

تأثیر طول پوشش بستر بر آب‌شستگی موضعی پایین دست در جت‌های افقی

علی مهبودی^{۱*}، جلال عطاری^۲، مجتبی صانعی^۳، محمدرضا مجدزاده طباطبائی^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی رودخانه، دانشگاه صنعت آب و برق

۲- دکترای مهندسی عمران، استادیار دانشکده مهندسی آب دانشگاه صنعت آب و برق

۳- استادیار پژوهشی سازه‌های آبی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

۴- استادیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق

دانشگاه صنعت آب و برق، دانشکده مهندسی آب

alimehboudi@stud.pwut.ac.ir

چکیده - آب‌شستگی موضعی، ناشی از اندرکنش جریان آب، بستر فرسایش‌پذیر و سازه‌های هیدرولیکی بوده که ممکن است کارایی و پایداری این سازه‌ها را تهدید کند. برای کنترل این پدیده در بستر فرسایش‌پذیر پایین‌دست سازه‌هایی مانند دریچه‌های کنترل، تا کنون از راهکارهای مختلف حفاظتی مانند اجرای کف‌بندهای بتنی و سنگچین‌ها استفاده شده است. اما مطالعه طول مؤثر برای این راهکارها کمتر انجام شده و در این پژوهش آزمایشگاهی به آن پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا پروفیل طولی آب‌شستگی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از زیر مدل دریچه کشویی در فلوم (با بستر حفاظت نشده) در شرایط مختلف هیدرولیکی اندازه‌گیری شد. سپس همین آزمایش‌ها به صورت مجزا در دو حالت وجود کف‌بند و سنگچین با طول‌های مختلف تکرار شد تا تأثیر طول آنها بر حداکثر عمق آب‌شستگی مشخص شود. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش طول نسبی کف‌بند ($\tilde{L}_a \geq 1$) و سنگچین ($\tilde{L}_R \geq 2$)، حداکثر عمق آب‌شستگی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود، بطوریکه اگر $\tilde{L}_a \geq 27$ و $\tilde{L}_R \geq 7$ باشد، آب‌شستگی تا ۱۰۰ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که پوشش سنگچینی که به درستی طراحی ($\tilde{L}_R \geq 2$) و اجرا شده باشد، بیشتر از راهکار کف‌بند، آب‌شستگی موضعی را کاهش می‌دهد. در این مقاله، همچنین روابط تجربی بی‌بعد مناسبی برای برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی (با در نظر گرفتن طول کف‌بند و یا سنگچین) پیشنهاد شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از روابط پیشنهادی با روابط سایر محققان نشان می‌دهد که بیشتر داده‌ها در محدوده قابل قبول ($\pm 20\%$ خطا) قرار دارند.

کلید واژگان: سازه‌های هیدرولیکی، جت افقی، آب‌شستگی موضعی، کف‌بند، سنگچین.

۱- مقدمه

آب‌شستگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش جریان آب و مصالح بستر فرسایش‌پذیر کانال‌ها و رودخانه‌ها به وجود می‌آید (بیات، ۱۳۷۹ و Breusers and Raudkivi, 1991). یکی از انواع این پدیده، آب‌شستگی موضعی است که اثر سازه هیدرولیکی بر الگوی جریان را نیز در برداشته و به صورت موضعی در اطراف یا پایین دست سازه‌هایی مانند پایه‌های پل، سرریزها، حوضچه‌های آرامش، خروجی تخلیه‌کننده‌ها و دریچه‌های کنترل رخ می‌دهد (Annandale, 2006). یکی از عوامل اصلی به وجود آورنده آب‌شستگی موضعی، جت خروجی از سازه‌های هیدرولیکی است که ممکن است کارایی و پایداری این سازه‌ها را تهدید کند. هرگاه جریان با ضخامت کم و سرعت زیاد، به سیالی با سرعت کمتر از خود وارد شود، میدان حاصل از تداخل دو جریان جت نامیده می‌شود (Karim and Ali, 2000). بر اثر برخورد جت مستغرق خروجی از سازه‌های هیدرولیکی به بستر فرسایش‌پذیر، حفره آب‌شستگی در پایین دست به وجود می‌آید و مصالح شسته شده از آن به صورت بار معلق و بار بستر به پایین دست انتقال می‌یابد.

برای کنترل آب‌شستگی موضعی در بستر فرسایش‌پذیر پایین دست سازه‌هایی مانند دریچه‌های کنترل، تاکنون از راهکارهای مختلف حفاظتی مانند اجرای کف‌بندهای بتنی و پوشش بستر توسط سنگچین^۱ استفاده شده است. با اجرای این راهکارها، بخشی از انرژی جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی در فاصله عبور از آنها مستهلک می‌شود. اندازه طول این راهکارها، با توجه به مقدار مجاز آب‌شستگی در آن شرایط برآورد می‌شود. چنانچه طول محافظ بستر آنقدر زیاد باشد که تمام انرژی جریان را

مستهلك کند، در پایین دست آنها آب‌شستگی اتفاق نمی‌افتد و در غیر این صورت، انرژی باقیمانده، موجب آب‌شستگی خواهد شد (Hoffmans and Pilarczyk, 1995).

تحقیق و مطالعه درباره پدیده آب‌شستگی موضعی حائز اهمیت است، زیرا در بیشتر موارد موجب بروز خسارات مالی و گاهی تلفات جانی می‌شود (Bey et al., 2008). بنابراین شناخت پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی موضعی و چگونگی تأثیر آنها و همچنین میزان تأثیر روشهای مختلف در کنترل این پدیده، برای طراحی بهینه سازه‌های هیدرولیکی ضروری است.

پدیده آب‌شستگی موضعی ناشی از جت افقی، تاکنون توسط بسیاری از پژوهشگران مطالعه شده است. Altinbilik and Shalash (1959)، Qayoum (1960)، Basmaci (1973)، Chatterjee et al. (1994)، Tregnaghi (2008) و Bey et al. (2008) آب‌شستگی ناشی از جت افقی مستغرق خروجی از دریچه را در شرایط هیدرولیکی مختلف بررسی کردند، اما در آزمایش‌های خود از راهکارهای کنترل آب‌شستگی استفاده نکردند. آنان نتیجه گرفتند که با افزایش زمان آب‌شستگی، حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش یافته و در زمان مشخصی به حداکثر خود می‌رسد. Schoklitch (1932)، Muller (1944) و Espa and Sibilla (2006) روابطی را برای محاسبه مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی ارائه کردند و نتیجه گرفتند که اجرای کف‌بند باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. Dey & Sarkar (2006) علاوه بر بررسی تأثیر اندازه طول کف‌بند، اثر سنگچین با طول ثابت را نیز بررسی کرده و نتیجه گرفتند که راهکار سنگچین بیشتر از کف‌بند باعث کاهش آب‌شستگی می‌شود. علی حسینی (۱۳۸۷) نیز در آزمایش‌های خود با استفاده از طول‌های مختلف کف‌بند

^۱. Rip-Rap

در شرایط مختلف هیدرولیکی نشان داد که با افزایش طول کفبند، مقدار آب‌شستگی کاهش پیدا می‌یابد. هرچند تا کنون پدیده آب‌شستگی ناشی از جت افقی مستغرق و عوامل مؤثر بر آن توسط بسیاری از محققان مطالعه شده، اما از آنجا که نتایج و روابط آنان در شرایط خاص و بازه محدودی به دست آمده، تحقیقات برای شرایط هیدرولیکی گستره‌تر ادامه دارد. همچنین درباره تأثیر اندازه طول راهکارهای کنترل آب‌شستگی (به‌ویژه روش سنگچین) کمتر تحقیق شده و تاکنون رابطه‌ای برای برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی - که در آن پارامتر طول سنگچین در نظر گرفته شده باشد - ارائه نشده است. در جدول (۱)، روابط تجربی پیشنهادی بعضی از پژوهشگران برای برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل - که شرایط آزمایشگاهی مشابهی با تحقیق حاضر دارند - آورده شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، فقط Shalash (1959) در رابطه خود از پارامتر طول کفبند (L_a) استفاده کرده و سایر محققان یا اثر پارامترهای حفاظت بستر را در مطالعات خود در نظر نگرفته‌اند یا آنها را در روابط پیشنهادی خود دخالت نداده‌اند.

با توجه به آنچه گفته شد، علی‌رغم مطالعات زیادی که در مورد پدیده آب‌شستگی موضعی ناشی از جت افقی مستغرق انجام شده، هنوز روابط متعددی که در آنها پارامترهای طول کفبند و سنگچین نیز مؤثر باشد، ارائه نشده است. برآورد طول مؤثر این راهکارها مطالعات بیشتری را می‌طلبد که در تحقیق آزمایشگاهی حاضر به آن پرداخته شده است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر طول راهکارهای کفبند و سنگچین بر مقدار آب‌شستگی موضعی و همچنین ارائه روابطی برای برآورد مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی با در نظر گرفتن طول مؤثر این راهکارها به صورت جداگانه است.

۱-۱- عوامل مؤثر بر پدیده آب‌شستگی

به‌طور کلی عوامل مؤثر بر پدیده آب‌شستگی ناشی از جت افقی مستغرق را به پنج دسته زیر می‌توان تقسیم کرد:

- ۱- پارامترهای مشخصه جریان شامل: دبی در واحد عرض (q)، سرعت متوسط در بالادست دریچه (U)، عمق جریان در بالادست دریچه (Y)، عمق پایاب (h_t)، جرم مخصوص (ρ) لزجت سینماتیک (ν) و شتاب ثقل (g).

جدول ۱ روابط تجربی ارائه شده سایر محققان

محقق	رابطه تجربی	شرایط آزمایشگاهی				
		L_a (mm)	Y_G (mm)	h_t (mm)	d_{50} (mm)	$q \times 10^3$ (m^2/s)
Schoklitch (1932)	$D_{Se} = 0.378y_0^{0.5} q^{0.35}$	۹۰-۴۸۰	-	۲۴-۶۸	۲-۱۲	۹-۷۰
Muller (1944)	$D_{Se} = 10.35\Delta y^{0.5} q^{0.6} d_{90}^{-0.4} - h_t$	۶۰	-	۴۰-۱۰۰	۱-۴	۴-۲۵
Shalash (1959)	$D_{Se} = 12.31\Delta y^{1.1} q^{0.6} d_{90}^{-0.4} L_a^{-0.6} - h_t$	-	-	۵۰-۸۰	۱-۳	۱۱-۲۷
Qayoum (1960)	$D_{Se} = 1.76\Delta y^{0.22} q^{0.4} d_{90}^{-0.22} h_t^{0.4} - h_t$	۰	-	۶۰-۱۳۰	۳-۱۰	۸-۲۴
Altinbilik and Basmaci (1973)	$D_{Se} = F_0^{1.5} (\tan \phi)^{0.5} Y_G^{0.75} d_{50}^{0.25}$	۰	۶-۵۰	۱۶۰-۲۵۰	۱-۶	۳-۲۱
Chatterjee et al. (1994)	$D_{Se} = 0.775F_j Y_G$	-	۲۰-۵۰	-	۱-۴	۱۶-۴۲
علی حسینی (۱۳۸۷)	$D_{Se} = 0.1695F_0^{0.994} Y_G^{0.406} h_t^{0.594}$	۲۵۰	۱۰-۵۰	۷۲-۱۸۰	۱-۳	۴-۲۶

پارامترهای بدون بعد استفاده و با انتخاب متغیرهای γ_s' ، Y_G و g به‌عنوان متغیرهای تکراری در هر یک از نسبت-های بدون بعد، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{D_{Se}}{Y_G} = f\left(F_0, \frac{h_t}{Y_G}, \frac{L_a}{Y_G}, \frac{L_R}{Y_G}\right) \quad (5)$$

رابطه (5) را برای سادگی به‌صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\tilde{D}_{Se} = f(F_0, \tilde{h}_t, \tilde{L}_a, \tilde{L}_R) \quad (6)$$

که در آن F_0 عدد فرود ذرات بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_0 = \frac{V_j}{\sqrt{gd_{50} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}}} \quad (7)$$

در شکل ۱، پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی ناشی از جت افقی مستغرق در این تحقیق نشان داده شده است.

۲- روش تحقیق

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. برای این منظور، فلوم آزمایشگاهی با جنس پرس‌پکس^۱ مطابق شکل ۲ استفاده شده است. بستر قسمت فرسایش‌پذیر فلوم از جنس ماسه غیرچسبنده با $d_{50}=1$ mm و ضریب دانه‌بندی $(\sigma_g=(d_{84}/d_{16})^{0.5}=1.394)$ انتخاب شد که چون σ_g کمتر از ۱/۵ است، بر اساس تعریف شفافی بجزستان (۱۳۸۴)، از نوع دانه‌بندی یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. برای ایجاد جت افقی، از یک دریچه کشویی که قابلیت بالا و پایین رفتن بر روی دیوارهای فلوم به‌منظور ایجاد ضخامت‌های مختلف جت افقی (بازشدگی‌های مختلف دریچه) را داشت، استفاده شد.

۲- پارامترهای مشخصه ذرات بستر فرسایش‌پذیر شامل: قطر متوسط (d_{50})، جرم مخصوص (ρ_s)، ضریب چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و انحراف معیار هندسی (σ_g).

۳- پارامترهای مربوط به هندسه جت افقی شامل: سرعت جت (V_j)، ضخامت جت (بازشدگی دریچه) (Y_G) و عرض جت (عرض دریچه کشویی) (b).

۴- پارامترهای مربوط به محافظ بستر شامل: طول کف‌بند (L_a)، طول سنگچین (L_R)

۵- زمان (t)

۱-۲- تحلیل ابعادی

اگر D_{Se} به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابعاد پروفیل طولی آب‌شستگی، معرف حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی باشد، می‌توان پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی را به‌صورت تابع زیر در نظر گرفت (Dey and Sarkar, 2006):

$$D_{Se} = f\left(q, U, Y, h_t, \rho, \nu, g, d_{50}, \rho_s, C, \phi, \sigma_g, V_j, Y_G, b, L_a, L_R, t\right) \quad (1)$$

با توجه به محدودیت‌های تحقیق حاضر، بررسی تمامی متغیرها امکان‌پذیر نبوده و بنابراین با صرف‌نظر کردن از پارامترهای ثابت در رابطه (۱) می‌توان نوشت:

$$D_{Se} = f(h_t, \rho, g, d_{50}, \rho_s, V_j, Y_G, L_a, L_R) \quad (2)$$

با تعریف وزن مخصوص غوطه‌وری ذرات بستر (γ_s') به‌صورت زیر:

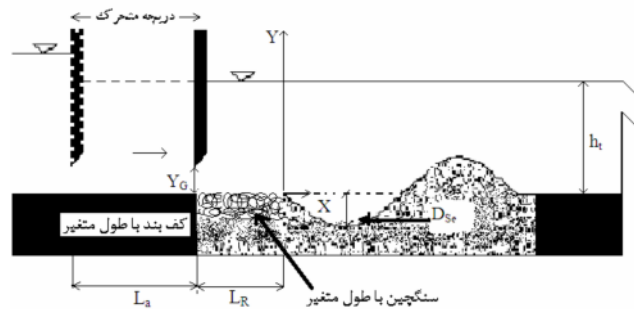
$$\gamma_s' = g(\rho_s - \rho) \quad (3)$$

رابطه (۲) چنین نوشته می‌شود:

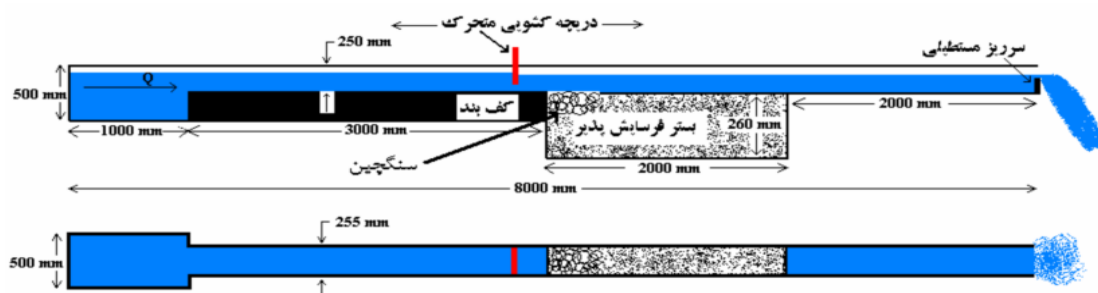
$$D_{Se} = f(h_t, \rho, g, d_{50}, \gamma_s', V_j, Y_G, L_a, L_R) \quad (4)$$

با توجه به کاربرد عمومی روش Π باکینگهام برای تحلیل ابعادی (شفافی بجزستان، ۱۳۸۴)، از این روش برای تعیین

1. Perspex



شکل ۱ معرفی پارامترهای مؤثر بر آب‌شستگی در تحقیق



شکل ۲ مقطع و طرحواره فلوم آزمایشگاهی

بنابراین با توجه به محدودیت‌های موجود (از نظر امکانات آزمایشگاهی و زمان انجام هر آزمایش) و همچنین اختلاف نه چندان زیاد میان عمق آب‌شستگی در زمانهای بیشتر، مدت ۱ ساعت به‌عنوان زمان تعادل نسبی (T_{Re}) برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.

با توجه به تشابه پروفیل‌های طولی آب‌شستگی در عرض کانال، یک کاغذ شفاف در یک طرف دیوار کانال نصب و تغییرات بستر فرسایش‌پذیر بر روی آن رسم شد. لازم است ذکر شود که این روش برداشت پروفیل، پیشتر توسط محققان مختلفی مانند Chatterjee et al. (1994) استفاده شده است.

در این تحقیق ۱۶۵ آزمایش انجام شد که با توجه به عمق پایاب، در تمامی آنها پرش هیدرولیکی مستغرق در پایین‌دست دریچه صورت می‌گرفت. این آزمایش‌ها در سه دسته برنامه‌ریزی و انجام شد. در دسته اول، ۱۵

برای کنترل عمق پایاب از یک سرریز کنترلی در انتهای فلوم استفاده شد. عمق جریان در پایاب به‌وسیله ژرفسنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای ایجاد کف‌بند با طول‌های مختلف، موقعیت دریچه از ابتدای بستر فرسایش‌پذیر به سمت بالادست فلوم تغییر داده می‌شد تا کف فلوم به‌عنوان کف‌بند، عمل کند. مطابق توصیه IRC- (1985) 89، اندازه ذرات ($d_{50-R}=18 \text{ mm}$) و مقدار ضخامت سنگچین ($W_R=40 \text{ mm}$) در نظر گرفته شد. پس از انجام چند آزمایش بلند مدت در شرایط مختلف هیدرولیکی که در آن‌ها آب‌شستگی تقریباً به حالت تعادل کامل رسید، مشخص شد که در بدترین شرایط، ۸۳ و ۹۰ درصد از آب‌شستگی در زمان تعادل کامل، به‌ترتیب در زمانهای ۵ و ۱ ساعت اتفاق می‌افتد (شکل ۳).

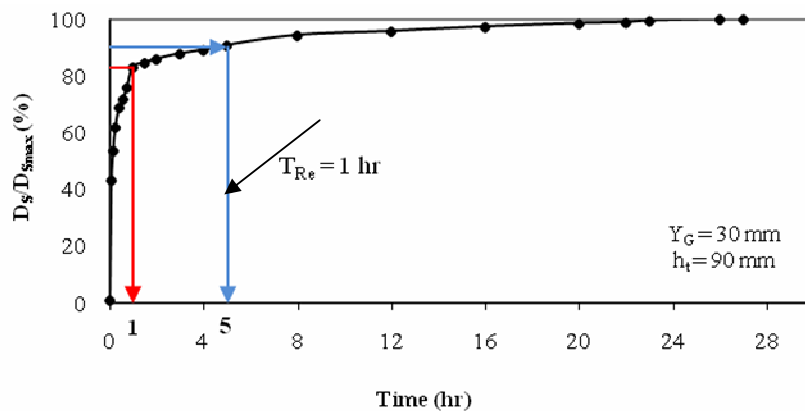
1. Point Gage

دریچه در نزدیکی بستر از تنش برشی بحرانی ذرات بیشتر شده و به فرسایش و انتقال ذرات به بستر پایین دست منجر می‌گردد که در نتیجه حفره آب‌شستگی در پایین دست دریچه ایجاد می‌شود. با گذشت زمان، عمق این حفره و در نتیجه عمق آب در این محل افزایش یافته و با توجه به قانون پیوستگی، سرعت جریان در محل حفره کاهش می‌یابد. در نتیجه، تنش برشی جت و در نتیجه ظرفیت فرسایش‌دهندگی آن با توجه به آشفستگی زیاد در محل حفره نیز استهلاک می‌یابد. پس از رسیدن به تعادل نسبی، نرخ آب‌شستگی بسیار کند شده و عمق آن (D_{Se}) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. برای کنترل آب‌شستگی از دو راهکار حفاظت بستر توسط کف‌بند و سنگچین استفاده می‌شود.

آزمایش در شرایط هیدرولیکی متفاوت (پنج عمق پایاب و سه بازشدگی دریچه) در حالت بستر حفاظت نشده انجام شد. در آزمایش‌های دسته دوم با استفاده از پنج طول مختلف کف‌بند، بستر فرسایش‌پذیر محافظت شده و آزمایش‌ها در همان شرایط هیدرولیکی دسته اول، تکرار شد. در دسته سوم، در شرایط هیدرولیکی مشابه با دسته‌های قبل، ۷۵ آزمایش با استفاده از پنج طول مختلف سنگچین انجام شد. جدول ۲، محدوده پارامترهای ثابت و متغیر در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

۳- تحلیل نتایج

در شرایطی که بستر فرسایش‌پذیر در پایین دست دریچه حفاظت نشده باشد، تنش برشی جت خروجی از زیر



شکل ۳ تعیین زمان انجام هر آزمایش با توجه به زمان تعادل نسبی

جدول ۲ محدوده پارامترهای ثابت و متغیر در این تحقیق

q (m ² /s)	طول کف‌بند L_a (mm)	طول سنگچین L_R (mm)	عمق پایاب h_t (mm)	بازشدگی دریچه Y_G (mm)	سرعت جت V_j (m/s)	عدد فرود ذرات F_0
۰/۱۱۷۷	۰-۲۵۰	۰-۲۵۰	۹۰-۱۳۰	۳۰-۵۰	۰/۳۷ - ۰/۶۳	۲/۹ - ۴/۹

$$\bar{D}_{Se} = \alpha(F_0)^\beta (\bar{h}_t)^\gamma (\bar{L}_a)^\lambda \quad (8)$$

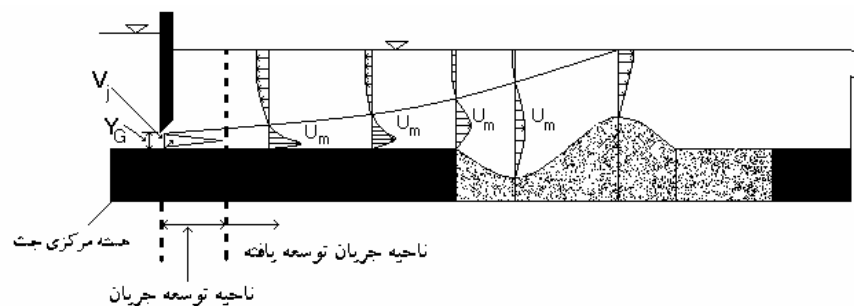
که در آن ضرایب تجربی α ، β ، γ و λ تابعی از پارامترهای مسأله است. با توجه به رابطه (۸)، تأثیر هر یک از پارامترهای بی‌بعد مستقل بر پارامتر بی‌بعد وابسته \bar{D}_{Se} ، با استفاده از نتایج آزمایشهای حاضر بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، با افزایش \bar{L}_a ، \bar{D}_{Se} کاهش پیدا می‌یابد. همچنین به ازای مقدار ثابت \bar{L}_a ، با کاهش \bar{h}_t و F_0 ، از \bar{D}_{Se} کاسته می‌شود. با توجه به رابطه (۸) و با استفاده از روش حداقل مربعات (LSM) حداقل مجموع مربعات خطای بین مقادیر مشاهده و محاسبه شده (Wolberg, 2005) ضرایب تجربی α ، β ، γ و λ به دست آمده و رابطه بی‌بعد زیر برای برآورد \bar{D}_{Se} در شرایط حفاظت بستر به وسیله کف‌بند پیشنهاد می‌شود:

$$\bar{D}_{Se} = 0.177(F_0)^{0.956} (\bar{h}_t)^{0.784} (\bar{L}_a)^{-0.135} \quad (9)$$

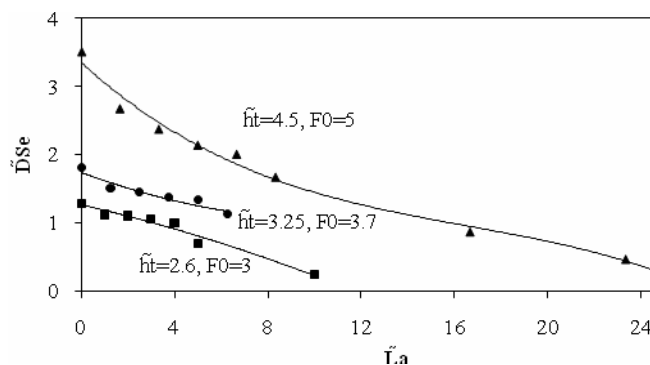
همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، با افزایش طول بستر حفاظت شده، سرعت در هسته مرکزی (U_m) کاهش یافته و در نتیجه پس از رسیدن به بستر فرسایش‌پذیر، از ظرفیت آب‌شستگی آن نسبت به نقطه خروجی از زیر دریچه، کاسته می‌شود. هرچه طول بستر حفاظت شده بیشتر باشد، امکان این که جت تا پیش از رسیدن به بستر فرسایش‌پذیر به حالت کاملاً توسعه یافته در آید، بیشتر می‌شود. در ادامه، تأثیر هر یک از این راهکارها، با طول‌های متغیر و در شرایط مختلف هیدرولیکی، بر کاهش \bar{D}_{Se} تحلیل می‌شود.

۳-۱- تأثیر طول کف‌بند

در این دسته از آزمایشها، بستر فرسایش‌پذیر در برابر آب‌شستگی به وسیله کف‌بند محافظت شد. بنابراین رابطه (۶) را می‌توان به صورت عمومی زیر نوشت:



شکل ۴ طرحواره روند شکل‌گیری جت خروجی از زیر دریچه



شکل ۵ نمونه‌ای از تغییر \bar{D}_{Se} بر حسب \bar{L}_a ، \bar{h}_t و F_0

آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول رابطه بالا است (جدول ۳ و شکل ۶).

۳-۲- تأثیر طول سنگچین

در این دسته از آزمایشها، بستر فرسایش‌پذیر در برابر آب‌شستگی به وسیله سنگچین محافظت شد. بنابراین رابطه (۶) به صورت عمومی زیر نوشته شد:

$$\bar{D}_{Se} = k(F_0)^{\eta} (\bar{h}_t)^{\delta} (\bar{L}_R)^{\xi} \quad (11)$$

که در آن ضرایب تجربی k ، η ، δ و ξ تابعی از پارامترهای مسأله می‌باشند.

ضریب همبستگی رابطه بالا برابر $R^2 = 0.87$ بوده و در محدوده $0 < \bar{L}_a \leq 9$ و $2 \leq \bar{h}_t \leq 4.5$ ، $3 \leq F_0 \leq 5$ استفاده است. رابطه (۹) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$D_{Se} = 0.177 F_0^{0.956} Y_G^{0.351} \bar{h}_t^{0.784} L_a^{-0.135} \quad (10)$$

مقایسه مقادیر مشاهده شده D_{Se} با مقادیر محاسبه شده از رابطه (۱۰) و همچنین با روابط تجربی پژوهشگران قبلی که شرایط آزمایشگاهی مشابهی با تحقیق حاضر داشتند (جدول ۱) نشان داد که بیشتر داده‌ها در محدوده $\pm 20\%$ خطا قرار دارند. همچنین خطا برابر $\%Error = 18$ به دست

جدول ۳ مقایسه مقادیر مشاهده شده D_{Se} با مقادیر محاسبه شده از روابط تجربی پژوهشگران قبلی

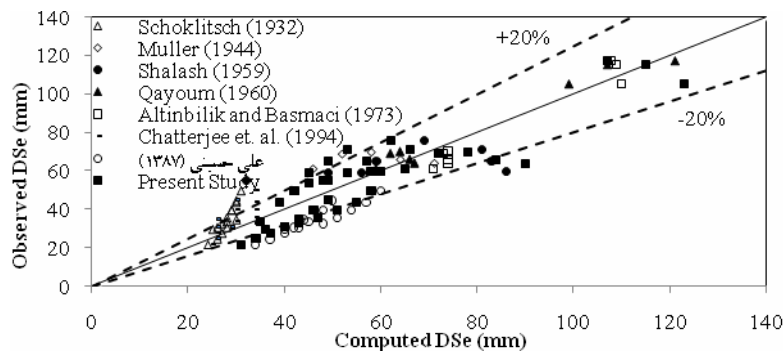
M	تحقیق حاضر		Schoklitsch (1932)		Muller (1944)		Shalash (1959)		Qayoum (1960)		Altinbilik & Basmaci (1973)		Chatterjee et al. (1994)		علی حسینی (۱۳۸۷)	
	C	%Er	C	%Er	C	%Er	C	%Er	C	%Er	C	%Er	C	%Er	C	%Er
۶۱	۶۵	۷	*	*	۴۶	۲۴	*	*	۵۹	۳	۷۱	۱۶	*	*	*	*
۶۹	۷۲	۴	*	*	۵۲	۲۵	*	*	۶۲	۱۰	۷۳	۵	*	*	*	*
۷۰	۷۸	۱۲	*	*	۵۸	۱۷	*	*	۶۴	۸	۷۴	۵	*	*	*	*
۶۶	۸۴	۲۷	*	*	۶۴	۲	*	*	۶۶	۰	۷۴	۱۲	*	*	*	*
۶۴	۹۰	۴۰	*	*	۷۱	۱۱	*	*	۶۷	۴	۷۴	۱۶	*	*	*	*
۳۶	۴۷	۳۱	۲۸	۲۲	*	*	*	*	*	*	*	*	۳۴	۵	۵۱	۴۱
۳۰	۳۶	۲۱	۲۵	۱۸	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۹	۲	۴۰	۳۴
۳۱	۴۰	۲۸	۲۶	۱۵	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۹	۵	۴۳	۳۸
۲۵	۳۴	۳۶	۲۶	۳	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۶	۳	۳۷	۴۹
۲۸	۳۷	۳۲	۲۷	۳	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۶	۷	۴۰	۴۱
۳۱	۴۰	۲۹	۲۸	۹	*	*	*	*	*	*	*	*	۲۶	۱۵	۴۲	۳۵
۶۰	۵۸	۴	*	*	*	*	۵۹	۱	*	*	*	*	*	*	*	*
۷۶	۶۲	۱۹	*	*	*	*	۶۹	۹	*	*	*	*	*	*	*	*
۵۹	۴۵	۲۳	*	*	*	*	۵۶	۶	*	*	*	*	*	*	*	*
۶۵	۴۹	۲۴	*	*	*	*	۵۹	۹	*	*	*	*	*	*	*	*
۷۱	۵۳	۲۵	*	*	*	*	۶۶	۷	*	*	*	*	*	*	*	*

M: مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش (mm)

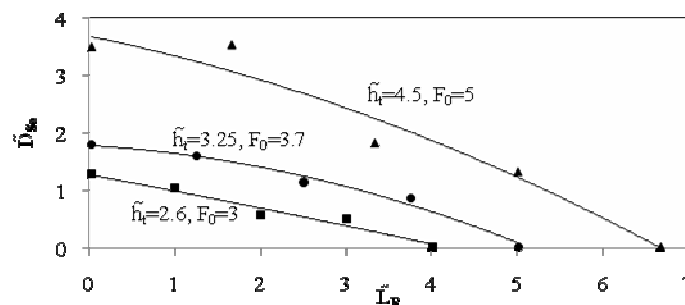
C: مقدار محاسبه شده با رابطه پیشنهادی (mm)

%Er: درصد خطای مقادیر محاسبه شده D_{Se} از روابط سایر محققان، نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق

* عدم تشابه شرایط آزمایشگاهی



شکل ۶ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از روابط مختلف



شکل ۷ نمونه‌ای از تغییر \bar{D}_{Se} بر حسب \bar{L}_R و \bar{h}_t و F_0

$$D_{Se} = 0.108 F_0^{0.735} Y_G^{0.271} h_t^{1.54} L_R^{-0.811} \quad (13)$$

مقادیر مشاهده D_{Se} در برابر مقادیر محاسبه شده برای آن، از رابطه (۱۳)، نشان داد که بیشتر داده‌ها در محدوده $\pm 20\%$ خطا قرار دارند. همچنین خطا برابر $\%Error = 18$ به‌دست آمد که نشان می‌دهد این رابطه دقت قابل قبولی دارد (شکل ۸). لازم است ذکر شود که در تحقیقات قبلی رابطه‌ای که بتوان آن را با مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق و نتایج رابطه (۱۳) مقایسه نمود، یافت نشد.

۳-۳- مقایسه روش کف‌بند با روش سنگچین

در این قسمت، اثر اندازه طول روشهای حفاظت بستر بر عمق آب‌شستگی بررسی می‌شود. در اینجا، پارامتر درصد کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی^۱ (SDDP)، به‌صورت رابطه (۱۴) می‌شود:

با توجه به رابطه (۱۰)، تأثیر هر یک از پارامترهای بی‌بعد مستقل، بر پارامتر بی‌بعد وابسته \bar{D}_{Se} ، با استفاده از نتایج آزمایشهای این تحقیق بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، با افزایش \bar{L}_R ، \bar{D}_{Se} کاهش می‌یابد. همچنین به‌ازای مقدار ثابت \bar{L}_R ، با کاهش \bar{h}_t و F_0 ، از مقدار \bar{D}_{Se} کاسته می‌شود. براساس رابطه (۱۱) و با استفاده از روش حداقل مربعات (LSM)، ضرایب تجربی δ ، η ، κ و ξ به‌دست آمده و رابطه بی‌بعد زیر برای برآورد مقدار \bar{D}_{Se} در شرایط حفاظت بستر به‌وسیله سنگچین پیشنهاد می‌شود:

$$\bar{D}_{Se} = 0.108 (F_0)^{0.735} (\bar{h}_t)^{1.54} (\bar{L}_R)^{-0.811} \quad (14)$$

ضریب همبستگی رابطه بالا برابر $R^2 = 0.80$ بوده و در محدوده $2 \leq \bar{L}_R \leq 5$ و $2 \leq \bar{h}_t \leq 4.5$ ، $3 \leq F_0 \leq 5$ استفاده است. رابطه ۱۲ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

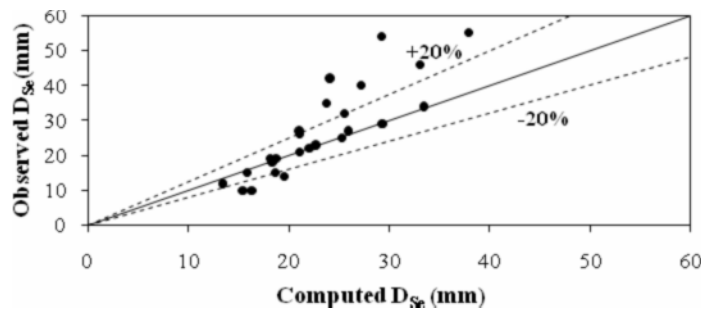
1. Scour Depth Decrease Percentage

می‌شود (SDDP=100%). همچنین مقایسه شیب نمودارها حاکی از آن است که با استفاده از راهکار سنگچین، روند افزایش پارامتر SDDP سریع‌تر است. از آنجا که زبری ذرات تشکیل‌دهنده سنگچین بسیار بیشتر از کف بند بتنی است، انرژی جت عبوری از روی آن بیشتر مستهلک شده و در هنگام رسیدن به بستر فرسایش‌پذیر، این راهکار بیشتر از کف‌بند باعث کاهش آب‌شستگی می‌شود. در این تحقیق، آزمایش‌هایی نیز برای برآورد مقادیر حداقل طول کاربرد هر یک از راهکارهای حفاظت از بستر، انجام شد. هم‌چنانکه در شکل ۹ دیده می‌شود، اجرای سنگچین با طول ۵۰ میلی‌متر تأثیری بر کاهش آب‌شستگی ندارد (SDDP≈0).

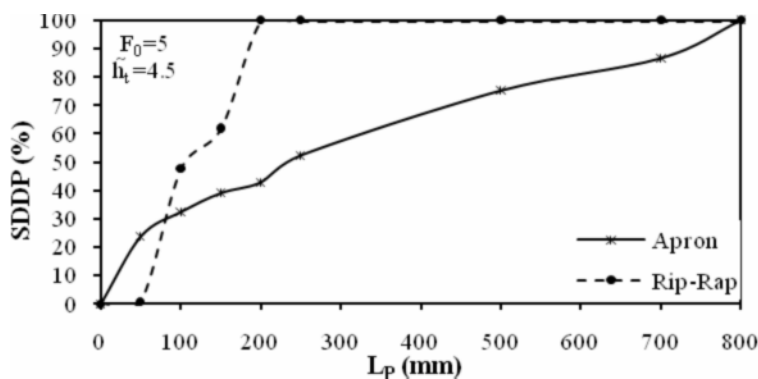
$$SDDP (\%) = 100 - (D_{Sep} / D_{Se0}) * 100 \quad (14)$$

که در آن D_{Sep} حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی در شرایط بستر حفاظت شده با روشهای مختلف D_{Se0} حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی در شرایط بستر حفاظت نشده می‌باشد.

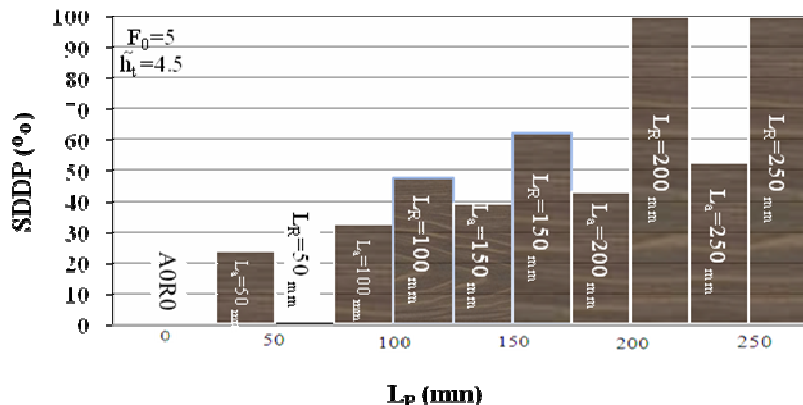
پارامتر SDDP نشان‌دهنده تأثیر هر یک از راهکارهای حفاظت بستر است. با اجرای طول معینی از هر یک از این راهکارها، هرچه SDDP بیشتر باشد، نشان‌دهنده مؤثر بودن آن بر کاهش آب‌شستگی است. به‌عنوان نمونه در شکل ۹ دیده می‌شود که با افزایش طول هر یک از این راهکارها، مقدار SDDP افزایش می‌یابد، تا جایی که افزایش طول در روش کف‌بند و سنگچین به‌ترتیب به مقدار ۸۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، به توقف آب‌شستگی منجر



شکل ۸ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از رابطه (۵)



شکل ۹ مقایسه تأثیر طول کف‌بند و سنگچین بر مقدار SDDP



شکل ۱۰ تأثیر طول راهکارهای حفاظت بستر بر SDDP در بحرانی‌ترین شرایط آب‌شستگی

آنها بیشتر شود، کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

- اگر پوشش بستر توسط سنگچین به‌طور صحیح طراحی و اجرا شود ($\bar{L}_R \geq 2$)، در مقایسه با کف‌بند، بیشتر بر کاهش عمق آب‌شستگی اثر خواهد داشت.

- در شرایط هیدرولیکی $F_0 \leq 5$ و $\bar{h}_t \leq 4.5$ اگر $\bar{L}_a \geq 27$ و $\bar{L}_R \geq 7$ باشد، آب‌شستگی رخ نخواهد داد. در همین شرایط هیدرولیکی چنانچه $\bar{L}_R \geq 2$ باشد، سنگچین پایدار خواهد بود و لذا توصیه می‌شود حداقل طول نسبی سنگچین برابر ۲ در نظر گرفته شود.

- در هر یک از راهکارهای کف‌بند و سنگچین، میانگین خطای روابط پیشنهادی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برابر $\text{Error} = 18\%$ بود. همچنین مقایسه نتایج به‌دست آمده از روابط پیشنهادی با روابط سایر محققان نشان داد که بیشتر داده‌ها در محدوده مناسب خطا ($\pm 20\%$) قرار دارند. این نتایج، نشان‌دهنده دقت قابل قبول این روابط برای برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی (با در نظر گرفتن پارامتر طول کف‌بند و یا سنگچین) است.

به نظر می‌رسد که در این حالت، به‌علت آشفته‌گی جت و طول کم سنگچین، ذرات تشکیل‌دهنده آن پایداری خود را از دست داده و به درون حفره آب‌شستگی ریزش کرده و کارایی خود را از دست می‌دهند. برای مقایسه بهتر، در نمودار ستونی شکل ۱۰، تأثیر روشهای مختلف حفاظت بستر بر SDDP در بحرانی‌ترین حالت آب‌شستگی نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر طول راهکارهای حفاظت بستر توسط کف‌بند و سنگچین بر آب‌شستگی موضعی ناشی از جت افقی در پایین‌دست دریچه کشویی مطالعه و روابطی برای برآورد حداکثر عمق آب‌شستگی با در نظر گرفتن طول مؤثر این راهکارها به‌صورت جداگانه ارائه شد. بر اساس آزمایش‌های این تحقیق، به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت:

- در صورتی که طول نسبی کف‌بند ($\bar{L}_a \geq 1$) و سنگچین ($\bar{L}_R \geq 2$) باشد، این راهکارهای حفاظتی، آب‌شستگی در بستر را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و هرچه اندازه

۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری (وزارت جهاد کشاورزی) به خاطر در اختیار قرار دادن وسایل و تجهیزات آزمایش‌ها و از شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران وابسته به وزارت نیرو به سبب تأمین بخشی از هزینه‌های این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- فهرست علائم

U_m	سرعت متوسط جت
V_j	سرعت جت خروجی از دریچه
W_R	ضخامت بستر حفاظت شده به‌وسیله سنگچین
Y_G	بازشدگی دریچه
\tilde{D}_{Se}	D_{Se}/Y_G
\tilde{h}_t	h_t/Y_G
\tilde{L}_a	L_a/Y_G
\tilde{L}_R	L_R/Y_G
γ_s'	وزن مخصوص غوطه‌وری ذرات بستر
ρ	جرم مخصوص آب
ρ_s	جرم مخصوص ذرات
σ_g	انحراف معیار هندسی ذرات
φ	زاویه اصطکاک داخلی ذرات
ν	لزجت سینماتیکی
$\xi, \delta, \eta, \kappa, \lambda, \gamma, \beta, \alpha$	ضرایب تجربی

۷- منابع

بیات، ح. (۱۳۷۹). اندرکنش سازه‌های آبی و فرسایش، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
 شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۴). مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
 علی حسینی، پ. (۱۳۸۷). "مطالعه و بررسی آب‌شستگی موضعی ناشی از جت‌های افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران.

Altinbilik, H. D. and Basmaci, Y. (1973). "Localized scour depth downstream of outlet structures", Proc. 11th Congress on large dams, Madrid, pp. 105-121. (Cited in Breusers and Raudkivi (1991)).

Annandale, G.W. (2006). Scour Technology. McGraw- Hill, New York, USA.

Bey, A., Faruque, M. A. A. and Balachandar, R. (2008). "Effect of varying submergence and

b	عرض دریچه کشویی
C	ضریب چسبندگی ذرات
D_S	حداکثر عمق آب‌شستگی در هر لحظه از زمان
D_{Se}	حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی
D_{SeP}	حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی در شرایط بستر حفاظت شده با روش‌های مختلف
D_{Se0}	حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی در شرایط بستر حفاظت نشده
D_{Smax}	حداکثر عمق آب‌شستگی در تعادل نهایی
d_{50}	قطر متوسط ذرات بستر فرسایش‌پذیر
d_{50-R}	قطر متوسط ذرات سنگچین
F_0	عدد فرود ذارت
h_t	عمق پایاب
L_a	طول کف‌بند
L_p	طول محافظ بستر
L_R	طول سنگچین
q	دبی جریان در واحد عرض
S	چگالی ویژه
SDDP	درصد کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان تعادل نسبی
T_{Re}	زمان تعادل نسبی
U	سرعت متوسط جریان

- IRC-89. (1985). Guidelines for design and construction of river training and control works for road bridges, IRC Code 89, Indian Roads Congress, New Delhi, India. (Cited in Dey and Sarkar (2006)).
- Müller, R. (1944). "die kolkbildung beim reinen unterströmen und allgemeinere behandlung des kolkproblems", Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, ETH Zürich Nr. 5. (Cited in Breusers and Raudkivi (1991)).
- Qayoum, A. (1960). "Die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung hinter unterströmten Wehren unter spezieller Berücksichtigung der Gestaltung eines beweglichen Struzbettes." Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina. (رجوع شود به بیات (۱۳۷۹))
- Schoklitch, A. (1932). Kolkbildung unter Überfallstrahlen, Die Wasserwirtschaft. (Cited in Breusers and Raudkivi (1991)).
- Shalash, M. (1959). Die Kolkbildung beim Ausfluss unter Schützen, Diss. T.H. München, Germany. (Cited in Breusers and Raudkivi (1991)).
- Tregnaghi, M. (2008). Local scouring at bed sills under steady and unsteady conditions, Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Padova.
- Wolberg, J. (2005). Data analysis using the method of least squares, Springer-Verlag, New York. USA.
- channel width on local scour by plane turbulent wall jet", J. Hydraulic Res., 46(6), pp. 764-776.
- Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991). Scouring. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Chatterjee, S. S., Ghosh, S. N. and Chatterjee, M. (1994). "Local scour due to submerged horizontal jet", J. Hydraulic Eng., 120(8), pp. 973-992.
- Dey, S. and Sarkar, A. (2006). "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets", J. Hydraulic Eng., 132(3), pp. 246-257.
- Espa, P. and Sibilla, S. (2006). "Experimental study of scour regimes downstream of an apron for intermediate tailwater depths", Proceeding of River Flow2006., Lisbon, Vol. II, pp. 1715-1724.
- Hoffmans, G. J. C. M. and Pilarczyk, K. W. (1995). "Local scour downstream of hydraulic structures", J. Hydraulic Eng., 121(4), pp. 326-340.
- Hoffmans, G. J. C. M. and Verheij, H. J. (1997). Scour manual, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Karim, O. A. and Ali, K. H. M. (2000). "Prediction of patterns in local scour holes caused by turbulent water jets", J. Hydraulic Res., 38(4), pp. 279-288.