

پیشنهاد یک رابطه نیمه تجربی برای برآورد دبی رسوبات معلق رودخانه‌ها

مهدی حبیبی

مسئول بخش مهندسی رودخانه مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

(تاریخ دریافت ۷۶/۵/۲۶، تاریخ تصویب ۷۶/۱۲/۲۳)

چکیده

طی یک صد سال گذشته تلاش زیادی از سوی پژوهشگران و دانشمندان جهان برای ارائه روشهای تجربی و نیمه تجربی محاسبه دبی رسوبات رودخانه‌ای انجام شده است. مروری بر مراجع علمی و مقالات ارائه شده در این بخش نشان می‌دهد که بطور کلی علیرغم تلاش بعمل آمده و استفاده از ضرایب و فاکتورهای اصلاح کننده متعدد، قدرت برآورد روشهای رسوبی موجود مورد رضایت مهندسين هیدرولیک نبوده و لازم است نوآوریهای بیشتری در این زمینه صورت گیرد. در این مقاله با عنایت به نقاط ضعف و قوت روشهای مختلف، رابطه نیمه تجربی جدیدی برای محاسبه دبی رسوبات معلق در آبراهه‌ها ارائه می‌شود. این رابطه براساس مفاهیم اصلی هیدرولیک، انتقال انرژی و حرکت ذرات در جریانات آب و رسوب بدست آمده و بر این فرضیه استوار است که «غلظت رسوبات در هر عمق مشخص از کف کانال متناسب با انرژی جنبشی توربولان ایجاد شده در همان عمق می‌باشد». در کاربردهای اولیه بر روی طیف گسترده‌ای از آمار اندازه‌گیری شده انتقال رسوب در رودخانه‌ها و فلوهای آزمایشگاهی رابطه پیشنهاد شده نشان داده است که در عین سادگی و روانی دارای قدرت محاسباتی بهتری نسبت به روابط مشابه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: هیدرولیک رسوب، انتقال رسوب، بار رسوبی، رسوب معلق، رسوب بستر رودخانه، کانال فرسایشی، انرژی توربولان

مقدمه

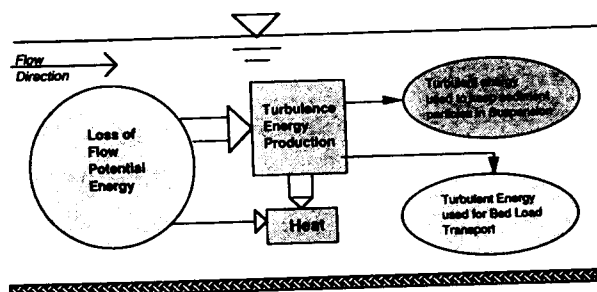
جریان آب در آبراهه‌هایی که دارای بستر فرسایشی می‌باشند باعث شسته شدن ذرات شل بستر و دیواره‌ها شده و آنها را در مسیر جریان به حرکت در می‌آورد. از نظر مهندسی هیدرولیک کلیه ذرات سنگی و معدنی نظیر رس، لای، ماسه، شن و ذرات درشتتر که در اثر جریان آب از جایی به جایی منتقل شده‌اند و یا در حال انتقال هستند به عنوان رسوب شناخته می‌شوند. منابع اصلی رسوبات را می‌توان فرسایش صخره‌ها و سنگها، خوردگی خاکهای سطحی حوضه‌های آبریز در اثر بارندگی و جاری شدن آب، فرسایش بستر آبراهه‌ها و تخریب غارگونه دیواره‌های کانالها و رودخانه‌های طبیعی نام برد.

بار رسوبی شناخته می‌شوند. چگونگی حمل و نقل مواد رسوبی و قانونمندی حاکم بر آن یکی از شاخه‌های اصلی هیدرولیک می‌باشد که طی چند دهه گذشته بطور مستمر مورد تحقیق و مطالعه واقع شده است. این موضوع در حال حاضر یکی از محورهای کاری شاخص آزمایشگاه‌ها و مراکز هیدرولیکی سراسر دنیا می‌باشد. کاربرد دیگر فرمولهای برآورد دبی رسوبی رودخانه‌ها در ساختن مدل‌های ریاضی و کامپیوتری حرکت آب و رسوب است. در بسیاری از این مدلها لازم است از یک سلسله روابط مشخص برای برآورد دبی یا غلظت رسوب در مقاطع مختلف آبراهه استفاده شود.

یکی از سئوالات مهم در زمینه انتقال رسوب این است که «یک جریان آب با خصوصیات هیدرولیکی معین چه

در علم هیدرولیک حرکت مواد در طول آبراهه را پدیدۀ «انتقال رسوب» می‌گویند. و مواد در حال حرکت به عنوان

انرژی توربولان تبدیل می‌شود. بخش عمده انرژی توربولان تولید شده نیز به گرما تبدیل می‌شود، اما قسمت کوچکی از آن برای در حالت تعلیق نگه داشتن ذرات رسوب معلق استفاده می‌شود. قسمت کوچک دیگری نیز برای انتقال رسوبات بارکف بکار می‌رود.



شکل ۱: تبادل انرژی در جریان یکنواخت آب و رسوب.

از دیدگاه دیگر، ذرات رسوب معلق، بدلیل سنگین تر بودن آنها از آب، بایستی پیوسته در سیال سقوط نمایند. از اینرو تعلیق بطور پیوسته و در حالت متعادل فقط و فقط وقتی ممکن است که از طرف سیال نیرویی رو به بالا و در جهت عکس سقوط به ذرات رسوب وارد شود. این نیروی رو به بالا توسط نوسانات توربولان سرعت تأمین می‌شود و مقدار آن بستگی به تولید انرژی توربولان جریان دارد.

با توجه به بحث انجام شده فرض می‌شود که در هر عمق y از کف کانال یک قسمت از تولید انرژی توربولان جریان برای نگاه داشتن ذرات رسوب در حالت تعلیق بکار می‌رود، و این قسمت خاص معادل کاری است که توسط نوسانات رو به بالای سرعت جریان روی ذرات معلق انجام می‌شود تا وزن مستغرق آنها را تحمل کرده و نیروی ثقل عامل سقوط ذرات را خنثی نماید.

بدست آوردن فرمول توزیع غلظت

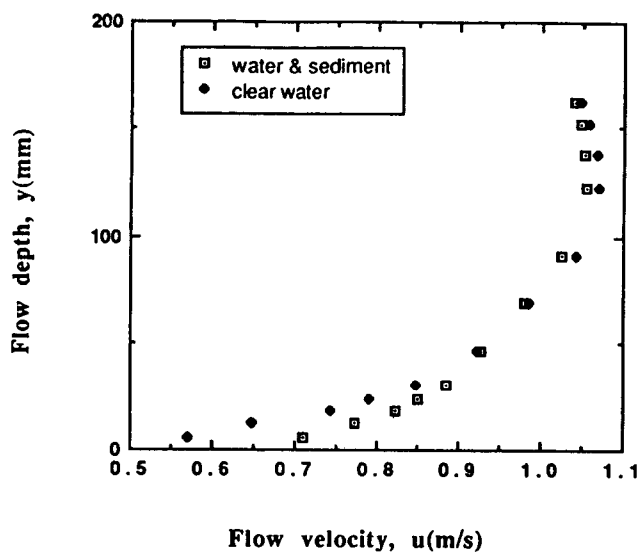
بر اساس مرجع شماره [۱۰] در یک جریان توربولان مقدار کل نرخ تولید انرژی توربولان در واحد حجم سیال E_T در عمق y از کف کانال عبارت است از:

$$E_T = \tau \cdot \frac{du}{dy} \quad (1)$$

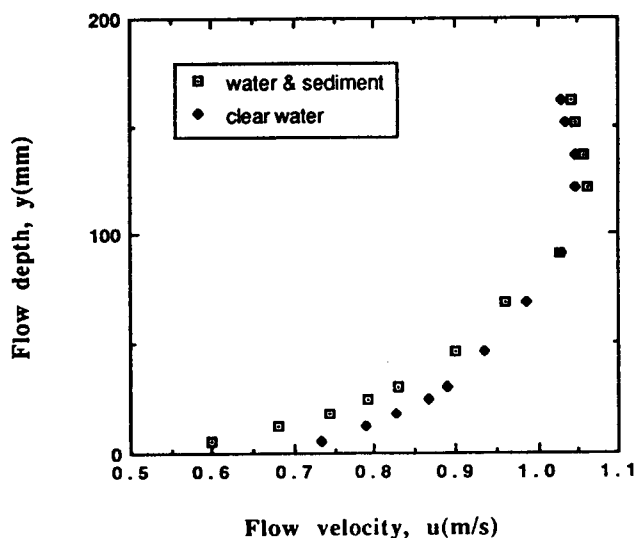
میزان رسوب می‌تواند حمل نماید؟» به بیان دیگر چگونه می‌توان بار رسوبی یک آبراهه را تخمین زد؟ طی چند دهه گذشته تعداد زیادی از محققین و دانشمندان هیدرولیک تلاش کردند که رابطه بین حجم یا جرم رسوب انتقالی با پارامترهای هیدرولیکی جریان و نیز مشخصات مواد و مصالح بدنه آبراهه را پیدا نموده و از این طریق دبی رسوب را به صورت تابعی از این عوامل بیان نمایند. ولی علیرغم سعی و کوشش انجام شده و ارائه بیش از ۵۰ روش مختلف برای تخمین و محاسبه بار رسوبی آبراهه‌ها متأسفانه هیچ‌کدام از روشها تاکنون مقبولیت عام و جهانی نیافته است. بررسیهای انجام شده توسط محققین مختلف نشان داده است که هر یک از این روشها تنها در شرایط هیدرولیکی و رسوبی خاصی نتایج رضایتبخش داشته و در بسیاری از موارد مقادیر بار رسوبی برآورد شده اختلاف فاحشی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در رودخانه‌های طبیعی و کانالهای آزمایشگاهی دارد. از اینرو تحقیقات و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه در سراسر دنیا جهت رسیدن به تئوریه‌ها و روابط آسانتر، دقیقتر و کاربردی‌تر در حال انجام می‌باشد. در این مقاله فرمول نیمه تجربی جدیدی بر اساس مفاهیم اصلی هیدرولیک و انتقال انرژی برای برآورد دبی رسوبات معلق در رودخانه‌ها ارائه می‌شود.

پایه نظری (تئوریک) فرمول جدید

بطور کلی حالت تعلیق به عنوان شکلی از انتقال رسوب که در آن وزن ذرات بوسیله نوسانات و آشفتگی‌های جریان توربولان تحمل می‌شود تعریف شده است [۵]. از مطالعه و بررسی تئوریه‌های مختلف انتقال رسوب چنین استنباط می‌شود که توربولان موجود در جریان مهمترین عامل در تعلیق ذرات است [۱، ۶]. برای اینکه درک بهتری از رابطه توربولان - تعلیق حاصل شود جریان یکنواخت آب و رسوب در کانال شکل ۱ را در نظر بگیرید. همینطور که مخلوط آب و رسوب به سمت پایین دست حرکت می‌کند انرژی پتانسیل جریان بطور پیوسته کاهش می‌یابد. بخش کوچکی از این کاهش انرژی بصورت گرمایی از دست می‌رود و بقیه آن به



شکل ۲: مقایسه پروفیل‌های سرعت برای آب خالص و آب همراه رسوب (قطر رسوب ۰/۱۰۵ میلیمتر).



شکل ۳: مقایسه پروفیل‌های سرعت برای آب خالص و آب همراه رسوب (قطر رسوب ۰/۲۱۰ میلیمتر).

رابطه ۳ گرادیان سرعت بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{du}{dy} = \frac{U_*}{y\kappa} \quad (4)$$

از جایگزینی روابط ۲ و ۴ در رابطه ۱ نرخ تولید انرژی توربولان در واحد حجم سیال در عمق y عبارت خواهد بود از:

که در آن u سرعت جریان در جهت طولی در عمق y ، τ تنش برشی جریان در عمق y و $\frac{du}{dy}$ گرادیان سرعت در جهت عمودی می‌باشد. بسادگی می‌توان نشان داد که توزیع عمودی تنش برشی در یک جریان دائمی یکنواخت دویعدی با رابطه خطی زیر قابل بیان است:

$$\tau = \rho g (D - y) S \quad (2)$$

که در آن ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب ثقل، D عمق کل جریان، و S شیب سطح آب، یا شیب خط انرژی می‌باشد. برای توزیع عمودی سرعت در یک جریان یکنواخت و آشفته آب بدون رسوب Prandtl(1925-26) [۱۲] رابطه لگاریتمی زیر را ارائه نموده است:

$$\frac{u}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} \quad (3)$$

که در آن U_* سرعت برشی، κ ثابت فن کارمن، y_0 یک عمق کوچک بالای کف کانال است که در آن مقدار u برابر صفر می‌باشد. در حالت جریان آب همراه رسوب فرمول شناخته شده جهانی برای u موجود نیست اما با استفاده از برداشتهای آزمایشگاهی Coleman (1981) [۴] می‌توان نشان داد که برای جریان آب و ماسه توزیع سرعت با توزیع سرعت آب خالص قابل تقریب است. در شکل‌های ۲ و ۳ پروفیل‌های اندازه‌گیری شده سرعت برای آب خالص و آب همراه رسوب بر اساس نتایج آزمایشات Coleman آورده شده‌اند. با توجه به اختلاف ناچیز پروفیل‌های سرعت و میزان دقیقی که بطور معمول در فرمول‌های برآورد دبی رسوبات معلق موجود است به نظر می‌رسد استفاده از رابطه (۳) برای بیان توزیع سرعت جریان آب و رسوب به منظور استفاده در ارائه یک روش برآورد بار معلق که در آن ناحیه نزدیک به بستر در محاسبات وارد نمی‌شود، منطقی باشد.

با استفاده از آمار آزمایشگاهی مراجع شماره [۱۵،۲] آقای Van Rijn (1984) [۱۳] نیز نشان داده است که در جریان‌ات آب و رسوب که در آنها بار رسوبی زیاد نباشد می‌توان رابطه توزیع سرعت لگاریتمی پراندتل را بکار برد. بدین ترتیب با استفاده از

که در این رابطه a ضخامت یک لایه خیلی نازک نزدیک بستر که در آن تعلیق رسوبات ممکن نیست می‌باشد. از جایگزینی C_y از رابطه ۸ و u از رابطه ۳ در رابطه ۹ و انتگرالگیری نتیجه زیر بدست خواهد آمد.

$$q_s = \beta \frac{SDV^2}{2\Delta\omega} \left[1 + \left(\frac{U_*}{\kappa V} \right)^2 \right] \quad (10)$$

که در آن V سرعت متوسط جریان می‌باشد و ضریب β جایگزین شده است تا خط‌هایی را که در اثر استفاده از فرمول پروفیل سرعت آب خالص بجای توزیع سرعت در آب همراه با رسوب در محاسبات بار معلق وارد می‌گردد شامل شود. در بدست آوردن رابطه ۱۰ پارامتر تناسب β مستقل از Δ فرض شده و a مساوی γ_0 در نظر گرفته شده است.

بحث درباره اینکه آیا β یک ثابت است و یا تابعی از خصوصیات دیگر جریان آب و رسوب می‌باشد یکی از جنبه‌های مهم روش محاسبه بار معلق ارائه شده می‌باشد که در حال حاضر در دست تحقیق است ولی براساس مطالعات فعلی و مقایسه با آمارهای اندازه‌گیری شده رودخانه‌ای و آزمایشگاهی مقدار ثابت 0.02 برای β پیشنهاد می‌شود.

آزمایش کارآئی فرمول بار معلق ارائه شده

تعداد ۲۰۱ اندازه‌گیری از انتقال رسوب در کانالهای طبیعی و آزمایشگاهی که در آنها سرعت متوسط جریان از 0.49 متر بر ثانیه تا 2.28 متر بر ثانیه و قطر رسوبات از 0.145 میلیمتر تا 6.30 میلیمتر تغییر می‌کند برای آزمایش کارآئی رابطه ۱۰ استفاده شده‌اند. بدین منظور کمیت τ که به عنوان نسبت دبی رسوب محاسبه شده به دبی رسوب اندازه‌گیری شده تعریف شده است بکار گرفته می‌شود. بدیهی است هر قدر مقدار τ به یک نزدیکتر باشد محاسبه بار معلق دقیق‌تر انجام شده است. نتایج کاربرد رابطه ۱۰ در موارد آزمایشی در نظر گرفته شده به صورت آنالیز آماری مقادیر τ حاصله شامل محاسبه متوسط حسابی τ ، انحراف استاندارد τ ها و درصد τ بین محدوده $0.5-2.0$ خلاصه شده است. بایستی تأکید شود

$$E_T = (\rho g U_* S/\kappa) \cdot (D - y)/y \quad (5)$$

از طرف دیگر نوسانات توربولان سرعت روی ذرات معلق رسوب کار انجام می‌دهند تا از سقوط آنها جلوگیری کنند. این کار برابر با کار نیروی ثقل است و نرخ آن برابر با حاصلضرب وزن مستغرق رسوبات معلق در سرعت سقوط آنها می‌باشد. چنانچه C_y غلظت حجمی مواد معلق در عمق y باشد و ω سرعت سقوط متوسط آنها را نشان دهد، نرخ کار نیروی ثقل در واحد حجم سیال W_G به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$W_G = C_y \omega g (\rho_s - \rho) \quad (6)$$

که در آن ρ_s جرم مخصوص مواد معلق است. کار W_G برابر با انرژی توربولان استفاده شده برای تعلیق است و انرژی توربولان استفاده شده برای تعلیق متناسب با کل تولید انرژی توربولان E_T می‌باشد، پس می‌توان نوشت:

$$W_G = \alpha E_T \quad (7)$$

که در آن α یک پارامتر تناسب مجهول است. چنانچه روابط ۵ و ۶ در رابطه ۷ جایگزین شوند معادله زیر برای بیان توزیع قائم غلظت رسوبات معلق بدست می‌آید:

$$C_y = \alpha \frac{S U_*}{\Delta \kappa \omega} \left(\frac{D - y}{y} \right) \quad (8)$$

که در آن $1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right) \Delta$. رابطه ۸ برای یک لایه نازک نزدیک بستر جائیکه تعلیق رسوبات بدلیل کوچک بودن آشفتگیهای توربولان در مقایسه با اندازه ذرات رسوب ممکن نیست قابل کاربرد نمی‌باشد.

بدست آوردن فرمول بار معلق

نرخ انتقال رسوبات معلق در واحد عرض کانال q_s از انتگرالگیری در عمق حاصلضرب C_y در u بدست می‌آید.

$$q_s = \int_a^D C_y \cdot u \cdot dy \quad (9)$$

۰/۲۵ (میلیمتر) تحت سرعت جریان بالا (تا حدود ۲/۲۸ متر بر ثانیه) و عمدتاً به صورت بار معلق می باشد.

ج - آمار آزمایشگاهی Samaga et al

با استفاده از یک فلوم شیب پذیر به طول ۳۰ متر مرجع شماره [۱۴] تعداد ۳۳ آزمایش بر روی انتقال رسوبات بار کف و بار معلق با چهار نوع دانه بندی مختلف انجام داده اند. در این آزمایشات قطر متوسط رسوبات بین ۰/۲۰ تا ۰/۳۵ میلیمتر و دبی جریان بین ۵ تا ۱۵ لیتر بر ثانیه و عمق جریان بین ۵ تا ۱۰ سانتیمتر تغییر می کرد.

د - آمار آزمایشگاهی Brooks

با استفاده از یک فلوم شیب پذیر مدار بسته مرجع شماره [۳] نوزده مجموعه آزمایش را بر روی انتقال دو نوع ماسه ریز (با قطر متوسط ۰/۱۴۵ و ۰/۰۸۸ میلیمتر) به صورت بار معلق انجام داد. در این آزمایشات شیب کف کانال بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۳ و دبی جریان بین ۵ تا ۱۴ لیتر بر ثانیه تغییر می کرد. نتایج کاربرد رابطه ۱۰ با $\beta = 0.02$ ، $k = 0.4$ و $\alpha = 1/65$ بر روی ۲۰۱ نقطه آماری فوق الذکر در قالب تحلیل آماری مقادیر r در جدول ۱ آورده شده است.

که بخاطر پیچیدگی فرآیند انتقال رسوب و مشکلات و خطاهای اندازه گیری، بخصوص در مورد رودخانه های طبیعی، دبی های رسوبی بطور کلی قابل محاسبه دقیق نیستند. در مبحث انتقال رسوب فرمولی که بتواند در ۷۰ درصد موارد دبی رسوبات را در محدوده دو برابر بیشتر و یا کمتر از مقادیر واقعی محاسبه کند قابل قبول تلقی می گردد.

الف - آمار رودخانه Sacramento

تعداد ۲۰ نقطه آماری از انتقال رسوبات معلق در رودخانه سکرامنتو، کالیفرنیا توسط Nakato (1990) [۱۱] منتشر شده است. این آمار طی سالهای ۱۹۷۷ الی ۱۹۷۹ از دو ایستگاه هیدرومتری برداشت شده و دامنه وسیعی از دبی آب (بین ۱۴۲ تا ۲۲۴۳ متر مکعب بر ثانیه)، سرعت جریان (بین ۰/۵ تا ۱/۸ متر بر ثانیه) و قطر رسوب (بین ۰/۳۳ تا ۶/۳۰ میلیمتر) را پوشش می دهد.

ب - آمار کانالهای جزرومدی هلند

از کانالهای جزرومدی Krammer و Scheldt Estuary تعداد ۱۲۰ اندازه گیری از انتقال رسوب توسط Voogt et al (1991) [۱۶] انجام شده است. آمار ارائه شده بیانگر انتقال رسوبات ریز دانه (با قطر متوسط حدود

جدول ۱- تحلیل آماری نتایج آزمایش کارآبی فرمول ۱۰

منبأ آمار	تعداد نقاط آماری	نسبت r		
		درصد بین ۰/۵-۲/۰	میانگین	انحراف معیار
رودخانه سکرامنتو، ایستگاه Butte City	۱۶	۸۶	۱/۳۰	۰/۹۸
رودخانه سکرامنتو، ایستگاه Clousa	۱۳	۸۲	۰/۸۲	۰/۴۸
کانال جزرومدی Krammer	۶۰	۹۷	۱/۰۳	۰/۳۹
کانال جزرومدی Scheldt Estuary	۶۰	۸۱	۱/۹۵	۱/۳۴
آمار آزمایشگاهی Samaga et al	۳۳	۸۴	۱/۶۴	۰/۸۶
آمار آزمایشگاهی Brooks	۱۹	۱۰۰	۱/۰۰	۰/۴۰

بحث نتایج و پیشنهادات

پارامترهای متعدد دخیل در مباحث انتقال رسوب و با لحاظ مشکلات و محدودیتهای اندازه گیری غلظت و دبی

با توجه به تحلیل آماری جدول ۱ و در نظر گرفتن

ابعادی همگن بودن، بطور کامل تحلیلی بودن، دخالت پارامترهای شناخته شده هیدرولیکی و رسوبی، قابلیت بالا برای کالیبراسیون در محل، و نتایج رضایتبخش حاصله فرمول جدید پیشنهادی بر روابط پیشین ترجیح دارد. کارآیی بالاتر فرمول ارائه شده در مقایسه با فرمولهای گذشته در مقالات دیگری نیز تأیید شده است [۹،۸].

بحث کاملتر و جزئی‌تر تئوری ارائه شده همراه با روابط دیگری که برای محاسبه انتقال بار کف، برآورد غلظت مینا، برآورد غلظت متوسط در عمق و ... تدوین گردیده است توسط Habibi (1994) [۷] بیان شده است. در عین حال بدلیل نقش و اهمیت بالای ضرایب α و β لازم است تحقیقات بیشتری بر روی آنها انجام شده و از این رهگذر دامنه کاربرد تئوری ارائه شده عمق و توسعه بیشتری بیابد.

رسوب در کانالهای طبیعی و آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که فرمول ارائه شده برای برآورد دبی رسوبات معلق، علیرغم شکل ساده‌اش هماهنگی خوب و رضایتبخشی با اندازه‌گیریهای انجام شده نشان می‌دهد. فرمول ارائه شده بخصوص دارای قدرت محاسباتی بالایی برای برآورد نرخ انتقال مصالح بستر ریزدانه می‌باشد. در تمام موارد تست شده بیش از ۸۰ درصد دبی رسوبات معلق محاسبه شده در محدوده ۰/۵ تا ۲/۰ برابر دبی رسوبات اندازه‌گیری شده می‌باشد بویژه برای آمار آزمایشگاهی Brooks و کانال Krammer که در آنها ماسه ریز بصورت بار معلق و تحت سرعت‌های نسبتاً بالا در حال حرکت است این رقم به حدود صد درصد می‌رسد. بدلیل شکل ساده و بدور از پیچیدگی‌های معمول، از نظر

مراجع

- 1- ASCE Task Committee. (1975). "Sedimentation engineering." Published by ASCE, (Reprinted 1977).
- 2- Barton, J. R., and Lin, P. N. (1955). "A study of sediment transport in alluvial streams." *Report 66 JRB2, Civil Engrg.*, Dept., Colorado College, Fortt Collins, Colorado.
- 3- Brooks, Norman H. (1958). "Mechanics of streams with movable beds of fine sand." *Trans. ASCE*, 123(2931), 526-594.
- 4- Coleman, N. L. (1981). "Velocity profiles with suspended sediment." *J. Hydr. Res.*, 19(3), 211-229.
- 5- Einstein, H. A. (1964). "River sedimentation." Section 17-II, pp. 17.35-17.67, *Handbook of Applied Hydrology*, Ven Te Chow(ed), Mc Graw Hill, NY.
- 6- Garde, R. J., and Ranga Raju, K. G. (1985). "Mechanics of sediment transport." 2nd edition, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- 7- Habibi, M. (1994). "Sediment transport estimation methods in river systems." Ph. D. thesis, Dept. of Civil and Mining Eng., University of Wollongong, Wollongong, NSW, Australia.
- 8- Habibi, M., and Sivakumar, M. (1992). "Review of selected methods of sediment transport estimation." *Proc. 11th Australasian Fluid Mechanics Conferene*, Hobart, Tasmania, Australia, 14-18 December, 553-558.
- 9- Habibi, M., and Sivakumar, M. (1993). "Tests on a new method of suspended load estimation." *Proc. Int. Conf. on Environmental Management, Geo-Water and Engineering Aspects*, University of Wollongong, Australia, 8-11 February.
- 10- Hinze, J. O. (1959). "Turbulence: An introduction to its mechanism and theory." McGraw Hill, NY.
- 11- Nakato, T. (1990). "Tests of selected sediment transport formulas." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 116(3), 362-379.
- 12- Prandtl, L. (1925-26). "Uber die ausgebildete turbulentz." *ZAMM*, 5, 136 and *Proc. of II Inter. Congress of Applied Mech.*, Zurich (1926).

- 13- Rijn, L. C. Van (1984). "Sediment transport, part II: Suspended load transport." *J. Hydr. Engrg., ASCE.*, 110(11), 1613-1641.
 - 14- Samaga, R. B., Ranga Raju, G. K., and Garde, J. R. (1986). "Suspended load transport of sediment mixtures." *J. Hydr. Engrg., ASCE.*, 112(11), 1019-1035.
 - 15- Vanoni, V. A, and Brooks, N. H. (1957). "Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, sedimentation laboratory." California Institute of Technology, Report E-68, Pasadena, California.
 - 16- Voogt, L., Rijn, L. C. van, and Den Berg, J. H. van (1991). "Sediment transport of fine sands at high Velocities." *J. Hydr. Engrg., ASCE.*, 117(7), 869-891
-

