

اثر حرکت بار بستر بر مشخصات جریان در کانالهای رسوبی و مجاری با بستر ثابت

علی مهدوی^۱، محمد حسین امید^۲ و صلاح کوچکزاده^۳

۱، ۲، ۳، دانشجوی سابق دوره دکتری، استادیار و دانشیار پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

تاریخ پذیرش مقاله ۸۳/۱۱/۲۱

اثر حرکت ذرات بار بستر بر مقاومت هیدرولیکی در مقابل جریان در کانالهای رسوبی و مجاری با بستر ثابت، در یک کانال آزمایشگاهی شیب‌پذیر به عرض ۰/۲۵ متر و طول ۱۲ متر در دو حالت صاف و زبر مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق دو نوع رسوب شامل ماسه ریز یکنواخت به قطر ۰/۵ میلی‌متر و شن ریز به قطر ۲/۸۴ میلی‌متر استفاده گردید. در آزمایشهای مربوط به کف زبر و جریان رسوبی، کف کانال با همان ذرات مورد استفاده در آزمایش، زبر می‌گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که حرکت بار بستر با ذرات ریز دانه ($d=0.5\text{mm}$) می‌تواند موجب افزایش زبری تا ۵۰ درصد در کانالهای صاف و تا ۷۵ درصد در کانالهای با بستر زبر (زبر شده با قطر نیم میلی‌متر) شود. با توجه به رابطه‌ای که بین عمق جریان و فاکتور اصطکاکی وجود دارد، می‌توان انتظار افزایش عمق به ترتیب ۱۴٪ و ۲۱٪ برای بسترهای صاف و زبر را داشت. میزان افزایش زبری با افزایش قطر، کاهش یافته و برای قطر $d=2.84$ به ۵۰ درصد برای بستر زبر می‌رسد. در توجیه این افزایش می‌توان گفت که ذرات با جذب مومنت سبب کاهش سرعت متوسط و افزایش سرعت برشی می‌گردند که هر دو در جهت افزایش فاکتور اصطکاکی موثر هستند. با افزایش غلظت بار بستر با یک قطر مشخص، فاکتور اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد تا به مقدار ثابتی برسد. پس از این مرحله، افزایش بیشتر غلظت موجب رسیدن به نقطه رسوبگذاری و تشکیل فرمهای بستر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت هیدرولیکی، ضریب زبری، فاکتور اصطکاکی، بار بستر، زبری بار بستر

مقدمه

فاکتورهای مؤثر، شکلهای متفاوتی به خود می‌گیرد. این تغییر شکل بستر، سبب ایجاد مقاومتی بیش از مقاومت ناشی از زبری ذرات در حالت کف صاف شده و پیش‌بینی مقاومت در مقابل جریان با یک ضریب ثابت را مشکل و یا غیر ممکن می‌سازد. ثانیاً، بارهای رسوبی در حال حرکت که، تحت یک شرایط معین، بخشی به صورت بار بستر و بخشی دیگر به صورت بار معلق انتقال می‌یابند، مشخصات جریان و سیال را تغییر داده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی توزیع سرعت، بویژه در نزدیکی کف که غلظت بار رسوبی زیادتر است، و در نتیجه سرعت متوسط می‌گذارند. بنابراین، برای برآورد مقاومت در مقابل جریان و توزیع سرعت در کانالهای فرسایش‌پذیر، لازم است حرکت

در جریان یکنواخت ماندگار در کانالهای روباز با بستر ثابت، یک رابطه معین بین سرعت متوسط جریان، عمق، شیب خط انرژی و مشخصات بستر آبراهه وجود دارد. چنین رابطه‌ای معمولاً به عنوان معادله مقاومت شناخته می‌شود. فرمهای این نوع معادلات و ثابتهای آن، برای جریانهای با بسترهای ثابت به خوبی مشخص شده است. لیکن پیش‌بینی مقاومت جریان و توزیع سرعت در آبراهه‌های آبرفتی به دو دلیل پیچیده می‌باشد. اولاً هنگامی که تنش برشی متوسط کف یک بستر آبرفتی از تنش برشی بحرانی بیشتر شود، ذرات کف شروع به حرکت کرده و بستر صاف اولیه تغییر می‌کند و بسته به شرایط جریان و دیگر

سانگ و همکاران (۱۹۹۸) با انجام آزمایشهایی با استفاده از ذراتی با قطر ۱۲/۳ میلیمتر، به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت بار بستر، موجب افزایش زبری می‌گردد. انجام آزمایشهای بعدی بزرگون (۱۹۹۹) با ذراتی به قطر ۷/۳ میلیمتر نیز نتایج سانگ را تأیید نمود.

تحقیقات یاد شده در بالا نشان دهنده نتایج متناقضی در مورد اثر بار بستر بر روی فاکتور اصطکاکی در کانالهای رسوبی بوده و لذا تحقیق در این زمینه همچنان در نقاط مختلف دنیا ادامه دارد (۱۹). به علاوه، تحقیقات انجام شده تاکنون غالباً با رسوبات درشت‌دانه، که بیشتر در آبراهه‌های طبیعی وجود دارد، صورت گرفته است. در صورتی که حرکت بارهای رسوبی ریز دانه در کانالهای دست‌ساز و شبکه‌های آبیاری که منبع تغذیه آنها رودخانه‌ها می‌باشد و همچنین در مجاری فاضلاب نیز دیده می‌شود. از اینرو، بررسی اثر بارهای رسوبی بر روی ضریب زبری در کانالهای غیر فرسایشی نظیر کانالهای آبیاری، مجاری فاضلاب و کانالهای انتقال رسوب نیز از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. نکته حائز اهمیت در بررسی این موضوع، توجه به تفاوت‌های موجود در انتقال بار بستر در کانالهای غیر فرسایشی با کانالهای آبرفتی می‌باشد. منشأ رسوبات در کانالهای با بستر ثابت، تنها رسوباتی است که از خارج از شبکه وارد جریان می‌گردد. در حالیکه در بسترهای آبرفتی، مواد تشکیل دهنده کف کانال بار بستر را بوجود می‌آورند. بنابراین، ضخامت لایه رسوبی در مجاری ثابت محدود به رسوبات ته‌نشین شده می‌شود، حال آنکه در بسترهای آبرفتی این ضخامت نامحدود می‌باشد. در نتیجه در کانالهای با بستر ثابت، جداره صلب کانال، میزان انتقال رسوب و همچنین شکل بستر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در تحقیق حاضر، اثر حرکت مواد ریزدانه، متشکل از ذرات ماسه ریز به قطر ۰/۵ میلیمتر و شن ریز به قطر ۲/۸۴ میلیمتر، بصورت بار بستر، بر روی توزیع سرعت، مقاومت هیدرولیکی و فاکتور اصطکاکی جریان در شرایط کف صاف و زبر در یک کانال آزمایشگاهی شیب پذیر باز، مورد مطالعه قرار گرفته است.

بارهای رسوبی و تغییرات زبری نیز مورد توجه قرار گرفته و اثرات متقابل آنها بر جریان در نظر گرفته شود.

در مورد مسئله اول، تلاشهای زیادی برای رسیدن به رابطه‌ای بین سرعت متوسط، عمق، شیب و اندازه ذرات صورت گرفته است. بعضی از محققین نظیر لیسلی (۱۹۳۰)، لیو و هوانگ (۱۹۶۱)، گارد و رانگا راجو (۱۹۶۶)، سوچیو (۱۹۷۴)، پاریس (۱۹۸۰)، براون‌لی (۱۹۸۱) و کریم و کندی (۱۹۸۱)، با تخمین سرعت جریان با استفاده از فرمهای توانی و لگاریتمی، سعی در تخمین مقاومت کلی جریان داشتند. بعضی دیگر از محققین، تنش برشی کف، ضریب اصطکاک و یا ضریب سزی را به دو قسمت، یکی برای در نظر گرفتن زبری ذره‌ها و دیگری برای در نظر گرفتن مقاومت فرمهای بستر، تقسیم می‌کنند. از این دسته، می‌توان به میر-پیتر و مولر (۱۹۴۸)، اینشتین و بارباروسا (۱۹۵۲)، انگلوند و هانسن (۱۹۶۷)، گارد و رانگا راجو (۱۹۸۵)، وایت و همکاران (۱۹۸۰)، ون‌راین (۱۹۸۴)، پروسکویا (۱۹۹۱ و ۱۹۹۲) و میلار (۱۹۹۹) اشاره نمود.

تحقیق در مورد مسئله دوم، یعنی اثر حرکت بارهای رسوبی بر مقاومت هیدرولیکی جریان و این که آیا بار بستر فقط در اثر زبری ذرات و ایجاد فرمهای بستر بر روی مقاومت در مقابل جریان تأثیر می‌گذارد، و یا حرکت ذرات نیز بر مقاومت جریان موثر است، موجب به وجود آمدن دو عقیده کلی شده است. دسته اول محققینی هستند که معتقدند، حرکت بار بستر به تنهایی تأثیری بر روی مقاومت جریان ندارد، از این گروه می‌توان از ونونی و نومیکو (۱۹۶۰) و بانگ و هیرانو (۱۹۹۵) نام برد. در مقابل، محققین دیگری از جمله رایکوگزی (۱۹۶۷)، کندی (۱۹۶۹)، ونگ و چین (۱۹۸۵) و مک‌لین (۱۹۹۲) معتقدند که حرکت بار بستر با جذب مومنتم از جریان موجب کاهش سرعت متوسط و افزایش ضریب زبری می‌گردد. در مورد میزان این زبری اضافی، که به آن زبری بار بستر گفته می‌شود، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. ویبرگ و رایبن (۱۹۸۹) در مورد اثر ضخامت لایه بار بستر تحقیقات جامعی انجام داده و زبری بار بستر را تابعی از ضخامت لایه بار بستر بیان کرده‌اند.

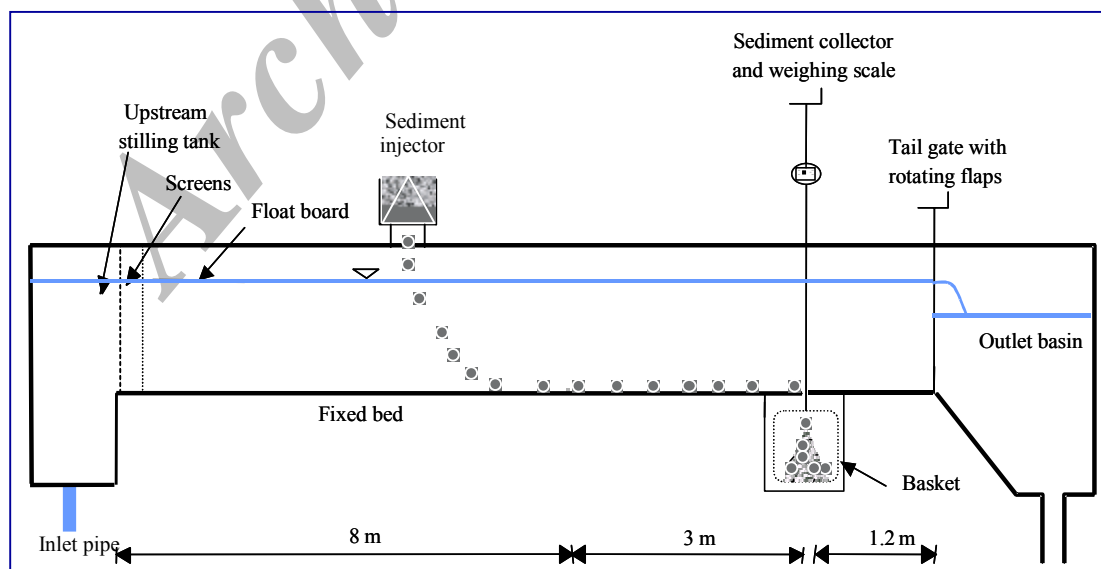
مواد و روش‌ها

مواد رسوبی مورد استفاده در این تحقیق شامل یک نوع ماسه و یک نوع شن ریز بود. ذرات سری اول یک نوع ماسه استاندارد آزمایشگاهی از جنس کوارتز با قطر $d=0.5\text{mm}$ و دانه‌بندی دوم، ذراتی از شن ریز با قطر $d=2.84\text{mm}$ بودند که در آزمایشگاه دانه بندی شده بودند. این قطر، از میانگین حسابی دو الک استاندارد متوالی که ذرات رسوب از آنها عبور داده شده بود، به دست آمده است. وزن مخصوص نسبی هر دو نوع رسوب $2/65$ در نظر گرفته شد. عمل تزریق رسوب توسط یک دستگاه تزریق که برای این آزمایش طراحی و ساخته شده بود، انجام گرفت (شکل ۲-ب).

برای جلوگیری از ورود رسوب به مخزن اصلی، نیاز به سیستمی برای جمع‌آوری رسوب در پایین دست کانال بود. برای این منظور، حوضچه‌ای فلزی به عرض کانال، طول $0/75$ و عمق $0/65$ متر در انتهای آن تعبیه گردید. درون حوضچه سبکی قرار داشت که با واسطه یک ترازوی دیجیتال به یک جرثقیل سقفی آویزان بود. هر بار پس از قرار دادن سبک در داخل حوضچه و آویزان کردن آن به جرثقیل، روی حوضچه توسط یک درپوش، با زبری نزدیک به زبری کف کانال، که بر روی آن نیز شیاری برای ورود رسوبها به درون حوضچه وجود داشت، پوشیده می‌گردید تا یکنواختی جریان بالادست حفظ گردد.

طرح کلی مجموعه کانال و متعلقات آن که در انجام آزمایشهای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، در شکل ۱ نشان داده شده است. کانال مورد استفاده، کانالی شیب‌پذیر به طول ۱۲ متر و عرض $0/25$ متر می‌باشد که با زبر کردن ابتدای آن و با استفاده از تخته‌های شناور در قسمت ورودی و همچنین با استفاده از دریچه پایاب، ایجاد عمق یکنواخت در آن، میسر گردید. بدنه این کانال از جنس شیشه بوده و کف فلزی آن نیز با یک لایه ورق پلاکسی گلاس پوشانده شده بود تا شرایط یکسان زبری کف و دیواره برقرار گردد. در آزمایشهای مربوط به کف زبر و جریان رسوبی، کف کانال با همان ذرات مورد استفاده در آزمایش زبر می‌گردید.

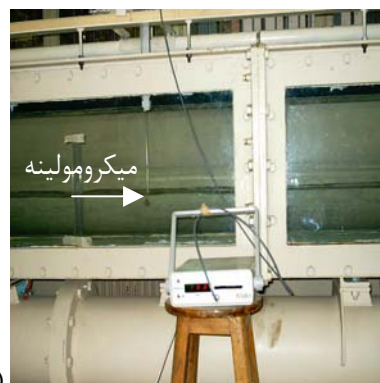
سرعت سنجی در این آزمایشها توسط یک دستگاه میکرومولینه به قطر پروانه ۱۰ میلیمتر که در شش متری از بالادست کانال نصب شده بود، انجام گردید (شکل ۲-الف). محاسبه سرعت با قرائت نمایشگر دستگاه، که قابل تنظیم برای برداشت سرعتهای لحظه‌ای، میانگین ده ثانیه‌ای و میانگین کل بود و استفاده از منحنی واسنجی دستگاه صورت می‌گرفت. در تعدادی از آزمایشها، ثبت داده‌ها بطور مستقیم از طریق اتصال میکرومولینه به یک دستگاه کامپیوتر انجام گردید.



شکل ۱- نمای کلی کانال آزمایشگاهی و متعلقات آن



(ب)



(الف)

شکل ۲- نمایی از سیستمهای تزریق رسوب و اندازه‌گیری سرعت

ذرات مورد استفاده در تزریق پوشانده می‌شد. بدین ترتیب بستر زبر، مانند کف رسوبی بدون وجود فرم بستر عمل می‌نمود. در هر آزمایش، توسط میکرومولینه نصب شده در شش متری از بالادست کانال، دو یا سه پروفیل سرعت در عرض کانال برداشت می‌شد. میانگین این پروفیلها به عنوان پروفیل سرعت مقطع در نظر گرفته شده و در محاسبه فاکتور اصطکاکی مورد استفاده قرار می‌گرفت. نرخ تزریق نیز با چند بار نمونه‌گیری از دستگاه تزریق کننده رسوب در طول آزمایش تعیین و غلظت حاصل از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$C = \frac{I}{QS_s} \quad (1)$$

که در آن C غلظت بار رسوبی (بدون بعد)، I نرخ تزریق (kg/s) ، S_s چگالی ذرات (kg/m^3) و Q دبی جریان (m^3/s) می‌باشد.

به منظور تعیین فاکتور اصطکاکی، از دو روش پروفیل سطح آب و پروفیل سرعت استفاده گردید، که در اینجا اساس و چگونگی محاسبات هر دو روش آورده شده است. با توجه به معادله داریسی ویسباخ داریم:

$$f = \frac{8RgS_f}{U^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق S_f شیب خط انرژی، U سرعت متوسط مقطع $g(\text{m/s}^2)$ شتاب ثقل و R شعاع هیدرولیکی (m) می‌باشد. با دقت در رابطه بالا مشاهده می‌گردد که در یک جریان مشخص، با معلوم بودن سرعت متوسط و شعاع

همانطور که گفته شد، هدف از این تحقیق، بررسی اثر حرکت بار بستر بر روی مقاومت در مقابل جریان بود که به این منظور چهار سری آزمایش طراحی گردید.

آزمایشهای سری اول به بررسی صحت انجام آزمایشها و محاسبات و همچنین محاسبه فاکتور اصطکاکی کانال آزمایشگاهی اختصاص داشت. بدین منظور، یک سری آزمایش در بستر صاف کانال، بدون تزریق رسوب انجام گردید و نتیجه آن با نتایج حاصل از معادله کلبروک- وایت مقایسه گردید.

آزمایشهای سری دوم، آزمایش با بستر صاف، همراه با تزریق رسوب بود. در این آزمایشها، نرخ رسوب از بالادست به گونه‌ای تنظیم می‌شد که از ظرفیت انتقال رسوب جریان کمتر باشد تا از ایجاد فرمهای بستر جلوگیری شود. لذا زبری اندازه‌گیری شده به این طریق، برابر با مجموع زبری ذره و زبری ناشی از حرکت آن می‌باشد.

آزمایشهای سری سوم، آزمایشهای بستر زبر بدون تزریق رسوب بود. در این آزمایشها ذرات رسوب توسط یک لایه رنگ به کف کانال چسبیده شده بودند. بنابراین زبری حاصل از این آزمایشها مربوط به زبری ذره بدون حرکت بود. مقایسه نتایج آزمایشهای سری دوم و سوم مشخص کننده اثر حرکت بار بستر بر مقاومت جریان می‌باشد.

برای مشاهده اثر حرکت بار بستر در بسترهای آبرفتی، آزمایشهای سری چهارم یعنی بستر زبر همراه با تزریق رسوب طراحی شد. در این سری از آزمایشها، کف کانال با یک لایه از

با کم کردن دو معادله فوق از یکدیگر و با تقسیم معادله بر Δx داریم:

$$\frac{H_2 - H_1}{\Delta x} = \frac{Z_2 - Z_1}{\Delta x} + \frac{\left(Y_2 + \frac{U_2^2}{2g}\right) - \left(Y_1 + \frac{U_1^2}{2g}\right)}{\Delta x} \quad (6)$$

در نتیجه:

$$S_f = S_0 + S_E \quad (7)$$

S_0 شیب کانال می‌باشد و مقدار آن مشخص است. مقدار S_E

نیز با برازش یک خط بر منحنی تغییرات $Y + \frac{U^2}{2g}$ بدست می‌آید. پس از تعیین S_f ، با استفاده از معادله (۲)، مقدار فاکتور اصطکاکی محاسبه می‌شود. از این روش با توجه به نوسانات سطح آب و دشواری تعیین پروفیل دقیق سطح آب، در آزمایشات بعدی استفاده نشد.

همانطور که گفته شد، در این روش برای محاسبه فاکتور اصطکاکی نیاز به تعیین سرعت برشی می‌باشد. در این تحقیق سرعت برشی با استفاده از قانون لگاریتمی توزیع سرعت تعیین گردید. در اینجا دو روش برای محاسبه u_* از قانون لگاریتمی توزیع سرعت آورده می‌شود.

با در نظر گرفتن قانون لگاریتمی توزیع سرعت به فرم زیر (چاو، ۱۹۷۳):

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (8)$$

داریم:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{h}\right) + \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{y_0}\right) \quad (9)$$

اگر رابطه فوق را به صورت لگاریتمی در پایه ۱۰ بنویسیم، داریم:

$$u = \frac{2.3u_*}{\kappa} \log\left(\frac{y}{h}\right) + \frac{2.3u_*}{\kappa} \log\left(\frac{h}{y_0}\right) \quad (10)$$

در معادلات فوق u ، سرعت جریان در عمق y ، κ ، ثابت ون کارمن، h ، عمق جریان و y_0 ، پارامتر زبری، می‌باشد. معادله فوق

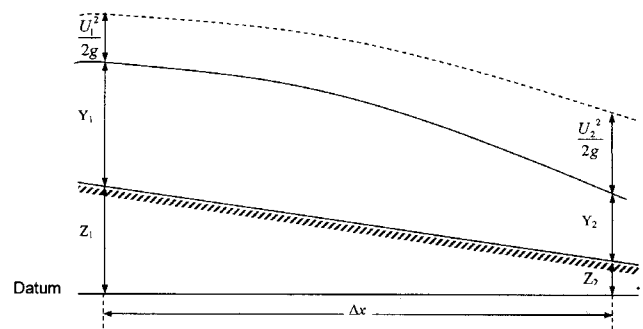
هیدرولیکی، تنها مجهول برای محاسبه f شیب خط انرژی می‌باشد. این مسئله اساس تعیین فاکتور اصطکاکی در روش پروفیل سطح آب می‌باشد.

در روش دوم، از توزیع سرعت برای محاسبه سرعت برشی و در نتیجه فاکتور اصطکاکی استفاده گردید. با توجه به رابطه سرعت برشی $u_* = \sqrt{gRS}$ و با جایگذاری آن در معادله (۲) داریم:

$$f = 8\left(\frac{u_*}{U}\right)^2 \quad (3)$$

بنابراین برای یک جریان مشخص، با معلوم بودن سرعت متوسط، تنها مجهول برای محاسبه فاکتور اصطکاکی در این روش u_* می‌باشد. این مسئله اساس محاسبه فاکتور f به روش پروفیل سرعت می‌باشد.

این روش که فقط در بخشی از آزمایشهای با بستر صاف و بدون تزریق رسوب مورد استفاده قرار گرفت، براساس قرائت پروفیل سطح آب و بدست آوردن شیب خط انرژی استوار می‌باشد. در این روش برای هر دبی، با تغییر درجهٔ پایین دست کانال، چند حالت مختلف از لحاظ شیب سطح آب ایجاد شده و شیب خط انرژی در هر حالت با تعیین پروفیل سطح آب به صورت زیرتعیین می‌گردید. با نوشتن معادلهٔ برنولی برای مقاطع ۱ و ۲ در شکل ۳ داریم:



شکل ۳- انرژی در یک کانال با جریان متغیر تدریجی

$$H_1 = Z_1 + Y_1 + \frac{U_1^2}{2g} \quad (4)$$

$$H_2 = Z_2 + Y_2 + \frac{U_2^2}{2g} \quad (5)$$

توزیع عمومی سرعت برای بسترهای صاف و زبر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) + B_1 \quad (17)$$

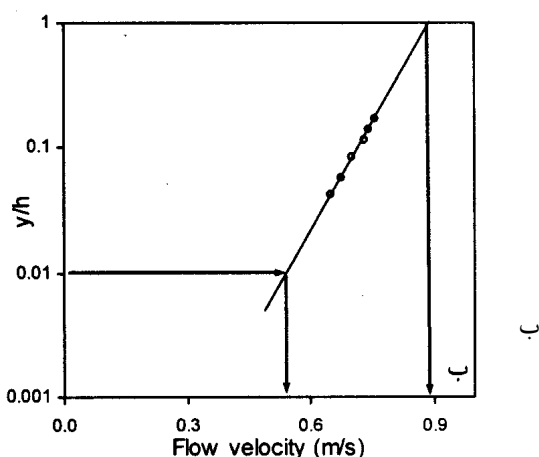
$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + B_2 \quad (18)$$

به منظور محاسبه u_* روابط فوق را به صورت زیر باز نویسی می‌کنیم:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(y) + B'_1 \quad (19)$$

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(y) + B'_2 \quad (20)$$

اگر دو معادله فوق در مقیاس نیمه لگاریتمی رسم شوند، خطی بدست می‌آید که شیب آن $\frac{u_*}{\kappa}$ می‌باشد. حال اگر از آن قسمت از پروفیل سرعت برداشت شده در آزمایشگاه که از توزیع لگاریتمی سرعت پیروی می‌کند ($k_s < y < 0.2h$) خطی برازش داده شود، شیب آن $\frac{u_*}{\kappa}$ خواهد بود. در شکل ۵ تغییرات سرعت در مقابل $\ln(y)$ مربوط به یکی از آزمایشها رسم شده است.



ب- تغییرات سرعت در عمق در مقیاس نیمه لگاریتمی

نشان دهنده یک خط در مقیاس لگاریتمی می‌باشد. بنابراین، چنانچه تغییرات سرعت در عمق را که نمونه‌ای از آن در شکل ۴-الف نشان داده شده است، در یک مقیاس نیمه لگاریتمی مانند شکل ۴-ب رسم نموده و خطی مستقیم به داده‌های سرعت در منطقه توزیع لگاریتمی برازش دهیم، سرعت برشی در کف و پارامتر زبری y_0 به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{y}{h} = 1 \rightarrow u = 0.89 \text{ m/s} \quad (11)$$

$$\frac{y}{h} = 0.01 \rightarrow u = 0.53 \text{ m/s} \quad (12)$$

با جایگذاری در معادله (۱۰) داریم:

$$0.89 = 0 + \frac{2.3u_*}{\kappa} \log\left(\frac{h}{y_0}\right) \quad (13)$$

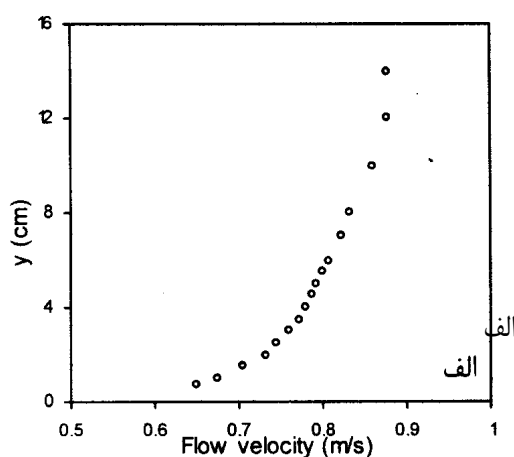
$$0.53 = -2 \times \frac{2.3u_*}{\kappa} + \frac{2.3u_*}{\kappa} \log\left(\frac{h}{y_0}\right) \quad (14)$$

با کم کردن دو معادله فوق از یکدیگر داریم:

$$0.89 - 0.53 = 0.36 = 4.6 \times \frac{u_*}{\kappa} \rightarrow u_* = \frac{0.36\kappa}{4.6} = 0.0032 \text{ m/s} \quad (15)$$

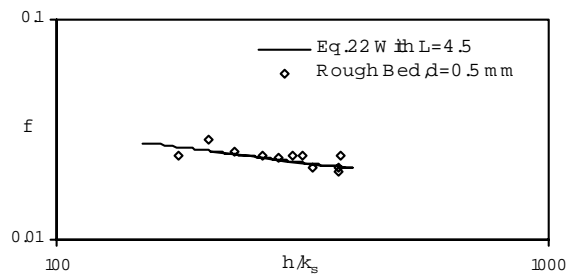
با توجه به معادله (۱۳) داریم:

$$\log\left(\frac{h}{y_0}\right) = \frac{0.89\kappa}{2.3u_*} = 2.46 \rightarrow \frac{h}{y_0} = 286.3 \rightarrow y_0 = 0.00062 \text{ m} \quad (16)$$



الف- تغییرات سرعت در عمق

شکل ۴- پروفیل سرعت در یک کانال مستطیلی



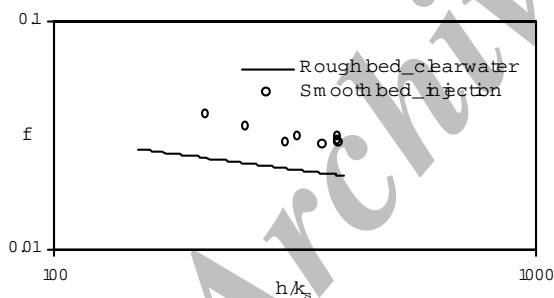
شکل ۷- مقادیر f آزمایشگاهی و تئوری (معادله (۲۲)) در مقابل $\frac{h}{k_s}$

از معادله توزیع لگاریتمی سرعت به شکل زیر، با ثابت $L=4/5$ تبعیت می‌کند (سانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{h}{k_s}\right) + L \quad (22)$$

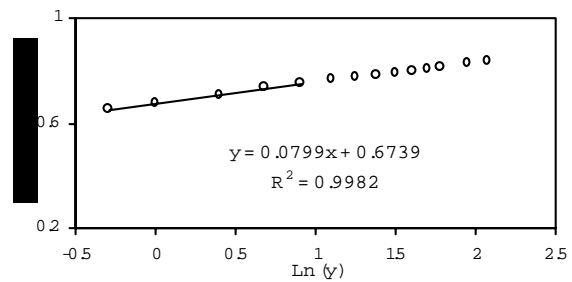
همانطور که گفته شد، زبری حاصله از نتایج این سری از آزمایشها مبین زبری ذره می‌باشد.

به منظور مشاهده اثر حرکت بار بستر، نتایج آزمایشهای سری دوم به همراه خط حاصل از معادله (۲۲) با ثابت $L=4/5$ در شکل ۸ آورده شده است. نقاط نمایش داده شده در این شکل نشان دهنده افزایش ضریب زبری در اثر حرکت بار بستر می‌باشد.



شکل ۸- مقادیر f حاصل از آزمایشهای سری دوم و خط حاصل از معادله (۲۲)

شکل ۹، اثر حرکت بار بستر در بسترهای آبرفتی را نشان می‌دهد. در این شکل نتایج آزمایشهای سری سوم و چهارم به همراه خط حاصل از معادله (۲۲) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان افزایش فاکتور اصطکاکی در بسترهای آبرفتی بیشتر از بسترهای ثابت می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به بالاتر بودن زبری بستر آبرفتی و حرکت جهشی ذرات (jumping)، در کف کانال نسبت داد.



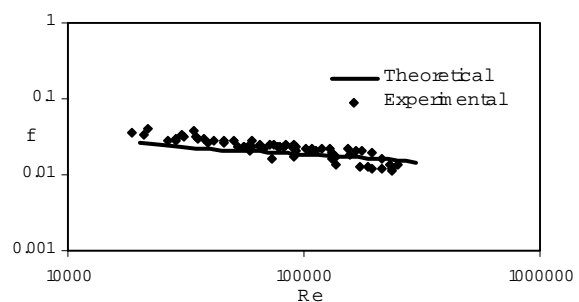
شکل ۵- تغییرات سرعت در مقابل عمق در مقیاس لگاریتمی لذا داریم:

$$\frac{u_*}{\kappa} = 0.0799 \rightarrow u_* = 0.0032 \quad (21)$$

همانطور که دیده می‌شود، تفاوتی بین دو روش وجود ندارد. در این تحقیق، پس از مقایسه دو روش و اطمینان از وجود دقت کافی، از روش دوم بدلیل سادگی بیشتر استفاده گردید.

نتایج و بحث

شکل ۶ نتیجه حاصل از آزمایشهای سری اول را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر f در مقابل عدد رینولدز نمایش داده شده است. نقاط نمایش داده شده در این گراف نشان دهنده مقادیر f حاصل از آزمایش و خط به دست آمده نیز خط حاصل از معادله کلبروک- وایت می‌باشد.



شکل ۶- مقادیر f آزمایشگاهی و حاصل از کلبروک- وایت در مقابل Re

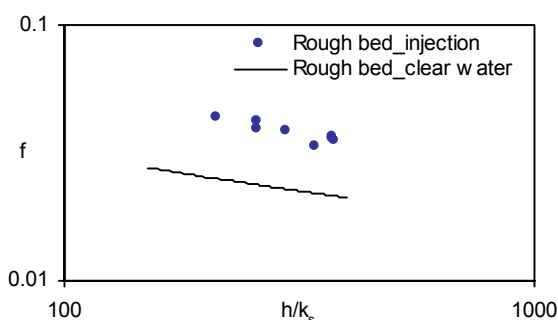
همانطور که مشاهده می‌شود، بین نتایج آزمایشگاهی و معادله کلبروک - وایت، تطابق خوبی وجود دارد.

مقادیر f در مقابل $\frac{h}{k_s}$ مربوط به آزمایشهای سری سوم بر روی قطر ۰/۵ میلیمتر در شکل ۷ ارائه گردیده است. این شکل نشان می‌دهد که نقاط آزمایشگاهی از خط حاصل

$\frac{h}{k_s}$ فاکتور اصطکاکی بستر زبر بدون تزریق رسوب با همان می‌باشد. همانطور که در شکل نیز مشخص است، در ازای یک غلظت ثابت، میزان افزایش فاکتور اصطکاکی در بستر زبر با قطر ۲/۸۴ میلیمتر، برابر با میزان افزایش فاکتور اصطکاکی در بستر صاف با قطر ۰/۵ میلیمتر می‌باشد.

در تفسیر این پدیده می‌توان گفت که حرکت بار بستر، با جذب مومنتم از جریان، بدلیل ایجاد گردابه‌هایی در پشت ذرات، هنگام شتاب گرفتن در جهت جریان، موجب افزایش فاکتور اصطکاکی می‌شود. لذا هر چه تعداد ذرات بیشتر باشد، جذب مومنتم بیشتر شده و فاکتور اصطکاکی بیشتر افزایش می‌یابد. به همین دلیل از آنجاییکه برای یک غلظت ثابت، افزایش قطر موجب کاهش تعداد ذرات می‌شود، لذا تاثیر حرکت بار بستر نیز کمتر می‌شود. بنابراین بر خلاف عقیده دوم که میزان زبری بار بستر را تابعی از غلظت می‌دانست، بنظر می‌رسد که این زبری علاوه بر غلظت، تابعی از تعداد ذراتی که در واحد سطح عبور می‌کنند، نیز می‌باشد.

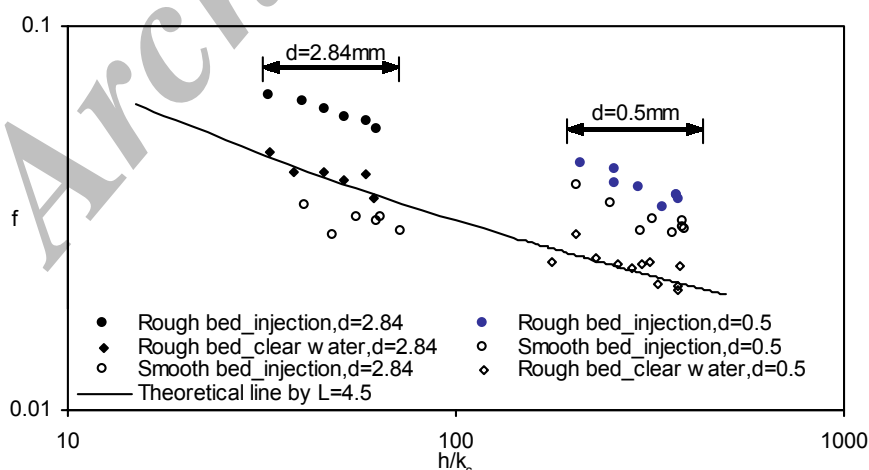
برای پاسخ به این سؤال که چگونه حرکت بار بستر موجب افزایش فاکتور اصطکاکی می‌شود، پروفیل سرعت برای شرایط مختلف (کف صاف و زبر، بدون تزریق و با تزریق) بررسی گردید. نمونه‌ای از این منحنیهای توزیع سرعت، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



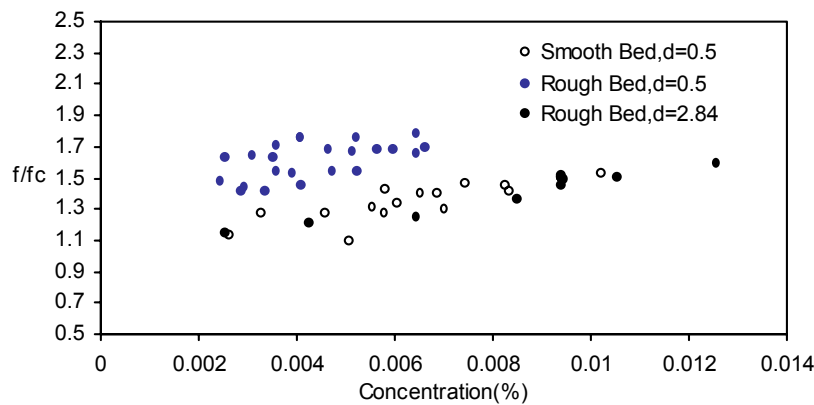
شکل ۹- مقادیر آزمایشهای سری چهارم همراه با خط حاصل از معادله (۲۲)

به منظور بررسی بهتر نتایج، گرافهای مربوط به آزمایشهای سری دوم، سوم و چهارم به همراه خط حاصل از معادله (۲۲) مربوط به دو قطر استفاده شده در این تحقیق، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. دقت در این شکل دو نکته را روشن می‌سازد. اولاً در قطر ۲/۸۴ میلیمتر، حرکت بار بستر روی بستر صاف موجب کاهش فاکتور اصطکاکی شده است. ثانیاً میزان افزایش فاکتور اصطکاکی در اثر حرکت بار بستر با افزایش قطر کاهش می‌یابد. این مطلب در شکل ۱۱ نیز به خوبی روشن است.

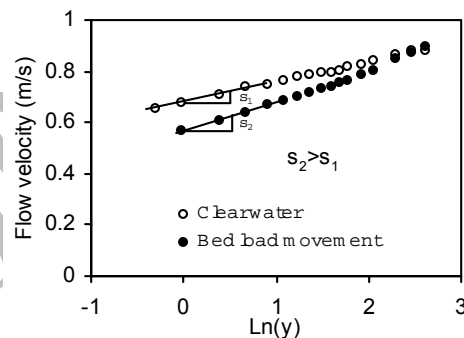
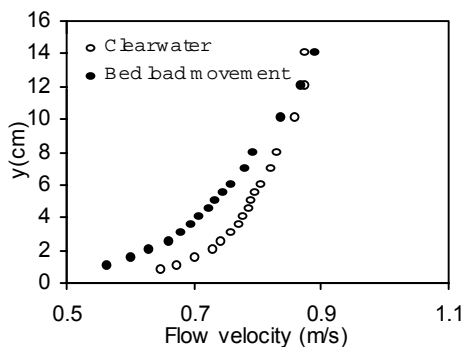
در این شکل نسبت $\frac{f}{f_c}$ که نشان دهنده میزان افزایش فاکتور اصطکاکی نسبت به آب صاف می‌باشد، در مقابل غلظت رسم شده است. در اینجا، f فاکتور اصطکاکی بستر متحرک و f_c



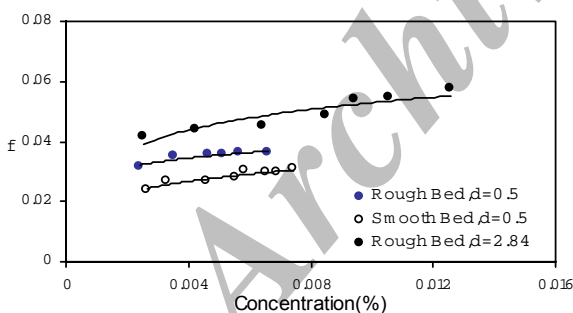
شکل ۱۰- مقادیر f حاصل از تمامی آزمایشها در مقابل $\frac{h}{k_s}$ به همراه خط حاصل از معادله (۲۲)



شکل ۱۱- تغییرات $\frac{f}{f_c}$ در مقابل غلظت



شکل ۱۲- پروفیل‌های سرعت مربوط به قبل و بعد از تزریق رسوب



شکل ۱۳- تغییرات فاکتور اصطکاکی در مقابل غلظت برای قطرها و شرایط متفاوت

شکل فوق نشان می‌دهد که افزایش غلظت تا حدی باعث افزایش فاکتور اصطکاکی می‌شود. لیکن افزایش بیشتر آن تغییری در ضریب اصطکاکی ایجاد نمی‌کند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که، این سطح ثابت مصادف با شروع رسوبگذاری و تشکیل فرمهای بستر می‌باشد.

همانطور که ملاحظه می‌گردد، حرکت باربستر بر توزیع سرعت تأثیر گذاشته و سبب کاهش سرعت در قسمت پایین منحنی توزیع سرعت می‌شود. این امر دو نتیجه به همراه دارد، اولاً سرعت متوسط کاهش می‌یابد، ثانیاً شیب بخش پایینی توزیع لگاریتمی سرعت افزایش می‌یابد، که این به معنی افزایش $\frac{u_*}{K}$ و در نهایت افزایش u_* می‌باشد. با در نظر گرفتن معادله (۳)، مشخص می‌گردد که، افزایش u_* و کاهش L ، موجب افزایش f خواهد شد.

به منظور بررسی اثر غلظت بر روی فاکتور اصطکاکی، در بعضی از آزمایشهای هر سری، با ثابت نگهداشتن شرایط جریان، نرخ تزریق ذرات افزایش داده شد تا اثر غلظت بر روی فاکتور اصطکاکی مشخص شود. در شکل ۱۳ نمونه‌ای از تغییرات f در مقابل غلظت آورده شده است.

با توجه به این که رسوبات موجود در کانالهای آبیاری اکثراً ریزدانه هستند، حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به رابطه‌ای که بین عمق جریان و فاکتور اصطکاکی وجود دارد، می‌توان انتظار افزایش عمق به ترتیب به میزان ۱۴٪ و ۲۱٪ را برای بسترهای صاف و زبر داشت. با وجود رسوبات غیر یکنواخت در کانالها، افزایش بیشتر عمق نیز دور از انتظار نیست.

با افزایش غلظت بار بستر، فاکتور اصطکاکی نیز افزایش می‌یابد تا به مقدار ثابتی برسد. پس از این مرحله، افزایش بیشتر غلظت موجب رسیدن به نقطه رسوبگذاری و تشکیل فرمهای بستر خواهد شد که افزایش بیشتر مقاومت هیدرولیکی را در پی خواهد داشت. از این مرحله به بعد، فاکتور اصطکاکی شامل سه بخش زبری ذره، زبری حرکت ذرات و زبری فرمهای بستر می‌باشد. برای یافتن تغییرات زبری در مرحله گذار از کف صاف به کف موج و دست‌یابی به روابطی برای تعیین وزن هر یک از مقاومت‌های ناشی از زبری ذرات، فرمهای بستر و حرکت ذرات، نیاز به تحقیقاتی بیشتر با محدوده گسترده‌تری از شرایط هیدرولیکی و قطر ذرات می‌باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش مستخرج از طرح بررسی رابطه بار بستر و مقاومت در مقابل جریان در کانالهای رسوبی و مجاری با بستر سخت به شماره ۷۱۱/۳/۵۰۰ می‌باشد که با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است. بدینوسیله از ایشان برای تامین اعتبار و ایجاد فضای مناسب تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

در این تحقیق، اثر حرکت ذرات رسوبی ریز دانه برمنحنی توزیع سرعت، ضریب زبری و مقاومت هیدرولیکی جریان در کانال‌های با بستر صاف و زبر، در یک کانال آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش، تئوری مبنی بر افزایش فاکتور اصطکاکی در حضور بار بستر را تأیید می‌کند. توجه به شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ضریب زبری بستر صاف با تزریق رسوب به قطر ۰/۵ میلی‌متر، تقریباً معادل ضریب زبری کف زبر شده با قطر ۲/۸۴ میلی‌متر بدون تزریق می‌باشد. این مسئله را می‌توان به جذب مومنتم توسط ذرات از جریان که سبب کاهش سرعت متوسط و افزایش سرعت برشی می‌گردد، نسبت داد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که:

زبری بار بستر تابعی از ضخامت لایه بار بستر و تعداد ذرات در حال حرکت در واحد سطح می‌باشد. از آنجایی که گردابه‌های ایجاد شده در پشت ذرات هنگام شتاب گرفتن در جهت جریان، موجب افت بیشتر می‌شود، لذا هر چه تعداد ذرات بیشتر باشد، زبری بار بستر نیز افزایش می‌یابد (با فرض غلظت ثابت، با کاهش قطر، تعداد ذرات در واحد حجم افزایش می‌یابد). با افزایش قطر ذرات در یک غلظت ثابت، بدلیل کاهش تعداد ذرات در واحد سطح، اثر حرکت بار بستر نیز کاهش می‌یابد.

حرکت بار بستر با ذرات ریز دانه ($d=0.5\text{mm}$) می‌تواند موجب افزایش زبری تا ۵۰ درصد در کانالهای صاف و تا ۷۵ درصد در کانالهای با بستر زبر (زبر شده با قطر نیم میلی‌متر که نشان دهنده بستر رسوبی بدون فرم بستر می‌باشد) شود. میزان این افزایش با افزایش قطر، کاهش یافته و برای قطر $d=2.84\text{mm}$ به ۵۰ درصد برای بستر زبر می‌رسد. این مسئله،

منابع مورد استفاده

۱. فرشی، ح.، افضل‌مهر، ح. و م. حیدرپور. ۱۳۸۰. بررسی مشخصات تئوری لایه‌های مرزی در رودخانه‌های شنی، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
۲. مهدوی، ع.، امید، م. ح. و ص. کوچک زاده. ۱۳۸۱. بررسی اثر حرکت بار بستر بر روی مقاومت هیدرولیکی جریان در کانالها. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی رودخانه. اهواز، ایران.
3. Bergeron, N. E. & P. Carboneau. 1999. The Effect of Sediment Concentration on Bed Load roughness, J. Hydrological Processes, Vol. 13(16): 2583-2589.
4. Chow, V. T. 1973. Open channel Hydraulics. McGraw-hill Company, International edition.

5. Garde, R. J. & K. G. Ranga Raju,. 1966. Resistance relationships for alluvial channel flow. JHD, Proc. ASCE, Vol.92 (4).
6. Garde, R. J. & K. G. Ranga Raju. 2000. Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems. 3rd edition, John Wiley & Sons. New Delhi.
7. Karim, M. F. & J. F. Kennedy. 1981. Computer based predictors for sediment discharge and friction factor of alluvial streams. Report No. 242, Iowa Institute of hydraulic Research.
8. Lacey, G. 1930. Stable channels in alluvium. Min. Proc. ICE(London), Vol. 229
9. Lam Lau, Y. 1983. Suspended Sediment Effect on Flow Resistance, J. Hyd. Eng., Vol. 109(5), 757-763.
10. Liu, H. K. & S. Y. Hwang. 1961. Discharge formula for straight alluvial channels, Trans. ASCE, Vol. 126.
11. Lovera, F. & J. F. Kennedy. 1969. Friction factor for flat-bed flows in sand channels. J. Hydr. Div., ASCE, 95(4), 1227-1234.
12. Lyn, D. A. 1991. Resistance in Flat-Bed Sediment-Laden Flows, J. Hyd. Eng., Vol. 117(1), January: 94-114.
13. Mclean, S. R. 1992. On the calculation of suspended load for non cohesive sediments. J. Geophys. Res., 97(C4), 5759-5770.
14. Meyer-Peter, E. & R. Muller. 1948. Formula for bed load transport. Proc. IAHR, 2nd Congress, Stockholm, 1984, cited in grade, R. J. and Ranga Raju, K. G., 1985
15. Millar, R. G. 1999. Grain and form resistance in gravel Bed Rivers. Journal of hydraulic research, Vol. 37(3), 303-312.
16. Omid, M.H. 2001. Erosion of sediment deposits from rigid rectangular channels, Ph D. Thesis, Department of civil and construction engineering, the University of Manchester institute of science and technology.
17. Paris, E. 1980. New criteria for predicting the frictional characteristics in alluvial streams: A comparison. IAHR symposium on river engineering and its Interaction with hydrological and hydraulic research, Belgrade.
18. Ryckoczi, L. 1967. Experiment study of flume bed roughness. Symp. Pf 2nd Int. Assn. for Hydr. Res., Vol. 1, Fort Collins, Colo., 181-186.
19. Song, T., Y. M. Chiew, & C. O. Chin. 1998. Effect of Bed Load Movement on Friction Factor, J. Hyd. Eng., Vol. 124(2), February, 165-167.
20. Vanoni, V. A. & G. N. Nomicos. 1960. Resistance properties of sediment-laden streams. Trans. Am. Soc. Civ. Engrs., ASCE, 125, 1140-1175.
21. Van Rijn, L. C. 1984. Sediment transport, Part I: Bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), Vol. 110(10), 1431-1455.
22. Wang, Z., & N. Chien. 1985. Experimental study of motion of laminated load. Scientia Sinica a, 28(1), 102-112.
23. White, W. R., E. Paris, & R. Bettess. 1980. The frictional characteristics of alluvial streams: A new approach. Proceeding of Institution of civil engineers, part 2, Vol. 69, 737-750.
24. Wiberg, P. L. & D. M. Rubin. 1989. Bed roughness produced by saltating sediment. J. Geophys. Res., 94, 5011-5016.
25. Yang, Y. & M. Hirano. 1995. A discussion on uniform flow in open channel with moveable gravel bed. J. Hydr. Res., Vol. 33(6), 877-879.