

## بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفره آبشستگی پایین دست کالورت لوله ای

جواد نجفی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آب- دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

مسعود قدسیان

دانشیار هیدرولیک بخش عمران- دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۲/۴/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۱۰/۱۵، تاریخ تصویب ۸۲/۱۲/۲۳)

### چکیده

پدیده آبشستگی یک جریان دو فازی می باشد که به روش نظری کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و عموماً از مطالعات صحرایی یا آزمایشگاهی برای شرایط خاص استفاده شده است. این تحقیق بر اساس نتایج آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست کالورت لوله ای می باشد. ابعاد حفره آبشستگی ایجاد شده تابع پارامترهای متعددی نظیر دبی، ارتفاع ریزش جریان، عمق پایاب، قطر کالورت، قطر مصالح و ... می باشد. در این تحقیق به بررسی تغییرات ابعاد حفره آبشستگی و تغییرات ابعاد برآمدگی رسوبات ناشی از حفره آبشستگی در پایین دست آن، در اثر تغییرات پارامترهای سرعت جریان، قطر کالورت، ارتفاع ریزش و عمق پایاب پرداخته شده است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی عمق و عرض حفره آبشستگی و ارتفاع برآمدگی رسوبات با افزایش قطر کالورت افزایش می یابد ولی طول حفره آبشستگی کاهش می یابد. با افزایش عمق پایاب، عمق و عرض حفره آبشستگی کاهش می یابد ولی طول حفره و ارتفاع برآمدگی رسوبات افزایش می یابد. علاوه بر این با افزایش ارتفاع ریزش، عمق و عرض حفره آبشستگی و ارتفاع برآمدگی رسوبات افزایش می یابد ولی طول حفره کاهش می یابد. با تحلیل نتایج آزمایشگاهی نسبت بی بعد هر یک از ابعاد حفره آبشستگی و برآمدگی ناشی از آن به ارتفاع ریزش جریان به صورت تابعی از نسبت عمق پایاب به قطر لوله  $Tw/D$ ، عدد فرود ذرات  $SN$  و نسبت ارتفاع ریزش به قطر لوله  $Hc/D$  بدست آمده است.

واژه های کلیدی: کالورت، آبشستگی، ارتفاع ریزش، عمق پایاب، عدد فرود ذرات

### مقدمه

محققین برای مطالعه این پدیده از روشهای مختلفی از قبیل روش نظری، روش تحلیل ابعادی و مشاهدات صحرایی استفاده کرده اند که به دلیل پیچیدگی شرایط حاکم بر این پدیده روش تحلیل ابعادی به همراه مدل فیزیکی و یا مشاهدات صحرایی می تواند مناسبترین روش مطالعه این پدیده باشد.

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می دهد که در اثر برخورد جریان به سطح پایاب، در لایه مرزی که در اطراف جت ریزشی تشکیل می گردد به تدریج الگوی خطوط جریان تغییر میکند و جریان آشفته می گردد. به دلیل آشفته گی جریان یکسری گردابه Eddy در محدوده بستر آبرفتی و پایین دست کالورت تشکیل می شود که این گردابهها در کندن، معلق کردن و انتقال رسوبات نقش بارزی دارند. با گذشت زمان، به علت مستهلک شدن انرژی سیال، از

کالورتها یا آبروها مجاری انتقال آب هستند که به منظور هدایت آب یک کانال یا سیلاب از یک طرف جاده، بزرگراه یا راه آهن به طرف دیگر مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین نوعی از این سازه در تخلیه کننده سدها نیز کاربرد دارد.

بستر طبیعی کانال در اثر عبور جریان آب دستخوش فرسایش می شود، به فرسایش موضعی که در اثر جریان ایجاد می گردد آبشستگی گفته می شود. در این مقاله منظور از آبشستگی، فرسایشی است که در پایین دست جریان خروجی از کالورت لوله ای و در بستر آبرفتی کانال رخ می دهد. جریان در محل وقوع آبشستگی یک فرآیند دو فازی (آب و رسوب) می باشد بنابراین آبشستگی متاثر از متغیرهای متعددی از قبیل پارامترهای جریان، مشخصات بستر آبرفتی، زمان و هندسه آبراهه می باشد.

Rabinson (۱۹۷۱)، Ghodsian و همکاران (۱۹۹۸)،  
Rajaratnam و Raudkivi (۱۹۹۱) و Breusers  
و Mazurek (۲۰۰۲) نیز به بررسی پدیده آبشستگی  
ناشی از جتهای ریزشی پرداختند.  
مطالعات انجام شده نشان می دهد که در اکثر کارهای  
انجام شده تأثیر ارتفاع ریزش جت آب و عمق پایاب و در  
نتیجه تأثیر متقابل این دو پارامتر به طور کامل در نظر  
گرفته نشده است. عمق پایاب در بیشتر کارهای انجام  
شده قبلی برابر عمق طبیعی جریان در پایین دست  
کالورت بوده است. همچنین توجه کمتری به ابعاد و  
هندسه حفره آبشستگی، ابعاد و هندسه برآمدگی ایجاد  
شده در پایین دست حفره شده است. در این مقاله به  
بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی نظیر ارتفاع ریزش  
جریان، عمق پایاب و عدد فرود ذرات بر روی ابعاد حفره  
آبشستگی و بر آمدگی ناشی از ذرات ته نشین شده در  
پایین دست حفره پرداخته شده است.

### عوامل موثر بر آبشستگی

به طور کلی می توان عوامل موثر بر آبشستگی  
را به چهار دسته به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

#### ۱- پارامترهای مشخصه جریان

پارامترهای جریان که در آبشستگی موثر می باشند عبارتند  
از جرم مخصوص سیال ( $\rho$ )، لزجت سیال ( $\mu$ )، شتاب  
ثقل ( $g$ )، سرعت جریان ( $V$ )، ارتفاع ریزش جت آب از  
وسط مقطع کالورت ( $H_c$ ) و عمق پایاب ( $T_w$ ).

#### ۲- پارامترهای مشخصه ذرات بستر

پارامترهای ذرات رسوبی عبارتند از قطر مشخصه ذرات  
( $d_{50}$ )، جرم مخصوص ذرات رسوبی ( $\rho_s$ )، انحراف معیار  
قطر ذرات ( $\sigma_g$ ) و زاویه ایستایی ذرات ( $\Phi$ ).

#### ۳- پارامترهای هندسه کالورت

پدیده آبشستگی به دلیل موضعی بودنش وابستگی  
شدیدی به شکل کالورت و پارامترهای هندسی آن دارد.  
بنابراین پارامترهای هندسی کالورت را می توان در شیب  
کالورت ( $S$ )، زبری بدنه کالورت ( $n$ )، قطر کالورت ( $D$ ) و  
طول کالورت ( $L$ ) خلاصه نمود.

#### ۴- زمان ( $t$ )

شدت گردابها و تنش برشی موثر بر ذرات در کف بستر و  
در حفره آبشستگی کاسته می شود و در نهایت پروفیل  
بستر تقریباً به حالت پایدار می رسند.

اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی به منظور تخمین ابعاد  
حفره آبشستگی صورت گرفته و روابط متعددی برای این  
منظور ارائه گردیده است ولی پیچیدگی مسئله و دخالت  
عوامل مختلف در پدیده سبب شده است که تحقیقات در  
این زمینه هنوز ادامه داشته باشد.

Ruff و همکارانش (۱۹۸۲)، Abt و همکارانش (۱۹۸۴)  
تحقیقاتی به منظور بر آورد ابعاد حفره آبشستگی انجام  
دادند. نتایج ایشان نشان داد که عدد فرود پایین دست  
کالورت عامل موثری می باشد.

Abt و همکارانش (۱۹۸۷) بررسی آزمایشگاهی روی  
تأثیر شکل کالورت بر روی ابعاد حفره آبشستگی انجام و  
نسبتهای بی بعد ابعاد حفره را به شدت جریان  
 $D.I^* = Q/A(g.R_H)^{0.5}$  ارتباط دادند. در این رابطه  $Q$   
دبی عبوری از کالورت،  $A$  سطح مقطع کالورت،  $R_H$  شعاع  
هیدرولیکی جریان و  $g$  شتاب ثقل زمین است.

Blaisdell و Anderson (۱۹۸۸) تأثیر ارتفاع ریزش  
جریان روی ابعاد حفره آبشستگی در یک لوله کنسولی را  
مورد بررسی قرار دادند.

Doehring و Abt (۱۹۹۴) تأثیر ارتفاع ریزش جریان  
روی ابعاد حفره آبشستگی را مورد تحقیق قرار دادند و  
ضرایب اصلاحی جهت بر آورد ابعاد حفره ارائه دادند.

Ojha (۱۹۹۹) با آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن داده های  
Doehring و Abt (۱۹۹۴) ابعاد حفره آبشستگی را به  
ارتفاع ریزش و عدد فرود ذرات  $SN$  ارتباط داد.

قدسیان (۲۰۰۲) با آنالیز ابعادی و در نظر گرفتن داده  
های Doehring و Abt (۱۹۹۴) روابط بی بعدی برای  
پارامترهای حفره آبشستگی، که تابعی از ارتفاع ریزش و  
پارامتر شدت جریان بود، بدست آورد.

محققین دیگری نظیر: Doddiah و همکاران (۱۹۵۳)،

Westrichand و Kobus (۱۹۷۳)، Rajaratnam  
(۱۹۸۲)، Aderibigde و Rajaratnam (۱۹۹۶)،  
Berry و Rajaratnam (۱۹۷۷)، Lim (۱۹۹۶)،  
Chin (۱۹۹۲)، Lim (۱۹۹۵) و Chiew و Lim (۱۹۹۶)،  
Ade و Rajaratnam (۱۹۹۸).

با استفاده از آنالیز ابعادی به روش  $\Pi$  باکینگهام می توان رابطه (۲) را بر حسب عوامل بی بعد به قرار زیر بیان نمود:

$$\frac{\phi}{D} = f\left(\frac{Hc}{D}, \frac{Tw}{D}, \frac{d_{50}}{D}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{V}{\sqrt{g.D}}\right) \quad (3)$$

با ترکیب  $\frac{\phi}{D}$  با  $\frac{Hc}{D}$  رابطه  $\frac{\phi}{Hc}$  بدست می آید.  
با ترکیب  $\frac{d_{50}}{D}$  با  $\frac{V}{\sqrt{g.D}}$  و  $\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  به رابطه زیر می رسیم:

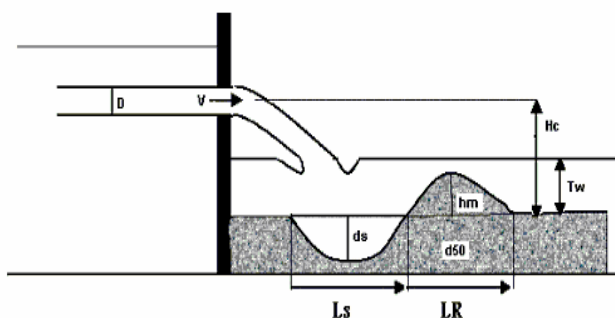
$$SN = \frac{V}{\sqrt{d_{50} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)}} \quad (4)$$

که در آن: SN عدد فرود ذرات در خروجی کالورت یا عدد پایداری می باشد.

با ترکیب رابطه فوق با  $\frac{Hc}{D}$  و پس از ساده سازی، می توان رابطه (۳) را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\phi}{Hc} = f\left(\frac{Tw}{D}, \frac{SN.D}{Hc}\right) \quad (5)$$

که در آن  $\phi$  معرف عمق حداکثر آبستگي ds، عرض حفره آبستگي  $Ws$ ، طول حفره آبستگي  $Ls$ ، ارتفاع رسوبات ته نشین شده در پایین دست حفره  $hm$  یا طول رسوبات ته نشین شده در پایین دست حفره آبستگي  $LR$ ، که در شکل (۱) نشان داده شده اند، می باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق هدف بررسی مقادیر حداکثر ابعاد حفره آبستگي بوده است لذا از بررسی تغییرات زمانی آبستگي صرف نظر شده است.



شکل ۱: پارامترهای حفره آبستگي.

آبستگي در ابتدا شدت بیشتری دارد و با گذشت زمان از شدت آن کاسته میشود. در مراحل اولیه آبستگي، به دلیل برخورد جت ریزشی با سطح بستر و تشکیل گردابها در مجاورت بستر، فرسایش از شدت بیشتری برخوردار است ولی با گذشت زمان با کاهش شدت گردابها آبستگي نیز کاهش می یابد و در داز مدت می توان گفت که بستر به طور نسبی به حالت تعادل می رسد. در این حالت تغییرات قابل توجهی در تراز بستر مشاهده نمی شود.

### تحلیل ابعادی آبستگي

اگر  $\phi$  نشان دهنده حداکثر ابعاد حفره آبستگي و یا ابعاد برآمدگی رسوبات پایین دست حفره باشد می توان گفت که پارامترهای موثر در آبستگي به صورت تابع زیر می باشد:

$$\phi = f(D, Tw, SL, Hc, n, V, \rho, \rho_s, g, \sigma, d_{50}, \mu, \Phi) \quad (1)$$

با توجه به اینکه بررسی تک تک متغیرها با توجه به محدودیتهای موجود امکان پذیر نیست لذا از یکسری متغیرها که نقش خیلی مهمی در مسئله ندارند صرف نظر کرده و با در نظر گرفتن متغیرهای اصلی و تأثیر گذار با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای بی بعد بدست می آید. انحراف معیار قطر ذرات رسوبی، زاویه ایستایی و عامل شکل ذرات رسوبی، در صورتی که از یک نوع مواد رسوبی با دانه بندی تقریباً یکنواخت استفاده شود، را می توان ثابت فرض کرد. همچنین اگر شیب کالورت، جنس کالورت و طول کالورت ثابت باشند می توان آنها را هم ثابت در نظر گرفت. علاوه بر این اثر لزجت سینماتیکی به علت آشفتگی بودن جریان در همه آزمایشات صرف نظر گردیده است.

لذا با توجه به مطالب فوق رابطه (۱) را می توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\phi = f(V, D, Tw, Hc, d_{50}, g, \rho, \rho_s) \quad (2)$$

## آزمایشها

آزمایشها در فلومی شیب پذیر به طول ۱۳ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. اندازه گیری دبی جریان به صورت حجمی انجام گرفت. کالورتها از جنس PVC ساخته شده و در فاصله ۶ متری از ابتدای فلوم، به صورت افقی بر روی صفحه ای چوبی، نصب گردید. چها قطر کالورت ۲/۲، ۲/۸، ۳/۶ و ۴/۶ سانتیمتر استفاده شد. رسوبات به کار رفته از جنس ماسه شسته شده به قطر میانگین ۱/۴ میلیمتر، با چگالی ذرات

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.3 \text{ و انحراف معیار } G_s = 2.63 \frac{gr}{cm^3}$$

بود. در اینجا  $d_{16}$  و  $d_{84}$  به ترتیب قطر ذراتی است که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن ریزتر است. رسوبات در کف فلوم و در پایین دست کالورت به ضخامت ۲۰ سانتیمتر پهن شد. برای اندازه گیری عمق جریان در پایین دست کالورت و برداشت توپوگرافی بستر از دستگاه عمق سنج دیجیتالی با دقت  $\pm 0.1mm$  استفاده شد. برای تنظیم عمق پایاب از دریچه تعبیه شده در انتهای فلوم استفاده شد.

بعد از نصب هر کالورت با قطر ثابت و ارتفاع ریزش ثابت، جریان به آرامی وارد فلوم می شد و عمق پایاب توسط دریچه انتهای فلوم تنظیم می گردید. پس از مدت زمانی که جریان حالت پایدار و ثابت پیدا می کرد آزمایش شروع می شد. مدت زمان هر آزمایش حدود ۲۲ ساعت بود.

با توجه به آنالیز ابعادی که انجام شد و پارامترهای بدون بعدی که بدست آمد متغیرهای مربوطه در هر آزمایش اندازه گیری می شد. اولین پارامتر، مربوط به دبی جریان  $Q$  و یا سرعت جت خروجی از کالورت  $V$  بود. بقیه متغیرها که باید اندازه گیری می شد شامل ابعاد حفره آبستگي مثل عمق، عرض، طول و نقطه شروع حفره آبستگي و همچنین ابعاد برآمدگی پایین دست حفره آبستگي مثل ارتفاع برآمدگی، طول برآمدگی و عرض برآمدگی رسوبات می شد.

بعد از اتمام هر آزمایش و بعد از اینکه جریان آب کاملاً از بستر زهکشی می شد پروفیل حفره آبستگي و برآمدگی ناشی از آن به صورت شبکه مستطیلی  $3 \times 5$  سانتی متر به صورت نقطه‌ای برداشت می شد. محدوده داده‌های برداشت شده در جدول (۱) ارائه شده است.

## نتایج

برخورد جت آب به بستر سبب افزایش تنش برشی در مجاورت بستر شده و در نتیجه ذرات رسوب از سطح بستر جدا و به صورت بار بستر و بار معلق جابجا می شوند. در لحظات اولیه آزمایش، خصوصاً برای حالتی که عمق پایاب کم باشد، جت ریزشی تا مجاورت بستر آبرفتی در پایاب نفوذ کرده و باعث ایجاد گردابهایی می شود که در خلل و فرج بستر نفوذ کرده و سبب جدا شدن ذرات می گردد.

با گذشت زمان و به دلیل استهلاک بخشی از انرژی جریان و افزایش عمق موضعی جریان، شدت فرسایش کاهش می یابد به طوری که ذرات رسوبی به صورت بار بستر و بار معلق به پایین دست حمل و در فاصله اندکی از محل برخورد جت ته نشین می شود. در نتیجه تپه ای ماسه ای در پایین دست حفره آبستگي تشکیل می شود. ارتفاع این تپه ای ماسه ای تابعی از عمق پایاب می باشد به طوری که با کاهش عمق پایاب ارتفاع آن کاهش میابد. مشاهدات انجام شده نشان می دهد که با تغییر قطر کالورت برای یک ارتفاع ریزش و عمق پایاب ثابت ابعاد حفره دستخوش تغییر می گردد و با تغییر ارتفاع ریزش و عمق پایاب هم، ابعاد حفره تغییر پیدا می کند در ادامه به بررسی تک تک ابعاد حفره آبستگي پرداخته شده است و سپس معادلات بدست آمده برای هر کدام ارائه می شود.

جدول ۱: محدوده داده‌های برداشت شده.

| سرعت جت خروجی<br>V<br>(m/s) | عمق<br>آبشستگی<br>ds<br>(cm) | عرض حفره<br>آبشستگی<br>Ws<br>(cm) | طول حفره<br>آبشستگی<br>Ls<br>(cm) | ارتفاع<br>برآمدگی<br>رسوبات<br>hm<br>(mm) | عرض<br>برآمدگی<br>رسوبات<br>WR (cm) | طول برآمدگی<br>رسوبات<br>LR<br>(cm) |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ۰/۵۵-۱/۷۷                   | ۵۶-۱۲۰                       | ۱۹-۳۹                             | ۲۲/۵-۷۶                           | ۱۰-۸۵                                     | ۳۰-۵۵                               | ۱۳-۶۰                               |

## حداکثر عمق آبشستگی

حداکثر عمق حفره آبشستگی ds، فاصله

عمودی از سطح اولیه بستر تا عمیق‌ترین نقطه از پروفیل حفره آبشستگی می‌باشد. برای اینکه بدانیم چه عمقی از بستر پایین دست کالورت را مورد محافظت قرار دهیم نیاز به برآورد عمق آبشستگی داریم.

با توجه به آنالیز ابعادی که صورت گرفت، پارامترهای بی بعد معادله (۵) بدست آمد. در آزمایشات صورت گرفته نسبت Tw/D به سه محدوده تقسیم بندی شد. شکل (۲) تغییرات عمق آبشستگی نسبی ds/Hc را بر حسب SN.D/Hc برای مقادیر مختلف Tw/D نشان می‌دهد. در این شکل از داده‌های Doehring و Abt (۱۹۹۴) که مربوط به محدوده  $Tw/D \leq 0.5$  هست نیز استفاده شده است. نجفی (۱۳۸۱) نشان داد که همخوانی خوبی بین داده های حاضر و داده های Abt و Doehring (۱۹۹۴) وجود دارد. روشن است که افزایش عدد فرود ذرات، افزایش عمق آبشستگی خصوصا در مقادیر کمتر پارامتر Tw/D را به همراه دارد.

شکل (۲) نشان می‌دهد که عمق پایاب تاثیر قابل توجهی بر روی عمق آبشستگی دارد. همچنین روشن است که افزایش Tw، کاهش عمق آبشستگی را برای مقادیر مشخص D و Hc به همراه دارد. با توجه به شکل (۲) بهترین روابطی که برای هر یک از نسبت‌های Tw/D بدست آمد به صورت زیر می‌باشد:

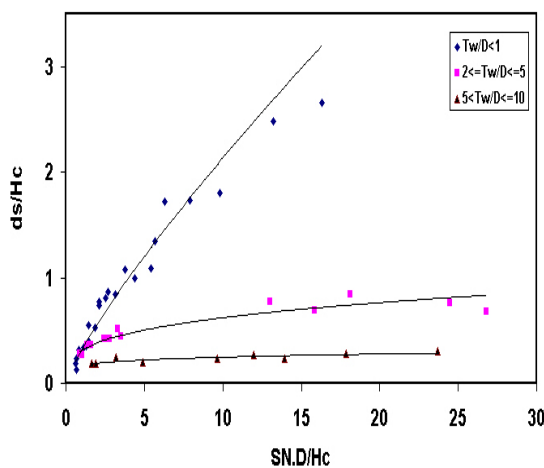
$$\frac{ds}{Hc} = 0.328 \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{0.804} \frac{Tw}{D} < 1 \quad (۶)$$

$$\frac{ds}{Hc} = 0.292 \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{0.327} 2 \leq \frac{Tw}{D} \leq 5 \quad (۷)$$

$$\frac{ds}{Hc} = 0.167 \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{0.181} 5 < \frac{Tw}{D} \leq 10 \quad (۸)$$

ضرایب همبستگی روابط فوق به ترتیب برابر ۰/۹۴، ۰/۹۲۵ و ۰/۹۲۵ می‌باشد. جهت ارائه یک معادله کلی برای نسبت‌های مختلف  $\frac{Tw}{D}$  شکل عمومی معادله زیر در نظر گرفته شد.

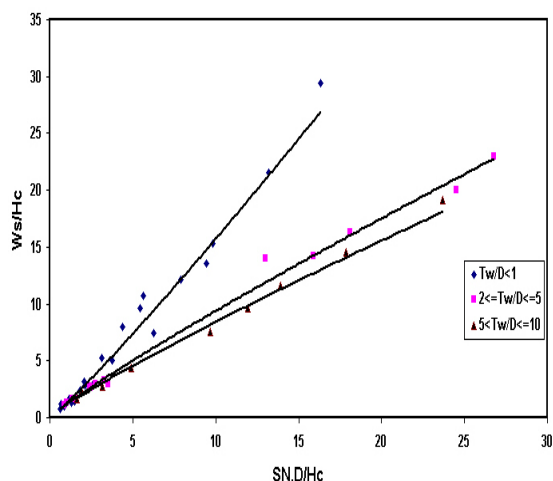
$$\frac{ds}{Hc} = a \left( \frac{Tw}{D} \right)^b \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^c \quad (۹)$$



شکل ۲: تغییرات ds/Hc بر حسب SN.D/Hc و Tw/D.

که در آن a، b و c مقادیر تجربی است و ممکن است تابعی از  $\frac{Tw}{D}$  باشد.

برای بدست آوردن ضرایب معادله (۹) از مقدار خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی E استفاده شد. بدین صورت که بهترین مقادیر ضرایب زمانی است که مقدار E، که به صورت زیر تعریف می‌شود، حداقل باشد:



شکل ۴: تغییرات  $Ws/Hc$  بر حسب  $SN.D/Hc$  و  $Tw/D$ .

### عرض حفره آبشستگی $Ws$

برای اینکه بدانیم چه عرضی از بستر پایین دست کالورت را محافظت کنیم پیش بینی عرض حفره آبشستگی لازم می‌باشد. تغییرات عرض آبشستگی نسبتی  $Ws/Hc$  بر حسب  $SN.D/Hc$  برای مقادیر مختلف  $Tw/D$  در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که عمق پایاب تاثیر قابل توجهی بر روی عرض حفره آبشستگی نیز دارد. همچنین روشن است که افزایش  $Tw$  کاهش عرض حفره آبشستگی را برای مقادیر مشخص  $D$  و  $Hc$  به همراه دارد.

با توجه به شکل (۴) روابط زیر برای نسبت‌های مختلف  $Tw/D$  بدست آمد:

$$\frac{Ws}{Hc} = 1.268 \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{1.094} \frac{Tw}{D} < 1 \quad (12)$$

$$\frac{Ws}{Hc} = 1.183 \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{0.9} 2 \leq \frac{Tw}{D} \leq 5 \quad (13)$$

$$\frac{Ws}{Hc} = 1.10 \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{0.88} 5 < \frac{Tw}{D} \leq 10 \quad (14)$$

ضرایب همبستگی روابط فوق به ترتیب برابر ۰/۹۷۵، ۰/۹۹۲ و ۰/۹۹۴ می‌باشد. جهت ارائه یک معادله کلی

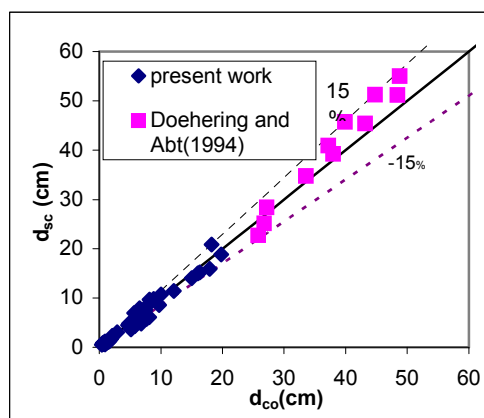
$$E = \frac{N}{100} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_o - Y_c}{Y_o} \right| \quad (10)$$

در این رابطه  $E$ : خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی،  $Y_o$ : مقدار مشاهداتی پارامتر مورد نظر،  $Y_c$ : مقدار محاسباتی پارامتر مورد نظر و  $N$ : تعداد کل داده‌ها است.

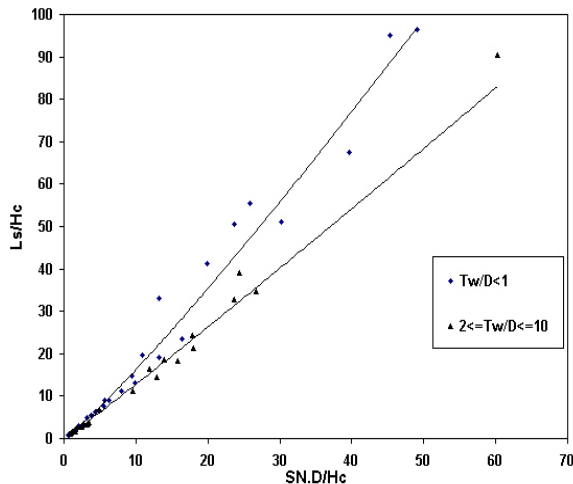
با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ضرایب تجربی معادله (۹) بدست آمده است. بهترین معادله که برای برآورد عمق حفره آبشستگی با توجه به کمترین مقدار خطای مقادیر مشاهداتی و محاسباتی  $E$  بدست آمد به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{ds}{Hc} = 0.271 \left( \frac{Tw}{D} \right)^{-0.226} \left( \frac{SN.D}{Hc} \right)^{0.605} \left( \frac{Tw}{D} \right)^{-0.48} \quad (11)$$

مقدار خطا  $E$  ناشی از معادله بالا ۷/۵ درصد می‌باشد. شکل (۳) مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده  $ds_o$  و محاسبه شده  $ds_c$  عمق آبشستگی را برای داده‌های حاضر و داده‌های  $Abt$  و  $Doehring$  (۱۹۹۴) نشان می‌دهد. روشن است که اکثر داده‌ها در محدوده  $\pm 15$  درصد خطا قرار می‌گیرد. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که رابطه (۱۱) دقت قابل قبولی داشته باشد.



شکل ۳: مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده عمق آبشستگی.



شکل ۵: تغییرات  $L_s/H_c$  بر حسب  $SN.D/H_c$  و  $Tw/D$ .

معادلات زیر با استفاده از داده های آزمایشگاهی برای مقادیر مختلف  $Tw/D$  بدست آمد:

$$\frac{L_s}{H_c} = 1.232 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{1.21} \quad \frac{Tw}{D} < 1 \quad (17)$$

$$\frac{L_s}{H_c} = 1.16 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{1.042} \quad 2 \leq \frac{Tw}{D} \leq 10 \quad (18)$$

ضرایب همبستگی روابط فوق به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۹۹۳ می باشد. جهت ارائه یک معادله کلی برای همه نسبتهای  $\frac{Tw}{D}$  شکل عمومی معادله زیر در نظر گرفته شد.

$$\frac{L_s}{H_c} = g \left( \frac{Tw}{D} \right)^h \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^i \quad (19)$$

که در آن  $g$ ،  $h$  و  $i$  مقادیر تجربی است که ممکن است تابعی از  $\frac{Tw}{D}$  باشد. با تحلیل داده های آزمایشگاهی معادله کلی زیر برای برآورد طول حفره آبستگي، با توجه به کمترین مقدار خطا، بدست آمد:

$$\frac{L_s}{H_c} = 1.195 \left( \frac{Tw}{D} \right)^{-0.072} \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{1.081} \quad (20)$$

برای همه نسبتهای  $\frac{Tw}{D}$ ، شکل عمومی معادله زیر در نظر گرفته شد.

$$\frac{W_s}{H_c} = d \left( \frac{Tw}{D} \right)^e \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^f \quad (15)$$

که در آن  $d$ ،  $e$  و  $f$  مقادیر تجربی است که ممکن است تابعی از  $\frac{Tw}{D}$  باشد. مطابق با روشی که برای برآورد ضرایب تجربی معادله عمق آبستگي انجام گرفت معادله کلی زیر برای برآورد عرض حفره آبستگي، با توجه به کمترین مقدار خطا، بدست آمد:

$$\frac{W_s}{H_c} = 1.29 \left( \frac{Tw}{D} \right)^{-0.125} \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.926} \quad (16)$$

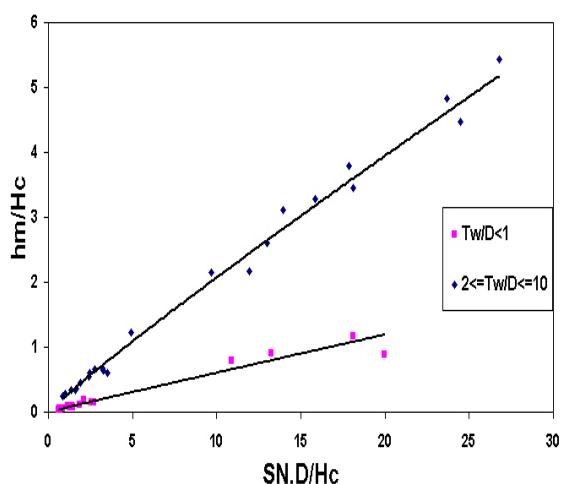
مقدار خطا  $E$  ناشی از معادله بالا ۲/۹ درصد می باشد. نجفی (۱۳۸۱) با مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده عرض حفره آبستگي دقت قابل قبول رابطه (۱۶) را نشان داد.

## طول حفره آبستگي LS

فاصله افقی از ابتدا تا انتهای حفره آبستگي را طول حفره آبستگي گویند. برای محافظت بستر پایین دست کالورت نیاز است که حداکثر طول حفره آبستگي را بدانیم تا بر اساس آن طول سازه محافظ را طراحی کنیم. شکل (۵) تغییرات طول آبستگي نسبی  $L_s/H_c$  را بر حسب  $SN.D/H_c$  برای مقادیر مختلف  $Tw/D$  نشان می دهد. روشن است که عمق پایاب بر روی طول حفره آبستگي نیز تاثیر دارد. شکل (۵) نشان می دهد که افزایش  $Tw$ ، کاهش طول حفره آبستگي را برای مقادیر مشخص  $D$  و  $H_c$  به همراه دارد.

مقادیر مختلف  $Tw/D$  نشان می دهد. روشن است که عمق پایاب تاثیر قابل توجهی بر روی ارتفاع برآمدگی رسوبات نیز دارد.

شکل (۷) نشان می دهد که افزایش  $Tw$ ، افزایش ارتفاع برآمدگی رسوبات جلوی حفره آبستنگی را برای مقادیر مشخص  $D$  و  $H_c$  به همراه دارد.



شکل ۷: تغییرات  $hm/Hc$  بر حسب  $SN.D/Hc$  و  $Tw/D$ .

بهترین معادلات با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برای نسبت‌های مختلف  $Tw/D$  به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{hm}{Hc} = 0.0636 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.978} \frac{Tw}{D} < 1 \quad (21)$$

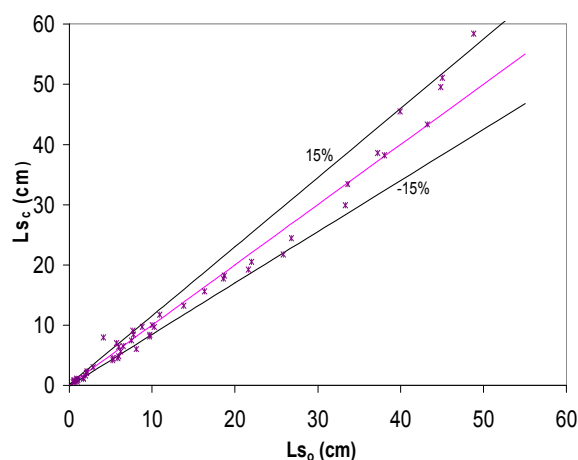
$$\frac{hm}{Hc} = 0.224 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.928} \quad 2 \leq \frac{Tw}{D} \leq 10 \quad (22)$$

ضرایب همبستگی روابط فوق به ترتیب برابر ۰/۹۷۱ و ۰/۹۹۱ می باشد. شکل معادله کلی برای همه نسبت‌های مختلف  $\frac{Tw}{D}$  به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$\frac{hm}{Hc} = k \left( \frac{Tw}{D} \right)^l \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^m \quad (23)$$

که در آن  $k$ ،  $l$  و  $m$  مقادیر تجربی است. با تحلیل داده های آزمایشگاهی معادله کلی زیر برای برآورد ارتفاع برآمدگی رسوبات، با توجه به کمترین مقدار خطا، بدست آمد:

مقدار خطا بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی طول حفره آبستنگی با استفاده از معادله فوق ۱/۹۶ درصد می باشد.



شکل ۶: مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده طول آبستنگی.

شکل (۶) مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده  $Ls_0$  و محاسبه شده  $Ls_c$  طول حفره آبستنگی را نشان می دهد. روشن است که اکثر داده ها در محدوده  $\pm 15$  درصد خطا قرار می گیرد. بدین ترتیب می توان انتظار داشت که رابطه (۲۰) دقت قابل قبولی داشته باشد.

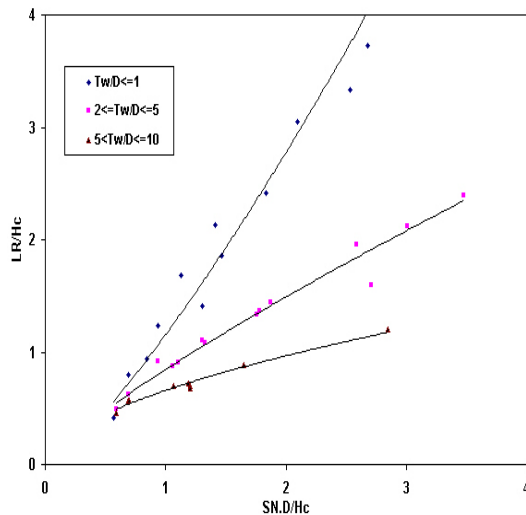
## ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست حفره آبستنگی $hm$

ذرات جدا شده از بستر در اثر جت برخوردی به آن از محل حفره جابه جا شده و به پایین دست حفره حرکت می کنند و پس از کاهش انرژی جنبشی خود، ته نشین می شوند. این روند در تمام مدت آبستنگی ادامه داشته و بعد از رسیدن به یک ارتفاع حداکثر دیگر تغییری قابل توجهی در ارتفاع برآمدگی دیده نمی شود.

ارتفاع برآمدگی رسوبات بیشتر از عمق پایاب تاثیر می پذیرد و می توان گفت که زمانی که عمق پایاب کم باشد رسوبات به صورت یکنواخت جلوی حفره آبستنگی پخش و ته نشین می شود ولی زمانی که عمق پایاب بیشتر باشد رسوبات به صورت تپه ای در پایین دست حفره تشکیل می شوند.

شکل (۷) تغییرات ارتفاع نسبی برآمدگی رسوبات در جلوی حفره  $hm/Hc$  را بر حسب  $SN.D/Hc$  برای





شکل ۹: تغییرات LR/Hc بر حسب SN.D/Hc و Tw/D.

بهترین معادلاتی که برای نسبت‌های مختلف Tw/D بدست آمده به صورت زیر می باشد:

$$\frac{L_R}{H_c} = 1.155 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{1.265} \quad \frac{Tw}{D} < 1 \quad (25)$$

$$\frac{L_R}{H_c} = 0.846 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.818} \quad 2 \leq \frac{Tw}{D} \leq 5 \quad (26)$$

$$\frac{L_R}{H_c} = 0.658 \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.554} \quad 5 < \frac{Tw}{D} \leq 10 \quad (27)$$

ضرایب همبستگی روابط فوق به ترتیب برابر ۰/۹۴۸ ، ۰/۹۷۴ و ۰/۹۶۷ می باشد. شکل معادله کلی برای نسبت‌های مختلف  $\frac{Tw}{D}$  به صورت زیر در نظر گرفته شد.

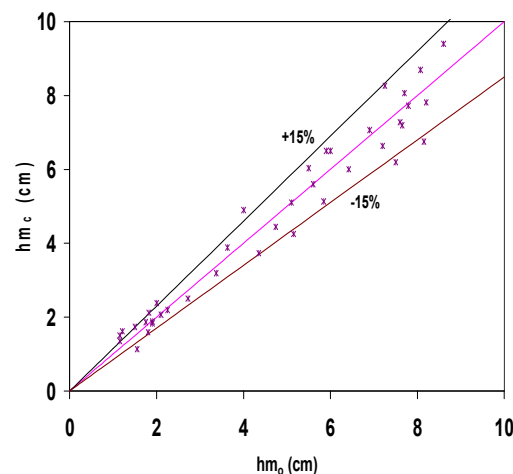
$$\frac{L_R}{H_c} = n \left( \frac{Tw}{D} \right)^o \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^p \quad (28)$$

که در آن n، o و p مقادیر تجربی است. ساده‌ترین شکل معادله برای برآورد طول برآمدگی رسوبات جلوی حفره، با توجه به کمترین مقدار خطای مشاهداتی و محاسباتی، به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{L_R}{H_c} = 1.064 \left( \frac{Tw}{D} \right)^{-0.268} \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.909} \quad (29)$$

$$\frac{hm}{H_c} = 0.079 \left( \frac{Tw}{D} \right)^{0.576} \left( \frac{SN.D}{H_c} \right)^{0.97} \quad (24)$$

مقدار خطا E ناشی از معادله بالا ۸/۷۵ درصد می باشد. شکل (۸) مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده  $hm_o$  و محاسبه شده  $hm_c$  ارتفاع برآمدگی رسوبات را نشان می دهد. روشن است که اکثر داده ها در محدوده  $\pm 15\%$  درصد خطا قرار می گیرد. بدین ترتیب می توان انتظار داشت که رابطه (۲۴) دقت قابل قبولی داشته باشد.



شکل ۸: مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده طول آبشستگی.

### طول رسوبات ته نشین شده پایین دست حفره آبشستگی LR

فاصله افقی از انتهای حفره آبشستگی تا انتهای رسوبات ته نشین شده در پایین دست حفره آبشستگی را طول برآمدگی رسوبات می گویند. شکل (۹) تغییرات طول نسبی برآمدگی رسوبات LR/Hc را بر حسب SN.D/Hc برای مقادیر مختلف Tw/D نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که افزایش Tw، کاهش طول برآمدگی رسوبات جلوی حفره آبشستگی را برای مقادیر مشخص D و Hc به همراه دارد.

۵- طول حفره آبشستگی با افزایش قطر کالورت و ارتفاع ریزش کاهش پیدا می‌کند ولی با افزایش عمق پایاب طول حفره آبشستگی افزایش پیدا می‌کند.

۶- ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین دست حفره آبشستگی با افزایش قطر کالورت افزایش پیدا می‌کند در حالی که با افزایش ارتفاع ریزش تغییر چندانی پیدا نمی‌کند. عمق پایاب تأثیر زیادی روی ارتفاع برآمدگی نشان می‌دهد به طوری که برای حالتی که پایاب خیلی کم باشد رسوبات به صورت یکنواخت و تقریباً با ارتفاع ثابت جلوی حفره آبشستگی ته نشین می‌شوند ولی برای حالتی که پایاب زیاد باشد، یک تپه جلوی حفره آبشستگی تشکیل می‌شود. با افزایش عمق پایاب، ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست حفره هم افزایش پیدا می‌کند.

۷- طول برآمدگی رسوبات ته نشین شده در پایین دست حفره آبشستگی با افزایش قطر کالورت و ارتفاع ریزش، افزایش پیدا می‌کند ولی با افزایش عمق پایاب طول برآمدگی رسوبات کاهش پیدا می‌کند.

۸- روابط مناسبی برای برآورد ابعاد حفره آبشستگی و برآمدگی ناشی از ته نشینی رسوبات در پایین دست آن ارائه شد.

مقدار خطا E ناشی از معادله فوق برابر  $3/02$  در صد می‌باشد. نجفی (۱۳۸۱) با مقایسه بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده طول برآمدگی رسوبات، دقت قابل قبول رابطه (۲۹) را نشان داد.

## نتیجه گیری

از بررسی نتایج بدست آمده از آزمایشها موارد زیر را به عنوان نتیجه گیری می‌توان بیان کرد:

۱- افزایش عدد فرود ذرات، افزایش ابعاد حفره آبشستگی و ابعاد رسوبات ته نشین شده در پایین دست حفره را به همراه دارد.

۲- عمق پایاب تأثیر زیادی روی ابعاد حفره آبشستگی دارد. روابط بی بعدی که برای هر یک از ابعاد حفره آبشستگی ارائه شد تابعی از نسبت عمق پایاب به قطر لوله  $Tw/D$  است.

۳- عمق آبشستگی با افزایش قطر کالورت و ارتفاع ریزش جریان افزایش پیدا می‌کند ولی با افزایش عمق پایاب از مقدار عمق آبشستگی کاسته می‌شود.

۴- عرض حفره آبشستگی با افزایش قطر کالورت و ارتفاع ریزش افزایش پیدا می‌کند ولی با افزایش عمق پایاب از عرض حفره آبشستگی کاسته می‌شود.

## مراجع

- ۱- نجفی، ج. "مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست کالورت لوله ای." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، (۱۳۸۱).
- 2 - Abt, S. R., Klberdanz, R. L. and Mendoza, C. (1984). "Unified scour determination." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 110, No. 10, PP. 1363-1367.
- 3 - Abt, S. R., Ruff, J. F., Doehring, F. K., and Donnell, C. A. (1987). "Influence of culvert shape on outlet scour." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 3, PP. 393-400.
- 4 - Ade, F. and Rajaratnam, N. (1998). "Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 36, No. 4, PP. 613-635.
- 5 - Aderibigbe, E. O. and Rajaratnam, N. (1996). "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 34 No. 1, PP. 19-33.
- 6 - Blaisdell, F. W. and Anderson, C. L. (1988). "A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlets." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 26 No. 4, PP. 509-524.
- 7 - Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring. hydraulic structures design manual*. Balkema, Rotterdam.
- 8 - Doddiah, D., Albertson, M. L. and Thomson, R. (1953). "Scour from jets." *Proceedings of the Minnesota International Hydraulic Convention, Minneapolis, Minnesota, USA*, PP. 161-169.

- 9 - Doehring, F. and Abt, S. R. (1994). "Drop height influence on outlet scour." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 12, PP. 1470-1476.
- 10 - Ghodsian, M. (2002). "Scour hole geometry downstream of a culvert." *13th APD-IAHR Conference*, Singapore.
- 11 - Ghodsian, M., Abbasi, A. A. and Azar, F. A. (1998). "Maximum depth of scour below free jet spillway." *5<sup>th</sup> seminar on river engineering*, Ahvaz, Iran.
- 12 - Lim, S. Y. (1995). "Scour below unsubmerged full-flowing culverts." *Proc. Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy*, Vol. 112, PP. 136-149.
- 13 - Lim, S. Y. and Chin, C. O. (1992). "Scour By circular wall jets in nonuniform sediments." *Advances in Hydro-science and Engineering*, Vol. 1, PP. 1989-1994.
- 14 - Ojha, C. S. P. (1999). "Outlet scour modeling for drop height influence." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 1. PP. 83-85.
- 15 - Rajaratnam, N. (1982). "Erosion by submerged circular jets." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 108, No. 2, PP. 262-267.
- 16 - Rajaratnam, N. and Berry, B. (1977). "Erosion by circular turbulent wall jets." *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 15 No. 3, PP. 277-289.
- 17 - Rajaratnam, N. and Mazurek, K. A. (2002). "Erosion of a polystyrene bed by obliquely impinging circular turbulent air jets." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40 No. 6. PP. 709-716.
- 18 - Robinson, A. R. (1971). "Model study of scour from cantilevered outlets." *Transaction, ASAE*, Vol. 14 PP. 571-581.
- 19 - Ruff, J. F., Abt, S. R., Mendoza, C., Shaikh, A. and Kloberdanz, R. (1982). "Scour at culvert outlets in mixed bed materials." *Report FHWA/RD- 82/011*, Colorado state Univ., Fort Collins, Colorado.
- 20 - Westrich, B. and Kobus, H. (1973). "Erosion of uniform sand bed by continuous and pulsating jets." *Proceedings of IAHR Ccongress*, Istanbul, Turkey, Vol. 1, A13, PP. 1-8.