مطالعه آزمایشگاهی تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان در بسترهای صلب و صاف

محمد امیرزاده قاسمی[۱]، صلاح کوچک زاده[۲] و محمد حسین امید[۳]

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۴/۰۱
تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۵/۲۵

چکیده

تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان اگر چه به‌طور گسترده مورد مطالعه محققین مختلف بوده است اما به‌دلیل گزارش نتایج غیرهمسو همچنان مورد بررسی و آزمون قرار دارد. در این تحقیق، تاثیر بار معلق بر ضریب اصطکاک جریان بر بسترهای صلب و صاف به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. تجهیزات آزمایشگاهی که برای این مطالعه به کار گرفته شد از کانالی به طول ۲۰/۴ متر، عرض ۰/۲ متر و عمق ۰/۳ متر، مخزن ذخیره آب و اختلاط رسوب تشکیل شده است. سامانه نمونه‌گیر رسوب ویژه‌ای برای این مطالعه ایجاد شد و بده جریان توسط روزنه‌ای که قبلاً واسنجی شده بود اندازه‌گیری می‌شد. داده‌های جمع‌آوری شده در این تحقیق نشان دهنده دامنه‌ای از عدم تاثیر تا کاهش ضریب اصطکاک جریان بوده است. همچنین شکل تغییرات ضریب اصطکاک جریان وابسته به عدد رینولدز ذره ارائه شد. نتایج به‌دست آمده با نتایج محققینی که قبلاً در این زمینه کار کرده‌اند مورد مقایسه قرار گرفت و از میان روابط ارائه شده بهترین رابطه تعیین تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان بر اساس داده‌های بررسی شده پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی : بارمعلق، بستر صاف، بستر صلب، ضریب اصطکاک جریان، مطالعه آزمایشگاهی.

Archive of SID

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد m_amirgh@yahoo.com
[۲] استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران skzadeh@ut.ac.ir
[۳] دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران momid@ut.ac.ir

www.SID.ir

مقدمه

با توجه به اهمیت عامل ضریب اصطکاک جریان در طراحی هیدرولیکی کانال‌ها و همچنین گذر جریان‌های غیرماندگار در رودخانه‌ها، برای تعیین اثر بار معلق بر این ضریب یا توجیه نتایج غیرهمسو که تاکنون توسط محققین مختلف ارائه شده، مطالعات در این زمینه همچنان ادامه دارد. این مطالعه هم برای بررسی موضوع و آزمون روش‌های مختلف که توسط محققین قبلی ارائه شده است، انجام شد.

مطالعات محققین در خصوص تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان در چند دهه اخیر، نتایج غیر همسو ارائه کرده است به نحوی که برخی از محققین به کاهش ضریب اصطکاک معتقدند (Itakura and Kishi,1980), (Vanoni & Nomicos, 1959), (Parker & Coleman,1984),(Celino & Graf,1999), (Wang et al,1998) (Peng et al,2001),(Coleman,1981), برخی از محققین افزایش ضریب اصطکاک جریان را گزارش نمودند(Lyn,1991) (Arora et al,1986)؛ برخی از محققین نیز هم کاهش و هم افزایش ضریب اصطکاک جریان را نشان داده‌اند (Kereselidze & Kutavaia,1995), (Khullar et al,2007), (Vanoni & Brooks,1957) و بلاخره دسته‌ای دیگر از محققین عدم تغییر ضریب اصطکاک جریان را مشاهده کردند. (Coleman,1981), (Kereselidze & Kutavaia,1995), (Khullar et al, (۱۹۷۲)[1] معیارهای (۳) و (۴) را برای مقاطع پوشش شده ارائه کردند. U، سرعت متوسط جریان؛ S، شیب انرژی و C_m، غلظت متوسط حجمی می‌باشد (Arora et al.,1986). لین (۱۹۹۱) ضریب اصطکاک جریان حاوی بارمعلق را با ضریب اصطکاک جریان آب صاف همسان مقایسه نمود. وی جریان آب صاف همسان با جریان حاوی بارمعلق را بر اساس عدد رینولدز جریان و اندازه زبری برابر با قطر ذرات رسوب تعیین کرد و بر اساس داده‌های مطالعه خود و مطالعات محققین پیشین نتیجه گرفت که ضریب اصطکاک جریان در اثر بارمعلق افزایش می یابد (Lyn,1991).

$$f_S/f_0<1 \qquad C_m\omega_0/US<1200 \qquad (۳)$$

(2007 . هر دسته از محققین دلایلی را برای این نتایج متناقض بیان داشتند به‌عنوان مثال آیپن و مونتز (۱۹۷۳) علت کاهش ضریب اصطکاک جریان را پر شدن خلل و فرج بستر با ذرات ریزدانه بارمعلق و در نتیجه کاهش زبری بستر دانستند (Lyn,1991). اما آرورا و همکاران (۱۹۸۶) و ونونی و نومیکوس (۱۹۵۶) کاهش یا افزایش ضریب اصطکاک جریان را وابسته به تاثیر بارمعلق بر توربلانس دانستند (Arora et al.,1986),(Nomicos ,1956).

دسته‌ای از محققین سعی کردند که افزایش و کاهش زبری را با وضع شرط‌هایی، قانونمند نمایند. در این راستا پولیا (۱۹۷۸) تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان را مطالعه نمود و نتیجه گرفت که:

$$f_S/f_0<1 \qquad (\tilde{v}')^{0.5}/\omega_0>200 \qquad (۱)$$

$$f_S/f_0>1 \qquad (\tilde{v}')^{0.5}/\omega_0<100 \qquad (۲)$$

$\tilde{v}'$ متوسط زمانی نوسانات سرعت در راستای قائم نزدیک به بستر؛ ω_0، سرعت سقوط ذره رسوب؛ f_S، ضریب اصطکاک جریان حاوی بار معلق و f_0 ضریب اصطکاک جریان آب صاف می‌باشد. آرورا و همکاران (۱۹۸۶)، f_S/f_0 را وابسته به $C_m\omega_0/US$ دانستند و با استفاده از داده‌های خود، پولیا (۱۹۷۸) و تگارت

$$f_S/f_0>1 \qquad C_m\omega_0/US>1200 \qquad (۴)$$

خولار و همکاران (۲۰۰۷) با تحلیل قسمتی از داده‌های پولیا (۱۹۷۸) و آرورا و همکاران (۱۹۸۳) نتیجه گرفتند که معیار آرورا و همکاران (۱۹۸۶) نقص دارد. ایشان بر اساس تمام داده‌های پولیا (۱۹۷۸)، آرورا و همکاران (۱۹۸۳) و تگارت (۱۹۷۲) معیار زیر را برای مقاطع پوشش شده ارائه کردند (Khullar et al,2007).

$$C_m^{0.125}(u_*d_{50}/\upsilon)<0.65 \qquad (۵)$$

$f_S/f_0<1$

$$C_m^{0.125}(u_*d_{50}/\upsilon)\geq 0.65 \qquad (۶)$$

$f_S/f_0>1$

[1] Taggart

Archive of SID
www.SID.ir

υ لزجت سینماتیک، d_{50} قطر ذره رسوب معلق و u_* سرعت برشی جریان می‌باشد. ونونی و بروکس (۱۹۵۷) با مطالعه تاثیر بار معلق بر ضریب اصطکاک جریان در شرایط بستر صلب و فرسایش‌پذیر نتیجه گرفتند که کاهش ضریب اصطکاک جریان، به‌دلیل اثر رسوب بر توربلانس می‌باشد. همچنین ایشان نتیجه گرفتند که تغییرات ثابت ون کارمن در اثر بار معلق همبستگی بالایی با نسبت کار انجام شده برای تعلیق بار معلق در مجاورت بستر به اتلاف انرژی کل دارد که این نتیجه‌گیری؛ نظر باکلی [1](۱۹۲۲) و چین [2](۱۹۵۶) در خصوص روی دادن بیشترین اثر بار معلق بر توربلانس در ناحیه نزدیک به بستر را تایید می‌کند. (Vanoni & Brooks,1957). نومیکوس (۱۹۵۶) نیز نشان داد که شدت اتلاف انرژی برای تعلیق رسوب در ناحیه نزدیک به بستر مهمتر از سایر نواحی جریان می‌باشد (Nomicos,1956). سلینو و گرف (۱۹۹۹) نتیجه گرفتند که شدت توربلانس در اثر بارمعلق کاهش می‌یابد (Celino & Graf,1999). لیو و سینگ (۲۰۰۴) نیز نتیجه گرفتند که ذرات ریزدانه توربلانس جریان را ضعیف و ذرات درشت دانه توربلانس جریان را شدید می‌کند (Liu & Singh, 2004). رشیدی و همکاران (۱۹۹۰) نتیجه گرفتند که ذرات پلی‌استر درشت دانه (۱/۱میلیمتر) موجب افزایش شدت توربلانس و ذرات پلی‌استر ریزدانه (۰/۱۲میلیمتر) موجب کاهش شدت توربلانس می‌شوند. (Rashidi et al.,1990).

علاوه بر مطالعات فوق، محققین تغییرات زبری تحت تاثیر بار معلق را فرموله کردند. خولار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های استفاده شده آرورا و همکاران (۱۹۸۶) که در گستره $C_m^{0.125}(u_*d_{50}/\upsilon)\geq 0.65$ قرار گرفت، رابطه(۷) را برای تخمین تغییرات ضریب اصطکاک جریان حاوی بارمعلق بستر های صلب پیشنهاد نمودند.

$$f_{bS}/f_{b0} = \exp(8*10^{-6}(S_S-1)C_m\omega_0/US) \qquad (۷)$$

S_S، چگالی نسبی ذرات رسوب؛ f_{bS}، ضریب زبری مربوط به کف جریان حاوی بارمعلق و f_{b0} ضریب زبری مربوط به کف جریان آب صاف می‌باشد. خولار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از قسمتی از داده‌های پولیا که در گستره $C_m^{0.125}(u_*d_{50}/\upsilon)<0.65$ قرار گرفت، رابطه(۸) را برای تخمین ضریب اصطکاک جریان حاوی بار معلق بر بسترهای صلب در ناحیه $C_m^{0.125}(u_*d_{50}/\upsilon)<0.65$ ارائه نمودند (رابطه ۸). ایشان برای تعیین ضریب اصطکاک جریان حاوی بار معلق در کانال‌های فرسایش‌پذیر، رابطه(۹) را پیشنهاد کردند (Khullar et al,2007).

$$f_{bS}/f_{b0}=1-10^{-12}[(S_s-1)C_m\omega_0/US]^3+10^{-8}$$

$$[(S_s-1) \qquad (۸)C_m\omega_0/US]^2 \qquad -5*10^{-5}$$

$$[(S_s-1)\ C_m\omega_0/US] \qquad (۸)$$

$$f_{bS}/f_{b0}=1-2*10^{-5}(S_s- \qquad (۸)$$

$$1)C_m\omega_0/US$$

محققین به‌صورت تحلیلی نیز تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان را مطالعه نمودند به‌عنوان مثال ایتاکورا و کیشی (۱۹۸۰) با مطالعه تئوری تاثیر بار معلق بر ضریب اصطکاک جریان و براساس طول مونین-اباخو [3] رابطه(۱۰) را برای محاسبه ضریب اصطکاک جریان حاوی بارمعلق پیشنهاد نمودند (Itakura & Kishi,1980). g، شتاب ثقل؛ κ، ثابت ون کارمن؛ δ، عمق سرعت حداکثر؛ α، ضریب مونین- اباخوف (ایتاکورا و کیشی $\alpha=7$ را پیشنهاد نمودند)؛ f_S، ضریب اصطکاک جریان حاوی بارمعلق و f_0، ضریب اصطکاک جریان آب صاف می‌باشد.

$$(8/f_s)=\sqrt{(8/f_0)}+\alpha\delta[\kappa g(S_s-1) \qquad (۹)$$

$$\sqrt{C_m\omega_0/u_*^3}]/2\kappa$$

پارکر-کلمن (۱۹۸۴) با مطالعه تئوری تاثیر بار معلق بر ضریب اصطکاک جریان روابط (۱۱) و (۱۲) را برای

[1] Buckley
[2] Chein
[3] Monin-obukhov length

Archive of SID
www.SID.ir

محاسبه f_S/f_0 جریان حاوی بارمعلق ارائه نمودند. رابطه(۱۲) بر اساس توزیع سرعت کولز[1] به‌دست آمده است (Parker & Coleman,1984). A، ثابت توزیع لگاریتمی؛ U_0، سرعت متوسط جریان آب صاف؛ υ، لزجت سینماتیکی؛ f، ضریب اصطکاک جریان و Π، ضریب ویک (wake) می‌باشد.

$$f_S/f_0=1-2*(S_s-1)\ C_m\omega_0/U_0S \qquad (۱۰)$$

$$(8/f)=1/\kappa[\ln(u_*\delta/\upsilon)+(\kappa A-1)+\Pi] \qquad (۱۱)$$

√

به علت سختی اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی کف، محققین سرعت برشی را با روش‌های غیرمستقیم تعیین می‌کنند. این روش‌ها عبارتند از $(ghS)^{0.5}$، $(gRS)^{0.5}$، توزیع لگاریتمی سرعت و توزیع تنش برشی مانند تنش کل $\tau=\mu(du/dy)-\rho\langle u'v'\rangle$، تنش لزجت $\tau_v=\mu(du/dy)$ و تنش تلاطم $\tau_t= -\rho\langle u'v'\rangle$. h، عمق جریان؛ R، شعاع هیدرولیکی؛ ρ، دانسیته آب؛ τ، تنش کل؛ τ_t، تنش تلاطم؛ τ_v، تنش لزجت؛ μ، لزجت دینامیک؛ u' و v'، نوسانات سرعت موضعی از مقدار متوسط زمانی ؛ y، فاصله از بستر و u، سرعت موضعی جریان می‌باشد. کلمن (۱۹۸۱) با مقادیر اندازه‌گیری شده با لوله پرستن[2] در محور کانال، شیب انرژی و رابطه $u_*=(gh(S-S_W))^{0.5}$ منحنی‌های واسنجی تعیین u_* را آماده نمود و با استفاده از این منحنی‌ها، سرعت برشی جریان حاوی رسوب را تعیین نمود. نسبت b/h مطالعه وی ۲/۱ است. (Coleman,1981-1986). S_W افت ناشی از دیواره کانال و b، عرض کانال می‌باشد. آرورا و همکاران (۱۹۸۶) از روشی مشابه با آب صاف برای تعیین سرعت برشی آب حاوی رسوب استفاده نمود. لین (۱۹۹۱) از توزیع خطی تنش رینولدز برای تعیین سرعت برشی در جریان حاوی بارمعلق استفاده نمود. نسبت b/h در مطالعه لین (۱۹۹۱) ۴/۷-۴/۱ بود (Lyn,1991). سلینو و گرف (۱۹۹۹) از تنش رینولدز برای تعیین سرعت برشی استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که پروفیل تنش رینولدز و در نتیجه سرعت برشی در اثر بارمعلق تغییر نمی‌کند

این نتیجه با نتایج ماست و پیتل (۱۹۹۷) و وو و جولین (۱۹۹۰) انطباق دارد (Celino & Graf,1999), (Must and Patel,1997), (Woo & Julien,1990) . ونونی (۱۹۴۶) سرعت برشی را با $(ghS)^{0.5}$ و ایشتن و چین (۱۹۵۵) و خولار و همکاران (۲۰۰۷) نیز مقدار سرعت برشی را با $(gR_bS)^{0.5}$ همانند آب صاف تعیین نمودند. نسبت b/h در مطالعه ونونی (۱۹۴۶)؛ ۵/۷ ، ایشتن و چین (۱۹۵۵)؛ ۲/۵ و خولار و همکاران (۲۰۰۷)؛ ۲/۵-۰/۸۴ بود (Khullar et al, 2007), (Simonz & Senturk ,1990), (Nomicos,1956).

مواد و روش‌ها

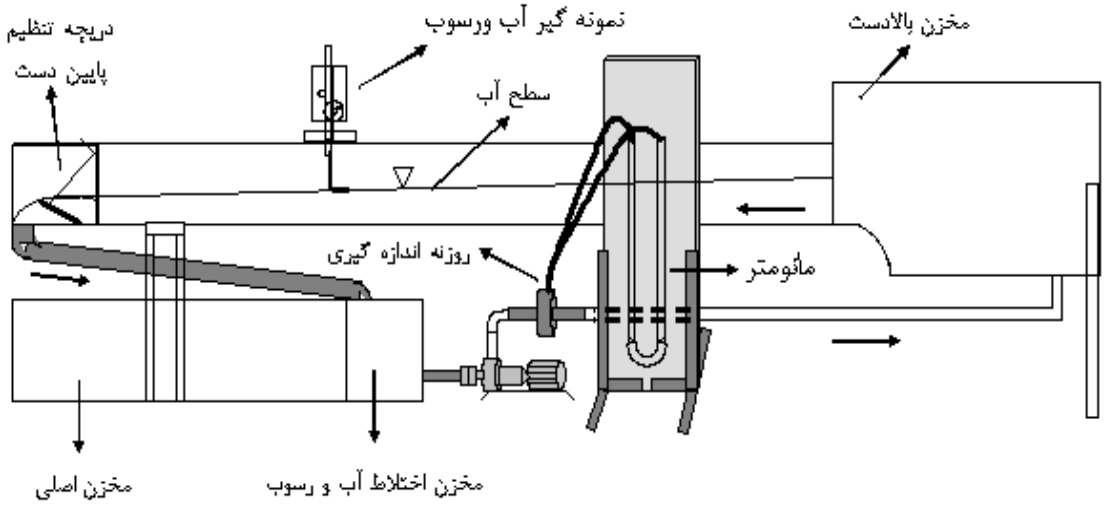
تجهیزات آزمایشگاهی

این تحقیق در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام پذیرفت. تجهیزات آزمایشگاهی که در این تحقیق به‌کار رفته است شامل سیستم گردش آب و رسوب، ابزار اندازه‌گیری و رسوب مورد استفاده می‌باشند. سیستم گردش آب و رسوب مطابق شکل(۱) در جهت جریان شامل پمپ آب، لوله پلی اتیلن انتقال، مخزن ویژه در بالادست کانال، کانال، دریچه تنظیم پایین‌دست، مخزن اصلی و سیستم اختلاط آب و رسوب می‌باشد.

[1] Coles
[2] Preston tube

Archive of SID

www.SID.ir



شکل(۱): مجموعه آزمایشگاهی به کار رفته در تحقیق

مخلوط آب و رسوب از مخزن اختلاط به مخزن بالادست کانال پمپ شده و سپس به کانال هدایت می‌شود و در انتهای کانال توسط یک لوله به مخزن اختلاط هدایت می‌شود. کانال از جنس فایبرگلاس به طول، عرض و عمق ۲۰/۴ متر، ۰/۲ متر و ۰/۳ متر می‌باشد. در ورودی کانال دو شبکه با قطر چشم متفاوت و یک تبدیل افقی برای بهبود شرایط ورودی کانال قرار داده شد. ارتفاع مخزن بالادست فلوم قابل تغییر بوده و امکان کنترل عمق جریان ورودی به کانال را فراهم می‌کند.

ابزار اندازه‌گیری این مطالعه شامل ابزار اندازه‌گیری دبی جریان، عمق جریان، و غلظت جریان می‌باشد. دبی جریان با روزنه دایره‌ای اندازه‌گیری شد که قبلا با سرریز مثلثی واسنجی‌شده، واسنجی گردید و رابطه(۱۳) حاصل شد. در این رابطه؛ (H1-H2) افت فشار جریان گذرنده از روزنه به میلیمتر و Q دبی جریان به لیتر بر ثانیه می‌باشد. افت فشار جریان گذرنده از روزنه با استفاده از مانومتر اندازه‌گیری شد. در این مطالعه عمق آب با استفاده از اندازه‌گیر نقطه‌ای[1] برداشت شد. همچنین برای نمونه‌گیری رسوب از روش نمونه‌گیری مکش[2] استفاده شد. به این منظور از نمونه‌گیری استفاده شد که قادر به برداشت نمونه آب و رسوب از عمق دلخواه بود. این نمونه‌گیر شامل سه قسمت لوله نمونه بردار، اندازه‌گیر نقطه‌ای و لوله تخلیه نمونه می‌باشد. لوله نمونه‌بردار، یک لوله با قطر داخلی ۳ میلیمتر می‌باشد که همانند لوله پیتو دارای قوس ۹۰ درجه می‌باشد و قسمت افقی آن به طول ۱۰ سانتیمتر، موازی با جریان و در خلاف آن، در جریان قرار می‌گیرد. قسمت قائم لوله نمونه بردار، عمود بر جریان می‌باشد و به اندازه‌گیر نقطه‌ای وصل می‌باشد. با استفاده از اندازه‌گیر نقطه‌ای، لوله نمونه‌بردار در راستای قائم جابجا شده و عمق داده‌برداری تنظیم می‌شود. لوله تخلیه نمونه، لوله‌ای لاستیکی هم قطر با لوله نمونه‌بردار می‌باشد که مخلوط آب و رسوب را به ظرف نمونه تخلیه می‌نماید. میانگین قطر ذرات رسوب (d_{50}) در این مطالعه ۰/۰۶۴ میلیمتر می‌باشد. رسوب استفاده شده در این مطالعه، سیلیس با رنگ تیره، با جرم مخصوص نسبی ۲/۶۹، غیرچسبنده و فاقد شکست پذیری در طی آزمایشات می‌باشد.

$$Q=0.3926(H_1-H_2)^{0.4954} \qquad (۱۲)$$

روش انجام آزمایش و برداشت داده‌ها

این مطالعه در کانالی با دیواره و کف صاف انجام پذیرفت. مقدار زبری مطلق کف با استفاده از رابطه کلبروک وایت ۰/۰۱۸ میلیمتر محاسبه شد که منجر به عدد رینولدز برشی[3] ۰/۰۵ می‌شود بنابراین کانال در شرایط صاف هیدرولیکی می‌باشد. عدد فرود در این مطالعه در گستره ۰/۵۷–۰/۶۴ و

[1] Point gage
[2] Suction sampling method
[3] Shear reynolds number

Archive of SID
www.SID.ir

عدد رینولدز در گستره ۱۳۷۶۱۵–۱۰۲۹۳۲ می‌باشد، بنابراین جریان به لحاظ هیدرولیکی زیربحرانی و متلاطم می‌باشد. در این مطالعه ابتدا و انتهای ناحیه جریان نرمال به ترتیب ۷ و ۱۶ متر از ابتدای کانال فاصله داشت. شکل‌گیری ناحیه جریان نرمال با تنظیم دریچه انتهایی بهبود یافت. با هدف بهبود توسعه یافتگی جریان، ابتدای کانال زبر شد. محل داده‌برداری تا حد امکان دور از ورودی جریان، در فاصله ۱۵ متری از ابتدای کانال انتخاب شد تا هم از توسعه یافتن جریان اطمینان حاصل شود و هم محل داده‌برداری در ناحیه جریان نرمال واقع شود. پیش از مطالعه اصلی، بررسی زمان یکسان شدن غلظت در سیستم مشخص نمود با پذیرش خطای ۲٪± این زمان ۱۰ تا ۱۵ دقیقه می‌باشد.

شیوه آزمایش به این ترتیب بود که پس از تنظیم شیب کانال، جریان آب صاف با دبی مورد نظر به کانال هدایت شد. خصوصیات جریان آب صاف در این شرایط و در محل داده‌برداری برداشت شد. در ادامه با ثابت نگهداشتن شیب و دبی، رسوب به سیستم اضافه شد و به منظور ایجاد غلظت یکنواخت در سیستم و ایجاد شرایط پایدار؛ مدت ۳۰ دقیقه اجازه داده شد تا آب در سیستم به گردش درآید. سپس دبی جریان، عمق جریان و غلظت بار معلق در محل داده‌برداری اندازه‌گیری شد. متوالیا تا شرایط حد ظرفیت انتقال[1] غلظت افزایش داده شد و به ترتیب یاد شده، پس از به تعادل رسیدن غلظت، خصوصیات جریان برداشت شد. بنابراین این مطالعه در شرایط غیرحد ظرفیت[2] انجام شد و تمایل به شکل‌گیری فرم بستر؛ معیار تشخیص شرایط حد ظرفیت انتقال بوده است. مراحل یاد شده برای دبی‌های دیگر نیز تکرار شد. در همه مشاهدات، با استفاده از نمونه‌گیر، نمونه آب و رسوب عمق‌های یک سانتیمتر، سه سانتیمتر، شش سانتیمتر و ده سانتیمتر برداشت شد که نقطه آخر بسته به عمق جریان تغییر می‌یافت. نمونه‌گیری از محور کانال و در فاصله ۱۵ متری از ورودی و پس از حصول زمان یکسان شدن غلظت در سیستم انجام پذیرفت. پس از توزین نمونه آب و رسوب و خشک نمودن آن در آون، نمونه رسوب خشک شده توزین شد و نسبت وزن رسوب به وزن آب محاسبه شد. به این ترتیب غلظت جریان در عمق‌های یک سانتیمتر، سه سانتیمتر، شش سانتیمتر و ده سانتیمتر تعیین شد. در ادامه بر اساس رابطه(۱۴) غلظت متوسط جریان در محور کانال تعیین شد. c_y غلظت در عمق y و u_y سرعت در عمق y است (Yang,1996). u_y با استفاده از داده‌های توزیع سرعت که به موازات این مطالعه برداشت شد، تعیین شد. در این تحقیق گستره غلظت حجمی ۳۹۰۰-۲۷۲ جزء در میلیون (ppm)، دبی ۱۵/۲۳-۹/۸۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذره ۰/۰۶۴ میلیمتر و شیب ۰/۰۰۱۵ می‌باشد.

$$C_m=\frac{\int_0^h u_y c_y dy}{S_S\int_0^h u_y dy} \qquad (۱۳)$$

نتایج و بحث

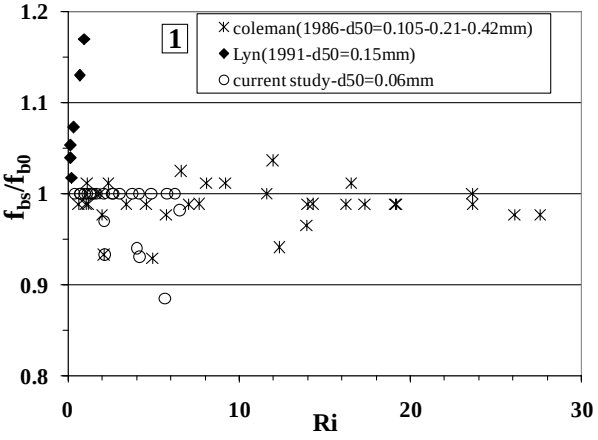
در مطالعه حاضر روش تعیین سرعت برشی، تلفیقی از روش لگاریتمی و روش استفاده شده توسط کلمن (۱۹۸۱) می‌باشد. ابتدا در جریان آب صاف، سرعت برشی مربوط به کف، u_{*b}، بر اساس داده‌های توزیع سرعت لایه درونی در محور کانال تعیین شد. سپس با ترسیم نسبت $u_{*b}/(ghS)^{0.5}$ در مقابل عمق، منحنی واسنجی تعیین سرعت برشی حاصل شد. u_{*b} جریان حاوی بارمعلق با استفاده از این منحنی، عمق جریان و شیب سطح آب تعیین شد. توزیع نسبت f_{bs}/f_{b0} در مقابل عدد ریچاردسون[3] مطالعه حاضر، مطالعه لین (۱۹۹۱) و مطالعه کلمن (۱۹۸۶) در نمودار(۱)، نتایج متناقض عدم تغییر، افزایش و کاهش ضریب اصطکاک جریان در اثر بارمعلق را نشان می‌دهد. این نمودار ۱۳٪ کاهش و عدم تغییر ضریب اصطکاک جریان در اثر بارمعلق در مطالعه حاضر همچنین ۸٪ کاهش، ۴٪ افزایش و عدم تغییر ضریب اصطکاک جریان در مطالعه کلمن (۱۹۸۶) و افزایش ضریب اصطکاک جریان در مطالعه لین (۱۹۹۱) را مشخص می‌کند. ضریب اصطکاک جریان و عدد ریچاردسون به ترتیب با روابط (۱۵) و (۱۶) تعیین شد. f_b، ضریب اصطکاک جریان وابسته به کف؛ U، سرعت متوسط جریان؛ C_δ ، غلظت در عمق سرعت حداکثر و $C_{0.05}$، غلظت در عمق ۰/۵۰ h می‌باشد.

$$f_b=8(u_{*b}/U)^2 \qquad (۱۴)$$

$$R_i=g(S_s-1)(C_{0.05}-C_\delta)\delta/[1+(S_s-1)C_m)u_*^2] \qquad (۱۵)$$

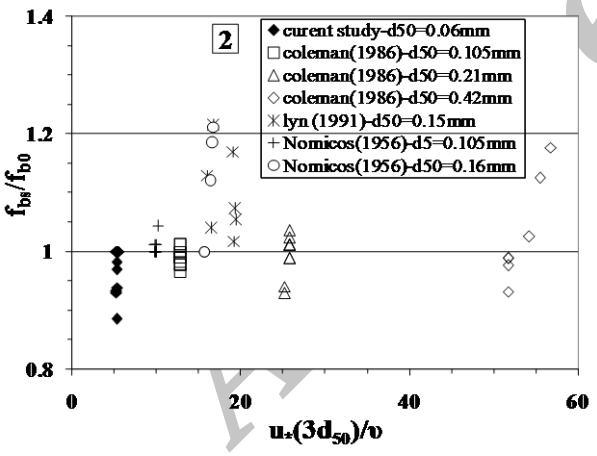
[1] Capacity condition
[2] Noncapacity condition
[3] Richardson number

Archive of SID
www.SID.ir



نمودار(۱): توزیع fbs/fb0 در مقابل Ri بر اساس داده های مطالعه حاضر، مطالعه لین (۱۹۹۱) و مطالعه کلمن (۱۹۸۶).

در نمودار(۱) ذرات ریزدانه‌تر کاهش و ذرات درشت‌دانه‌تر افزایش ضریب اصطکاک را نشان می‌دهند. در اثر توقف لحظه‌ای ذرات بار معلق بر کف کانال، برآمدگی‌های بستر افزایش می‌یابد و با درشت‌دانه‌تر شدن ذرات، این برآمدگی‌ها به میزان بیشتری از زیر لایه آرام خارج شده و تنش رینولدز بزرگتری تولید می‌کند. تنش رینولدز عامل تبادل انرژی جنبشی بین جریان متوسط و توربلانس می‌باشد (George,1990). بنابراین افزایش زبری بستر، موجب تشدید توربلانس و افزایش اتلاف انرژی می‌شود. همچنین بر اساس یافته‌های محققین پیشین، حضور ذرات ریزدانه بار معلق در جریان عموما موجب کاهش شدت توربلانس و در نتیجه کاهش اتلاف انرژی می‌شود. تاثیر بار معلق بر ضریب اصطکاک جریان را می‌توان نتیجه این دو اثر دانست. توزیع f_{bs}/f_{b0} در مقابل $u_*(3d_{50})/\upsilon$ در نمودار(۲) مشخص می‌کند چنانچه $u_*(3d_{50})/\upsilon < 5$ باشد f_{bs}/f_{b0} کاهش می‌یابد و چنانچه $u_*(3d_{50})/\upsilon > 5$ باشد f_{bs}/f_{b0} هم کاهش و هم افزایش می‌یابد. نمودار(۲) مشخص می‌کند که $u_*(3d_{50})/\upsilon$ معرف اثر ذرات بار معلق در افزایش زبری بستر می‌باشد و معادل عدد رینولدز برشی می‌باشد به نحوی که اگر $u_*(3d_{50})/\upsilon < 5$ باشد جریان صاف هیدرولیکی بوده و تنها اثر بار معلق، کاهش شدت توربلانس می‌باشد و اگر $u_*(3d_{50})/\upsilon > 5$ باشد جریان وارد شرایط انتقالی زبری شده و افزایش توربلانس حاصل از افزایش زبری بستر و کاهش شدت توربلانس حاصل از بارمعلق؛ شرایط اتلاف انرژی جریان را مشخص می‌کند. از نمودار(۲) می‌توان استنباط کرد که زبری بستر بر اثر بار معلق به‌طور متوسط به اندازه $3d_{50}$ افزایش می‌یابد. در ذرات درشت‌دانه تغییرات f_{bs}/f_{b0} از رژیم مشخصی پیروی نمی‌کند که دلیل آن می‌تواند دخالت مکانیسم‌های دیگر در تولید و اتلاف توربلانس باشد. به‌عنوان مثال بر اساس یافته‌های می و همکاران (۱۹۹۱) تولید گردابه در پشت ذرات و عدم پیروی ذرات از حرکت سیال و جابجایی آن‌ها از یک گردابه به گردابه دیگر به‌دلیل اینرسی بالا موجب تشدید توربلانس می‌شود (Mei et al,1991). هرچند در بسترهای صاف، حضور ذرات بر کف می‌تواند موجب افزایش زبری بستر شود ولی در بسترهای زبر و فرسایش‌پذیر، قرار گرفتن ذرات ریزدانه در حفرات بستر موجب کاهش زبری بستر و در نتیجه ضریب اصطکاک جریان می‌شود. در بسترهای فرسایش‌پذیر نیز استفاده از مواد شیمیایی در مرحله تثبیت بستر، موجب تغییر نامشخص زبری ذره و ارائه نتایج نامطمئن می‌شود. بنابراین تاثیر متفاوت ذرات بارمعلق بر زبری بستر کانال‌های صاف، زبر و فرسایش پذیر و تاثیر متفارت بارمعلق در افزایش و کاهش توربلانس جریان، از دلایل نتایج متفاوت تاثیر بارمعلق بر ضریب اصطکاک جریان می‌باشد.

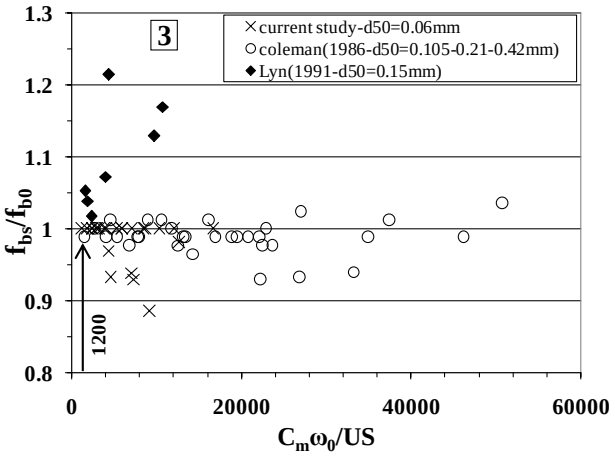


نمودار(۲): توزیع f_{bs}/f_{b0} در مقابل u_*d_{50}/υ بر اساس داده‌های مطالعه حاضر ، مطالعه لین(۱۹۹۱) ، مطالعه کلمن(۱۹۸۶) و مطالعه نومیکوس (۱۹۵۶)

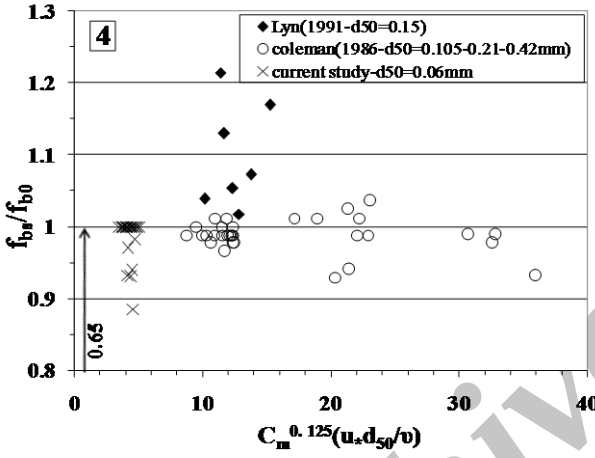
ارزیابی معیار آرورا و همکاران (۱۹۸۶) و خولار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های مطالعه حاضر، کلمن (۱۹۸۶) و لین (۱۹۹۱) در نمودار (۳) و (۴) مشخص می‌کند که داده‌های لین (۱۹۹۱) و قسمتی از داده‌های کلمن (۱۹۸۶) انطباق خوبی با این دو معیار دارند اما ضریب اصطکاک جریان داده‌های این مطالعه و بخش عمده‌ای از

Archive of SID
www.SID.ir

داده‌های کلمن در $C_m\omega_0/US>1200$ و $C_m^{0.125}(u_*d_{50}/\upsilon)>0.65$ کاهش و عدم تغییر دارند که با دو معیار یاد شده تناقض دارد. مولفه عمودی انرژی جنبشی توربلانس، انرژی لازم برای معلق نگهداشتن ذرات بارمعلق را تامین می‌کند و ‹u´v´›du/dy نرخ تبادل انرژی بین جریان متوسط و توربلانس می‌باشد چون بیشترین مقدار du/dy در ناحیه مجاور بستر می‌باشد و به‌دلیل اینکه منشاء توربلانس در جریان محصور به صفحه، گردابه‌های شکل گرفته بر سطح صفحه می‌باشد (Tennekes et al,1970). بنابراین توربلانس در ناحیه مجاور بستر بیشترین اثر را بر جریان دارد. همچنین بیشترین غلظت بار معلق در ناحیه مجاور بستر می‌باشد در نتیجه تاثیر بار معلق بر توربلانس در ناحیه نزدیک به بستر مهمتر از سایر نواحی است. بر اساس یافته‌های ونونی و بروکس (۱۹۵۷) و نومیکوس (۱۹۵۶) نیز بیشترین اثر بار معلق بر جریان در ناحیه نزدیک به بستر روی می‌دهد. دو معیار بررسی شده بر اساس غلظت متوسط بار معلق می‌باشند در نتیجه در نظر نگرفتن اثر بار معلق بر جریان در ناحیه نزدیک به بستر می‌تواند دلیل عدم جامعیت دو معیار بررسی شده باشد. $C_m\omega_0/US$ نسبت کار انجام شده بر گرادیان دانسیته به انرژی لازم برای غلبه بر مقاومت جریان می‌باشد این پارامتر معرف اثر بارمعلق بر توربلانس جریان می‌باشد و نمی‌تواند اثر بارمعلق بر زبری بستر را مشخص کند بنابراین دلیل دوم عدم جامعیت معیار آرورا و همکاران (۱۹۸۶) ناکافی بودن معیارهای استفاده شده می‌باشد. در نمودار (۳) و (۴) مشخص است که هیچیک از داده‌های استفاده شده، در ناحیه کاهش ضریب اصطکاک جریان قرار نگرفته است. بررسی مطالعه آرورا و همکاران (۱۹۸۶) و خولار و همکاران (۲۰۰۷) مشخص می‌کند که تنها قسمتی از داده‌ها کاهش ضریب اصطکاک جریان را نشان دادند و قسمت عمده داده‌ها، افزایش ضریب اصطکاک جریان را نشان دادند. همانطور که آرورا و همکاران (۱۹۸۶) نیز بیان نمودند، گستره شرط کاهش ضریب اصطکاک جریان این دو معیار، معرف ناحیه کوچکی می‌باشد و نیاز به چک کردن بیشتر دارد (Arora et al,1986).



نمودار (۳): ارزیابی معیار تفکیک آرورا بر اساس داده‌های مطالعه حاضر ، کلمن(۱۹۸۶) و لین(۱۹۹۱).



نمودار (۴): ارزیابی معیار تفکیک خولار بر اساس داده‌های مطالعه حاضر، کلمن(۱۹۸۶) و لین(۱۹۹۱).

چنانچه عوامل موثر در تغییرات ضریب اصطکاک جریان بر اثر بارمعلق را مطابق رابطه(۱۷) بدانیم. بر اساس سه متغیر مستقل لزجت دینامیک سیال، قطر ذره و جرم مخصوص سیال و با استفاده از تئوری باکینگهام؛ پارامترهای بی‌بعد رابطه(۱۸) به‌عنوان پارامترهای بی‌بعد موثر بر تغییرات ضریب اصطکاک جریان بر اثر بار معلق مشخص شد. ρ_w، جرم مخصوص سیال؛ μ، لزجت دینامیک سیال و US، انرژی لازم برای غلبه بر مقاومت جریان می‌باشد.

$$F(f_{bs}/f_{b0}\ ,\ u_*\ ,\ d_{50}\ ,\ C_{0.05}\ ,\ C_\delta\ ,\ C_m\ ,\ \rho_w\ ,\ \mu\ ,\ US)=0 \qquad (16)$$

$$f_{bs}/f_{b0}=F(u_*d_{50}/\upsilon\ ,\ US/u_*\ ,\ C_{0.05}\ ,\ C_\delta\ ,\ C_m) \qquad (17)$$

F نمایانگر مشخصه تابع می‌باشد. بررسی ترکیب‌های

Archive of SID

www.SID.ir

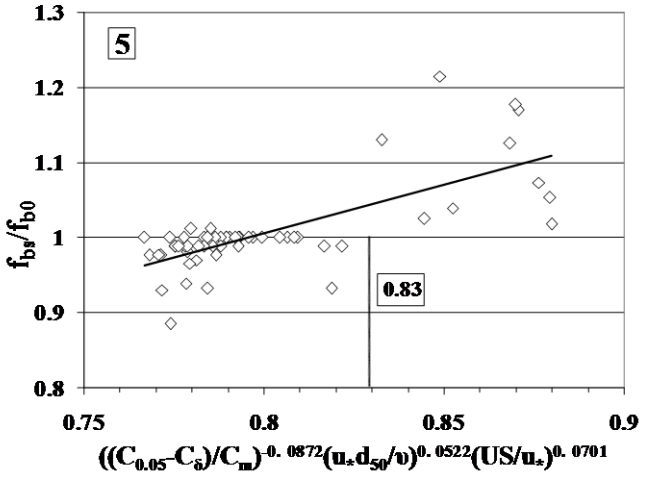
مختلف C_δ، $C_{0.05}$ و C_m مشخص نمود که نسبت تغییرات عمودی غلظت بار معلق به متوسط غلظت بار معلق، $(C_{0.05}-C_\delta)/C_m$، بهترین ترکیب می‌باشد.

پارامتر بی‌بعد $u_*(d_{50})/\upsilon$ بر اساس نمودار(۲) معرف اثر ذرات بار معلق در افزایش زبری بستر می‌باشد. همچنین بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های پیشین، پارمتر بی‌بعد $(C_{0.05}-C_\delta)/C_m$ معرف اثر بار معلق بر شدت توربلانس می‌باشد. بنابراین، این دو پارامتر معرف مهمترین اثرات بار معلق بر اتلاف انرژی می‌باشند و می‌توان آن‌ها را موثرترین پارامترها بر تغییرات اتلاف انرژی جریان در اثر بار معلق دانست. US/u_* نیز در لایه اینرسی[1] نسبت انرژی کل جریان و جذر تنش رینولدز می‌باشد. تنش رینولدز عامل تبادل انرژی جنبشی بین جریان متوسط و توربلانس می‌باشد. (George,1990) بنابراین US/u_* می‌تواند نسبت انرژی کل جریان به مقدار انرژی انتقال یافته به توربلانس باشد.

با اعمال رگرسیون چندمتغیره بر پارامترهای بی‌بعد رابطه(۱۸) بر اساس داده‌های مطالعه حاضر، کلمن (۱۹۸۶) (d_{50}= ۰/۱۰۵ و d_{50}= ۰/۴۲) و لین (۱۹۹۱) بهترین شکل توزیع بر اساس عبارت $((C_{0.05}-C_\delta)/C_m)^{-0.0872}(u_*d_{50}/\upsilon)^{0.0522}(US/u_*)^{0.0701}$ به‌دست آمد. مطابق نمودار(۵) انتظار می‌رود که چنانچه این عبارت بزرگتر از ۰/۸۳ باشد $f_{bs}/f_{b0}>1$ شود و چنانچه این عبارت کوچکتر از ۰/۸۳ باشد $f_{bs}/f_{b0}<1$ شود. تغییرات f_{bs}/f_{b0} از رابطه(۱۹) تبعیت می‌نماید که ضریب همبستگی آن ۰/۵۱ و خطای استاندارد آن ۰/۰۱۷ می‌باشد.

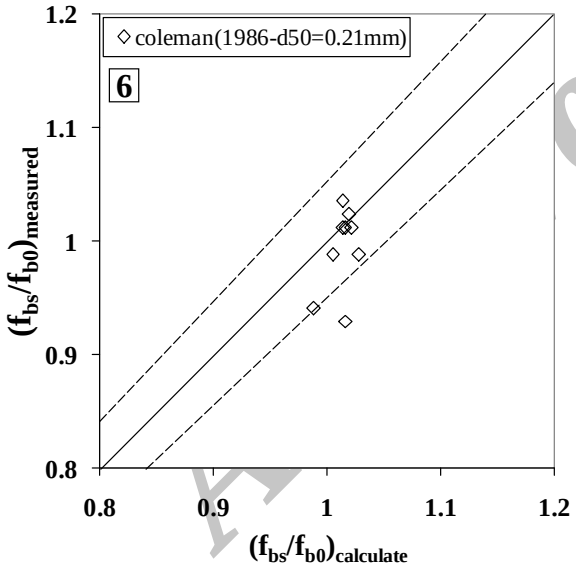
$$f_{bs}/f_{b0}=1.2563((C_{0.05}-C_\delta)/C_m)^{-0.0872}(u_*d_{50}/\upsilon)^{0.0522}(US/u_*)^{0.0701} \quad (18)$$

رابطه(۱۹) بر اساس داده‌های مطالعه حاضر، مطالعه لین (۱۹۹۱) و مطالعه کلمن (۱۹۸۶) (d_{50}=۰/۱۰۵ و d_{50}=۰/۴۲) به‌دست آمد بنابراین دامنه کاربردی بودن آن در گستره غلظت حجمی ۵۰۳۰-۲۷۲ جزء در میلیون (ppm)، دبی ۶۴-۹/۸۲ لیتر بر ثانیه، قطر ذره ۰/۴۲ - ۰/۰۶۴ میلیمتر و شیب ۰/۰۰۲ - ۰/۰۰۰۵ می‌باشد.



نمودار(۵): توزیع f_{bs}/f_{b0} در مقابل $((C_{0.05}-C_\delta)/C_m)^{-0.0872}(u_*d_{50}/\upsilon)^{0.0522}(US/u_*)^{0.0701}$ بر اساس داده های مطالعه حاضر ، کلمن(۱۹۸۶) و لین(۱۹۹۱).

اعتبار سنجی رابطه(۱۹) در نمودار(۶) مشخص می‌کند که داده‌های کلمن (d_{50}=۰/۲۱ -۱۹۸۶) با خطای عدم دقت ۵٪± این رابطه را تایید می‌کند.



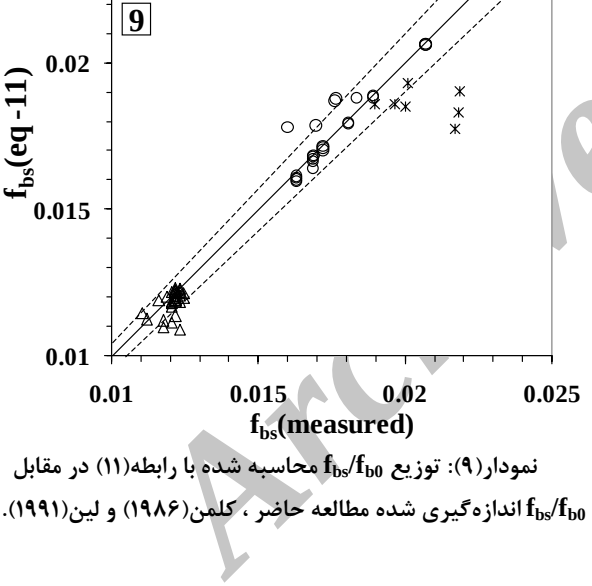
نمودار(۶): اعتبار سنجی رابطه(۱۹) با استفاده از داده‌های مربوط به قطر ۰/۲۱ میلیمتر داده‌های کلمن (۱۹۸۶). خطوط خط چین معرف مرز خطای ۵٪ می‌باشد.

توزیع f_{bs} اندازه‌گیری شده در مقابل f_{bs} محاسبه شده با روابط (۷)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) در نمودارهای (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) مشخص می‌نماید که داده‌های مطالعه فعلی و مطالعه کلمن (۱۹۸۶) با خطای ۵٪± رابطه(۱۱) و داده‌های لین (۱۹۹۱) با خطای ۵٪± رابطه(۷) را تایید می‌نمایند. همچنین

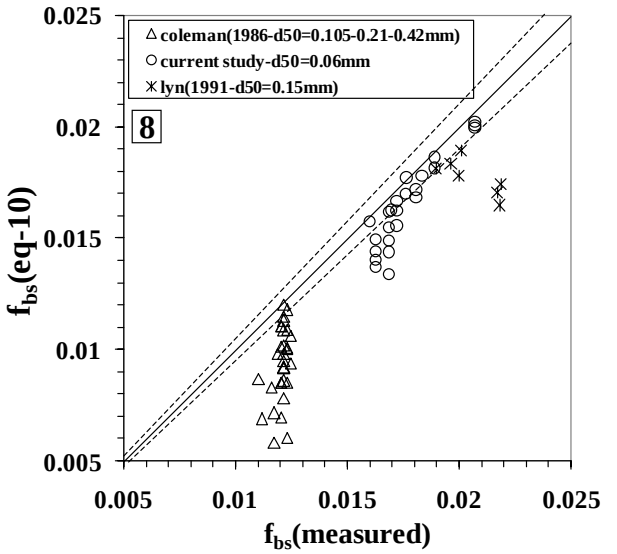
1. [1] Inertial layer

Archive of SID
www.SID.ir

داده‌های استفاده شده، روابط (۱۰) و (۱۲) را تایید نمی‌نمایند. نمودار (۳) و (۹) مشخص می‌کند که هر چند $C_m\omega_0/US$ به‌عنوان شرط کاهش یا افزایش ضریب اصطکاک جریان ناکافی می‌باشد ولی در پیش‌بینی تغییرات ضریب اصطکاک جریان در اثر بار معلق ذرات ریزدانه مناسب می‌باشد که دلیل آن می‌تواند ناچیز بودن اثر ذرات ریزدانه در افزایش زبری بستر باشد. رابطه پارکر-کلمن (۱۹۸۴)، رابطه(۱۱)، بر مبنای $(S_S\text{-}1)C_m\omega_0/U_0S$ می‌باشد. به‌طور مشابه ایشتن و همکاران (۱۹۵۴)، $(S_S\text{-}1)C_m\omega_0/US$؛ ایتاکورا-کیشی (۱۹۸۰)، $\kappa g(Ss\text{-}1)C_m\omega_0/u_*^3$؛ خولار و همکاران (۲۰۰۷)، $C_m\omega_0/US$ و آرورا و همکاران (۱۹۸۶)، $C_m\omega_0/US$ را استفاده نمودند. این پارامترها معرف اثر بار معلق بر توربلانس جریان می‌باشند و نمی‌تواند اثر ذرات بار معلق بر زبری بستر را مشخص کند در نتیجه روابط و معیارهای مبتنی بر این پارامترها در ذرات ریزدانه کارآیی بهتری دارند.



نمودار(۷): توزیع f_{bs}/f_{b0} محاسبه شده با رابطه(۷) در مقابل f_{bs}/f_{b0} اندازه‌گیری شده مطالعه حاضر ، کلمن (۱۹۸۶) و لین (۱۹۹۱). خطوط خط‌چین معرف مرز خطای ۵٪ می‌باشد.



نمودار(۸): توزیع f_{bs}/f_{b0} محاسبه شده با رابطه(۱۰) در مقابل f_{bs}/f_{b0} اندازه‌گیری شده مطالعه حاضر ، کلمن(۱۹۸۶) و لین(۱۹۹۱).

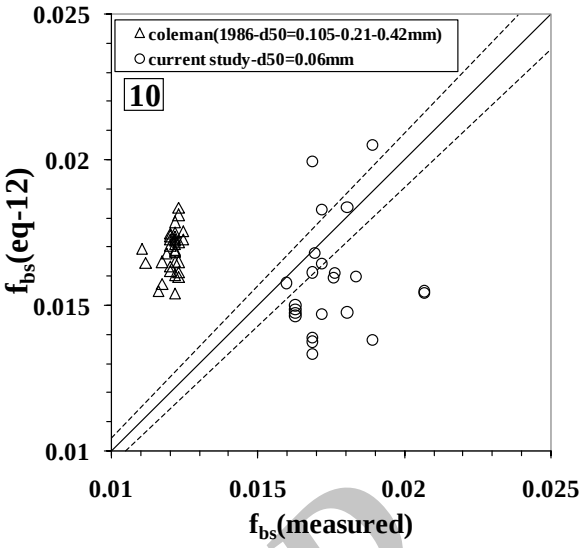
نمودار(۹): توزیع f_{bs}/f_{b0} محاسبه شده با رابطه(۱۱) در مقابل f_{bs}/f_{b0} اندازه‌گیری شده مطالعه حاضر ، کلمن(۱۹۸۶) و لین(۱۹۹۱).

Archive of SID

www.SID.ir

نتیجه گیری

داده‌های این تحقیق مشخص نمود که ضریب اصطکاک جریان در اثر بارمعلق هم کاهش و هم عدم تغییر دارد. ارزیابی معیار آرورا و همکاران (۱۹۸۶) و خولار و همکاران (۲۰۰۷) مشخص نمود که این معیارها در پیش‌بینی شرایط افزایش یا کاهش ضریب اصطکاک جریان بر اثر بار معلق نقص دارند. همچنین مشخص شد که تغییرات ضریب اصطکاک جریان بر اثر بار معلق، وابسته به عدد رینولدز ذره ($u_* d_{50}/\upsilon$) می‌باشد. در این مطالعه معیاری برای تشخیص کاهش و یا افزایش ضریب اصطکاک جریان پیشنهاد شد که شامل اثر ذرات بار معلق بر زبری بستر و توربلانس می‌باشد. داده‌های مطالعه حاضر و مطالعه کلمن (۱۹۸۶) رابطه پارکر - کلمن (۱۹۸۴) و داده‌های لین (۱۹۹۱) رابطه خولار و همکاران (۲۰۰۷) را تایید نمود.



نمودار(۱۰): توزیع f_{bs}/f_{b0} محاسبه شده با رابطه(۱۲) در مقابل f_{bs}/f_{b0} اندازه‌گیری شده مطالعه حاضر ، کلمن(۱۹۸۶) و لین(۱۹۹۱).

منابع:

Arora, A.K., K.G. Ranga Raju and R.J. Garde. 1986. Resistance to flow and velocity distribution in rigid boundary channels carrying sediment-laden flows. J. Water Resour. Res. 22(6): 943-951.
Cellino, M. and W.H. Graf. 1999. Sediment-laden flow in open-channels under noncapacity and capacity conditions. J. hydr. Eng., 125(5): 455-462.
Coleman, N.L. 1981. Velocity profiles with suspended sediment. J. hydr. Res., 19(3): 211-229.
Coleman, N.L. 1986. effect of suspended sediment on the open-channel velocity distribution. J. hydr. Eng., 22(10): 1377-1384.
Itakura, T. and T. Kishi. 1980. Open channel flow with suspended sediments. J. hydr. Eng., 106(HY8): 1325-1343.
Kereselidze, N.B. and V.I. Kutavaia. 1995. Experimental research on kinematics of flows with high suspended solid consentration. J. hydr. Res., 33(1): 65-75
Khullar, N.K., U.C. Kothyart and K.G. Ranga Raju. 2007. effect of wash load on flow resistance. J. hydr. Res. 45(4): 497-504.
George, W.K. 1990. Lectures in Turbulence for the 21st Century. Professor of Turbulence, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
Liu, Q.Q. and V.P. Singh. 2004. Fluid-solid interaction in particle-laden flows. J. of Engineering Mechanics, 130(12): 1476-1485.
Lyn, D.A. 1991. Resistance in flat-bed sediment–laden flow J.hydr.Eng., 117(1): 94-114.
Mei, R., R.J. Adrian. and T.J. Hanratty. 1991. Particle dispersion in isotropic turbulence under Stokes drag and Basset force with gravitational. J. Fluid Mech., vol. 225: 481-495.
Nomicos, G.N. 1956. Effects of sediment load on the velocity field and friction factor of turbulent flow in an open channel. California institute of technology. California. PHD Thesis.
Muste, M. and V.C. Patel. 1997. Velocity profiles for particles and liquid in open-channel flow with suspended sediment. J. hydr. Eng., 123(9): 742-751.
Parker, G. and N.L. coleman. 1984. Simple model of sediment-laden flows. J. hydr. Eng. , 112(5): 356-375.
Peng, L., C. Li and H. JiZhong. 2001. study the structure of flow in open-channel with suspended sediment. Proceeding of the XXIX Congress of IAHR, Beijing.
Rashidi, M., G. Hetsroni and S. Banerjee. 1990. Particle-turbulence interaction in a boundary layer. Int. J. Multiphase Flow, 16(6):935-949.
Simonz, d. and F. Senturk. 1990. Sediment transport technology water and sediment dynamics. Water Resources publication. Colorado.

Archive of SID
www.SID.ir

Tennekes, H and J.L. Lumley. 1970. A first course in turbulence. MIT press, Cambridge.
Vanoni, V.A. and G.N. Nomicos. 1959. Resistance properties of sediment-laden streams. J. hydr. Division., 85(HY5): 77-107.
Vanoni, V.A. and N.H. Brooks. 1957. Laboratory study of the roughness and suspended load of alluvial streams. Sedimentation laboratory California - report No. E-68.
Wang, Z.Y., P. Larsen, F. Nestmann and A. Dittrich. 1998. Resistance and drag reduction of flows of clay suspensions. J. hydr. Eng., 124(1): 41-49
Woo, H. and P.Y. Julien. 1990. Turbulent shear stress in heterogeneous sediment-laden flow. J. hydr. Eng., 116(11): 1416-1421.
Yang, CH.T. 1996. Sediment Transport Theory and Practice. McGraw-Hill, New York.

Archive of SID

www.SID.ir

Experimental study of suspended load effect on flow friction factor on rigid and smooth beds

M. Amirzadeh Ghasemi, S. Koochakzadeh, M. H. Omid

Abstract

The effect of suspended load on friction coefficient has been studied widely by different researchers, yet vast disagreement exists among them which call for further studies in this area. In this study, the effect of suspended load on flow friction coefficient on smooth and rigid beds was experimentally studied. The experimental setup that was used for this study, consists of a 0.2m wide, 20.4m long and 0.3m deep flume, a water reservation tank and sediment mixture tank. A special sediment sampler has been developed for this study and the discharge was measured by using an orifice that was previously calibrated. The compiled data of this study indicated no impact to decrease friction coefficient. Also it is shown that the variation of the friction coefficient depends on particle Reynolds number. The obtained results was compared with that of other researchers results and which revealed that Parker-Coleman's relationship could be considered as the most appropriate one for determining the effect of suspended load on flow friction coefficient.

Key words: experimental study, flow friction coefficient, rigid bed, smooth bed, suspended load.

Archive of SID

www.SID.ir