ رسوبی خواهد بود، که این نسبت در $Z=14$ به دو برابر می رسد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی مدیریت تحقیقات سد و نیروگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام گردیده است. محققین بر خود لازم می دانند از این حمایت ها تشکر و قدردانی نمایند.

• با دور شدن از دریچه، غلظت بدنه در جریان های غلیظ رسوبی به دلیل رسوب گذاری، کاهش می یابد که این کاهش غلظت در جریان های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل، به دلیل عدم رسوب گذاری کمتر مشاهده شد.

• برای ضریب حمل رسوب بدنه در دو نوع جریان غلیظ، روابط زیر پیشنهاد شد:
الف) جریان های غلیظ رسوبی

$$R^2 = 0.553 \quad E_{sb} = 2 \times 10^{-6} Z^{2.353}$$

ب) جریان های غلیظ رسوبی با غلظت کمتر از ظرفیت حمل

$$R^2 = 0.773 \quad E_{sb} = 4 \times 10^{-5} Z^{1.489}$$

منابع

1. Fan, J. 1960. Experimental studies on density currents. *Scientia Sinica*, 9(2): 275-303.
2. Firoozabadi, B., Farhanieh, B. and M. Rad. 2003. Hydrodynamics of two-dimensional laminar turbid density currents." *Scientia Iranica*, Sharif University of Technology, 10,(1):122-130
3. Ghomeshi, M. 1995. Reservoir sedimentation modeling. Ph.D. Thesis, University of Wollongong, Australia.
4. Graf, W. H. 1983. The behavior of silt-laden current. *International Water Power and Dam Construction*, 35(9):33-38.
5. Haghiabi, A. H. 2004. The study of bed slope effect on velocity and concentration profiles of density currents. Ph.D. Thesis, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.
6. Middleton, G. V. 1966. Neal, experiments on density and turbidity currents motion of the head. *Canadian Journal of Earth Science*, No, (3):523-5460.

7. Parker, G., Garcia M., Y. Fukushima, Y. and W. Yu. 1987. " Experiment on turbidity currents over an erodible Bed. J. Hydr. Res., Vol, 25(1):123-147.